

1. Глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD наблюдает более высокий поток нейтрино с энергией выше 200 ТэВ от Галактики, чем это предсказывается современными моделями.

С завершением работы зимней экспедиции 2024 года на озере Байкал количество регистрирующих оптических модулей в состав глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD превысило 4100, а его эффективный объем в задаче регистрации событий от нейтрино высоких энергий (свыше 100 ТэВ) составил более ≈ 0.6 куб.км. Анализ каскадных событий от нейтрино, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018 – 2023 годов, позволил сделать вывод, что поток галактических нейтрино с энергией выше 200 ТэВ намного выше, чем предсказывается современными моделями. Этот результат Baikal-GVD подтверждается анализом общедоступных данных нейтринного телескопа IceCube с энергией $E > 200$ ТэВ, что открывает новые возможности для изучения происхождения энергичных космических лучей, нейтрино и гамма-лучей в Млечном Пути, поскольку требует серьезного обновления моделей космических лучей.

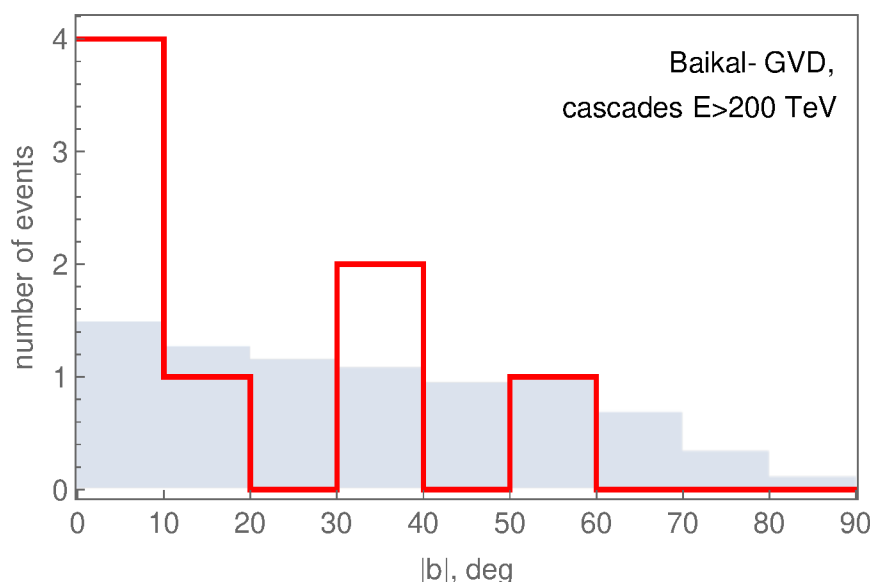


Рисунок 1. Распределение каскадных событий Baikal-GVD с энергией выше 200 ТэВ по галактической широте (модуль значения, $|b|$, в градусах): наблюдаемых (красная гистограмма) и ожидаемых (заштрихованная).

Публикация:

Baikal-GVD Collaboration (V.A. Allakhverdyan, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov et al.) and Y.Y. Kovalev, A.V. Plavin, D.V. Semikoz, S.V. Troitsky, Probing the Galactic neutrino flux at neutrino energies above 200 TeV with the Baikal Gigaton Volume Detector, arXiv:2411.05608 [astro-ph.HE], (2024).

Координатор работ: Домогацкий Григорий Владимирович

Эл. почта: domogats@yandex.ru

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.

2. Построена модель магнитного поля родительской галактики ярчайшего гамма-всплеска и аксион-фотонной конверсии в ней

GRB 221009A – самый яркий гамма-всплеск, когда-либо зарегистрированный на Земле. На ранней стадии послесвечения этого события телескоп LHAASO зафиксировал фотоны с исключительными энергиями выше 10 ТэВ, а детектор Carpet-2 обнаружил фотоподобное событие выше 200 ТэВ. Гамма-лучи очень высоких энергий с такого большого расстояния не должны достигать Земли из-за рождения пар на космическом фоновом излучении. Одно из возможных решений – смешивание фотонов с аксиноподобными частицами (ALP). Возможность такого сценария зависит от магнитных полей вдоль линии зрения, которые плохо изучены. С использованием наблюдений родительской галактики GRB 221009A с помощью космического телескопа Хаббл, наблюдений и моделирования полей в других галактиках, была построена модель магнитного поля родительской галактики этого гамма-всплеска. Показано, что в широком диапазоне масс ALP и констант их взаимодействия с фотонами смешивание естественным образом объясняет результаты как LHAASO, так и Ковра-2.

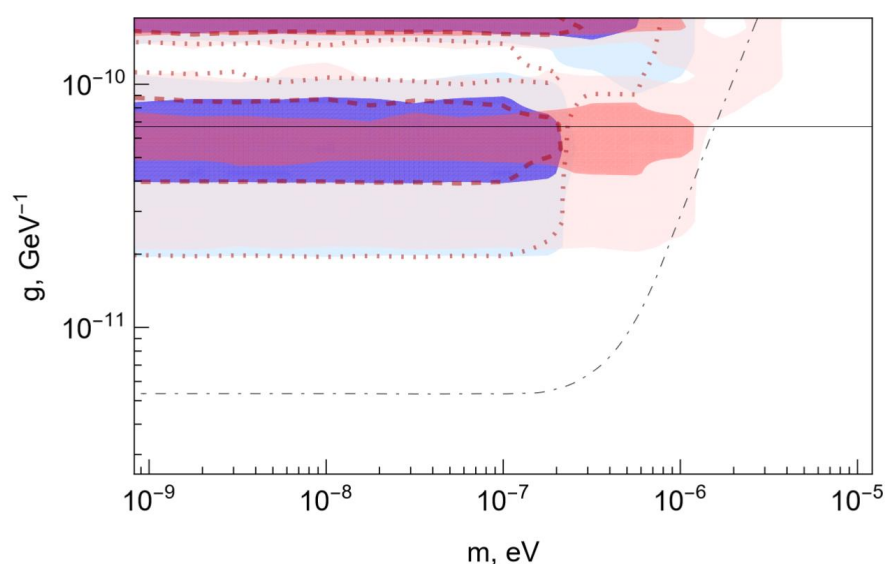


Рисунок 1. Параметры аксиноподобной частицы, при которых происходит сильное смешивание с фотонами в родительской галактике гамма-всплеска GRB 221009A при энергиях LHAASO (синяя закрашка) и Ковра-2 (красная закрашка).

Публикации:

S.V. Troitsky, Towards a model of photon-axion conversion in the host galaxy of GRB 221009A, JCAP 01 (2024) 016.

Координатор работ: Троицкий Сергей Вадимович

эл. почта: st@inr.ac.ru

тел: +7 (915) 116-30-48

ПНФИ 1.3.3.4 Физика космических лучей

3. Тяжелый массовый состав космических лучей самых высоких энергий

Космические лучи ультравысоких энергий (КЛУВЭ) — это заряженные частицы с энергиями от 10^{18} эВ и выше, приходящие из космоса. Их происхождение достоверно неизвестно, но можно утверждать, что они приходят извне нашей Галактики. Важная характеристика КЛУВЭ, которая может помочь понять их происхождение — это их массовый состав, т. е. тип частиц. В частности, природа резкого затухания спектра КЛУВЭ на самых высоких энергиях может быть разной в зависимости от типа этих частиц: если это протоны, то более вероятен сценарий затухания из-за их рассеяния на реликтовом излучении (ГЗК-эффект), тогда как в случае ядер затухание может быть связано с пределом ускорения частиц в их источниках. До сих пор измерение состава КЛУВЭ при самых высоких энергиях было затруднено крайне малой статистикой и различными систематическими неопределенностями.

В настоящей работе предложен новый метод оценки массового состава КЛУВЭ, использующий данные только об их энергиях и направлениях прихода. Сравнивая наблюдаемое распределение событий по небесной сфере с распределением, ожидаемым для различного состава, излученного из источников, можно установить какой состав совместен с данными. Разработанный метод был применен к данным эксперимента Telescope Array — крупнейшей обсерватории КЛУВЭ в Северном Полушарии. В результате было с хорошей точностью установлено, что поток КЛУВЭ с энергиями более 10^{20} эВ состоит из тяжелых ядер (уровня железа). Полученный результат устойчив к неопределенностям отклонений КЛУВЭ в галактических и внегалактических магнитных полях, а также к неопределенности концентрации источников КЛУВЭ.

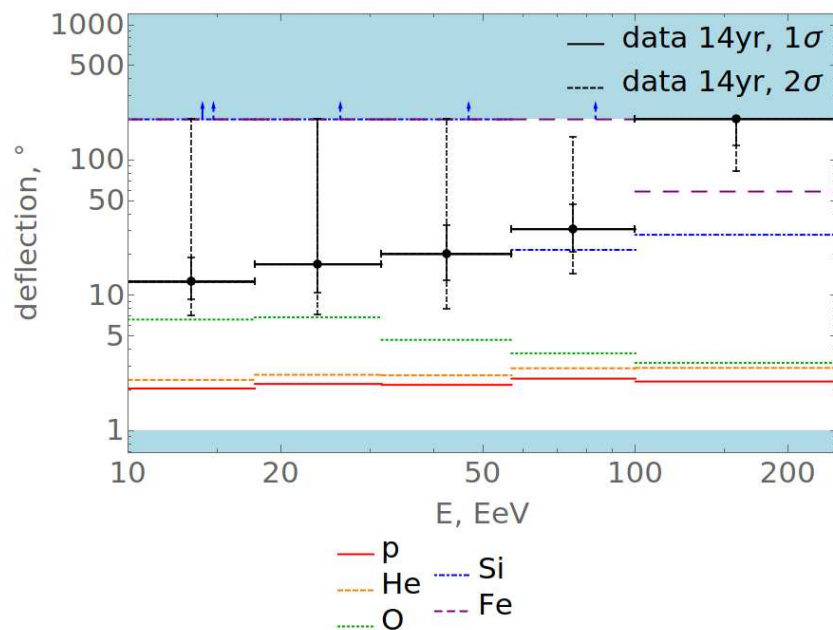


Рис.1. Среднее отклонение КЛУВЭ от их источников в крупномасштабной структуре Вселенной в зависимости от их энергии. Разноцветные линии — ожидаемые отклонения для некоторых типов ядер излученных из источников. Черные точки со статистическими ошибками — данные Telescope Array. Можно видеть, что при энергиях более 10^{20} эВ КЛУВЭ отклоняются от источников сильнее чем ожидается даже для ядер железа.

Публикации:

1. R.U. Abbasi et al. [Telescope Array collaboration], Isotropy of cosmic rays beyond 10^{20} eV favors their heavy mass composition, Phys. Rev. Lett. 133 (2024) 041001; arXiv:2406.19287

2. R.U. Abbasi et al. [Telescope Array collaboration], Mass composition of ultra-high energy cosmic rays from distribution of their arrival directions with the Telescope Array, Phys. Rev. D 110 (2024) 022006; arXiv:2406.19286

Координатор работ: Кузнецов Михаил Юрьевич

эл.почта: mkuzn@inr.ac.ru

тел. +7 9067604741

ПФНИ 1.3.3 Ядерная физика и физика элементарных частиц

4. Поиск скрытого сектора материи в эксперименте NA64 в ЦЕРНе

В эксперименте NA64 μ был выполнен первый поиск скрытого сектора материи с использованием высокоэнергетического мюонного пучка и метода определения недостающей энергии-импульса. Мюоны из пучка M2 суперпротонного синхротрона ЦЕРН с импульсом 160 ГэВ/с направлялись на активную мишень. Характеристика сигнального события состоит из одиночного рассеянного мюона с импульсом меньше 80 ГэВ/с в конечном состоянии, сопровождающегося отсутствием выделенной энергии в детекторе. Для полного набора данных, соответствующего $(1,98 \pm 0,02) \times 10^{10}$ мюонов на мишени, в области ожидаемого сигнала не наблюдается событий. Это позволило установить новые ограничения на оставшееся пространство параметров $(m_{Z'}, g_{Z'})$ – массы и константы связи нового векторного бозона Z' ($L_\mu - L_\tau$) с мюоном, которые могли бы объяснить аномалию магнитного момента мюона $(g-2)_\mu$. (рисунок 1). Кроме того, исключена часть области параметров модели, объясняющей наблюдаемую плотность реликтовой темной материи.

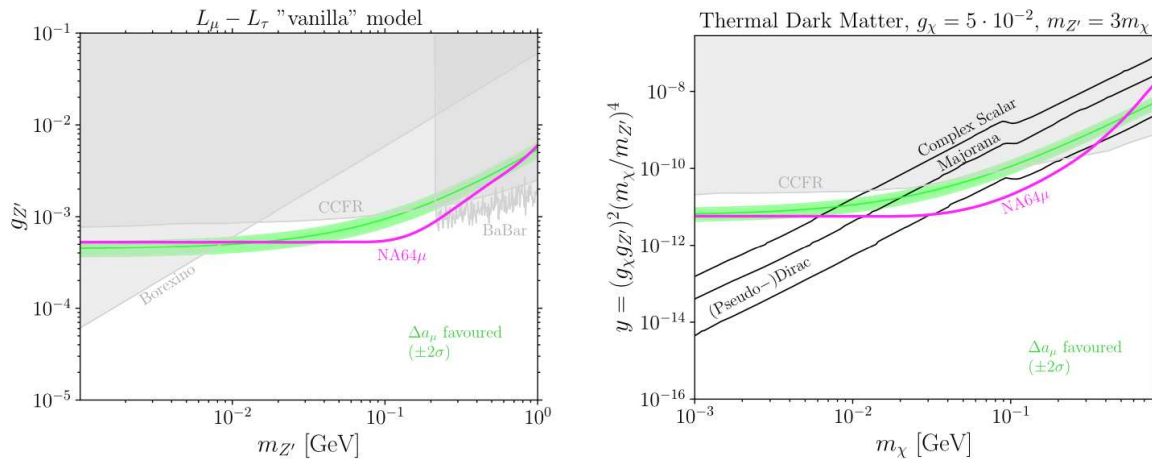


Рисунок 1 – Пределы для связи $g_{Z'}$ на д.у. 90% в зависимости от массы Z' , $m_{Z'}$, для «ванильной» модели $L_\mu - L_\tau$ (также показана полоса $\pm 2\sigma$ для вклада Z' в расхождение $(g-2)_\mu$) (слева) и пределы исключения на д.у. 90%, полученные в эксперименте NA64 μ в пространстве параметров (m_χ, y) для теплой темной материи в модели $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ с $m_{Z'} = 3m_\chi$ и связью $g_\chi = 5 \times 10^{-2}$ для 2×10^{10} мюонов на мишени.

В эксперименте NA64h на ускорителе SPS в ЦЕРНе получены первые результаты проверки концепции поиска скрытого сектора частиц с помощью невидимых распадов псевдоскалярных η и η' -мезонов. Применяемый метод, предложенный сотрудниками ИЯИ РАН, использует зарядово-обменную реакцию при рассеянии пионов с энергией 50 ГэВ на ядрах активной мишени в качестве источника нейтральных мезонов. События реакции

η , $\eta' \rightarrow \text{invisible}$ могли бы проявляться в виде нетривиальной характеристики — полного исчезновения энергии входящего пучка в детекторе за счет ее уноса новыми частицами. Однако при анализе $2,9 \times 10^9$ пионов на мишени никаких свидетельств таких событий обнаружено не было, что позволило установить строгое ограничение на относительную долю такого распада для η' -мезона $\text{Br}(\eta' \rightarrow \text{invisible}) < 2,1 \times 10^{-4}$, улучшив существующую границу примерно в 3 раза. Также установлено ограничение на $\text{Br}(\eta \rightarrow \text{invisible}) < 1,1 \times 10^{-4}$, сравнимое с существующим.

Эти результаты демонстрируют огромный потенциал используемого подхода и дают четкое руководство к тому, как повысить чувствительность эксперимента в будущих поисках невидимых распадов нейтральных мезонов, открывая путь для изучения темных секторов и легкой темной материи с помощью мюонных пучков уникальным и дополняющим другие эксперименты способом.

Публикации:

1. Yu.M. Andreev et al. (NA64 Collaboration). First Results in the Search for Dark Sectors at NA64 with the CERN SPS High Energy Muon Beam // Phys. Rev. Lett. 132, 211803 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevLett.132.211803
2. Yu.M. Andreev et al. (NA64 Collaboration). Dark-Sector Search via Pion-Produced η and η' Mesons Decaying Invisibly in the NA64h Detector // Phys. Rev. Lett. 133, 121803 (2024). DOI: 10.1103/PhysRevLett.133.121803

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. Тлисова, А.Н. Торопин
Эксперимент NA64: ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, НИЦ КИ ИФВЭ, ОИЯИ, ТПУ, ФИАН (Россия), Университет Лондонского колледжа (Великобритания), Университет Бонна (Германия), Университет Гутенберга (Германия), Университет Патраса (Греция), Институт физики частиц (Испания), Национальный институт ядерной физики (Италия), 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

Координатор работ: Гниненко Сергей Николаевич

эл.почта: Gninenko@inr.ru; Sergei.Gninenko@cern.ch

ПНФИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

5. Построен однородный по направлениям каталог оптически ярких блазаров и, с его помощью, подтверждены аномальные корреляции космических лучей с лацертидами в данных эксперимента HiRes

Блазары — активные галактики с релятивистскими выбросами, направленными на наблюдателя, — являются предметом многочисленных исследований. Многие из этих работ основаны на статистических методах, и в ряде случаев оказывается важным равномерное распределение источников по небу. Нами был впервые построен статистически полный изотропный каталог блазаров, основанный на универсальных критериях отбора и равномерно покрывающий всю небесную сферу. С использованием выделенной из этого каталога выборки лацертид были подтверждены результаты о наличии аномальных

корреляций направлений прихода космических частиц с энергиями выше 10^{19} эВ, зарегистрированных экспериментом HiRes в стереоскопическом режиме, и оптически ярких лацертид, а также о неравномерном распределении по небу коррелирующих событий.

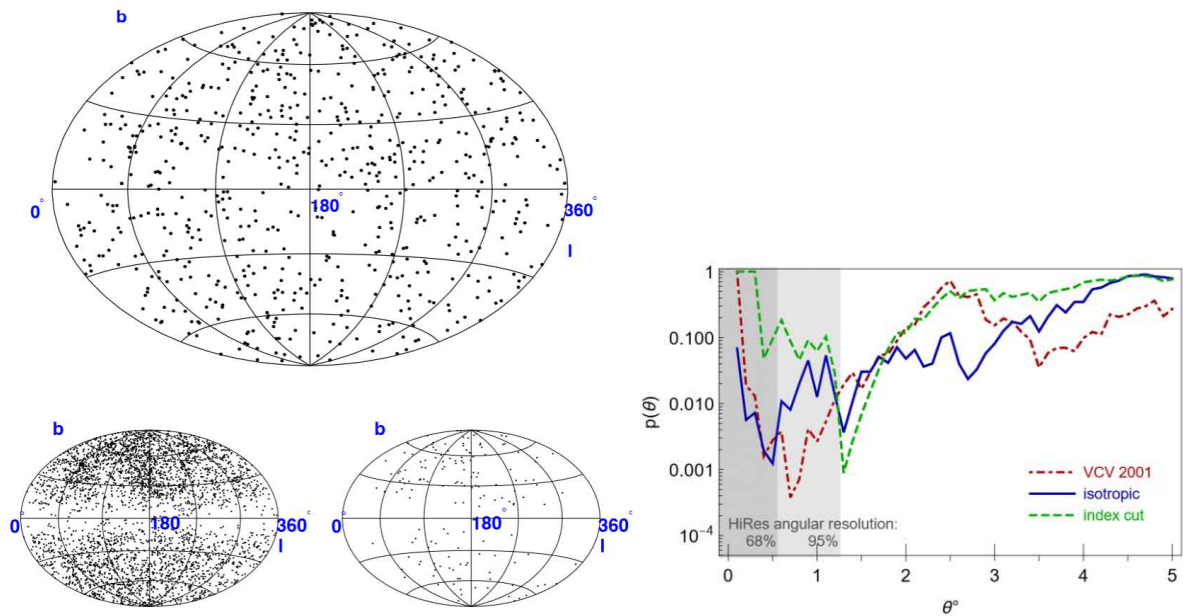


Рисунок 1. Слева: сравнение распределений по небу объектов из нового (вверху) и двух старых (внизу) каталогов блазаров. Справа: Сравнение зависимости значимости корреляций космических лучей с лацертидами от углового масштаба для старой и новой выборок.

Публикации:

- [1] M. Kudenko, S. Troitsky, An isotropic full-sky sample of optically selected blazars, *Astron. Astrophys.* 686 (2024) A178.
- [2] M. Kudenko, S. Troitsky, Anomalous Cosmic-Ray Correlations Revisited with a Complete Full-Sky Sample of BL Lac Type Objects, *JETP Lett.* 119 (2024) 335

Координатор работ: Троицкий Сергей Вадимович

эл. почта: st@inr.ac.ru

тел. +7 (915) 116-30-48

ПНФИ 1.3.3.4 Физика космических лучей

6. Обнаружение “колена” в спектре космических протонов и ядер гелия

“Колено” (~ 4 ПэВ) в энергетическом спектре космических лучей было открыто более полувека назад, однако механизм его возникновения до сих пор остаётся неясным. Реконструкция спектров отдельных массовых компонент потока космических лучей в области энергий 1 – 100 ПэВ может предоставить ключевую информацию для понимания их источников, механизмов ускорения и распространения.

Проведён анализ архивных данных эксперимента KASCADE с помощью специально разработанного для этой цели метода реконструкции пяти массовых компонент (протоны,

гелий, углерод, кремний, железо) космических лучей с использованием машинного обучения, а также с учётом современных post-LHC моделей адронных взаимодействий. Реконструированные энергетические спектры индивидуальных массовых компонент изображены на рис. 1. Данный метод анализа продемонстрировал лучшую систематическую точность относительно оригинальных результатов KASCADE и многих современных экспериментов, например таких как IceTop. В результате в спектрах протонов и гелия была обнаружена коленоподобная структура при энергиях ~ 4.4 ПэВ и ~ 11 ПэВ с уровнем значимости 5.2σ и 3.9σ соответственно, что является первым обнаружением этих структур со значительной достоверностью. Также, было впервые обнаружено указание на ужесточение в спектре железной компоненты при энергии ~ 4.5 ПэВ, которое можно интерпретировать как зависящий от магнитной жёсткости аналог излома в спектре протонов при 166 ТэВ, недавно обнаруженный в эксперименте GRAPES-3.

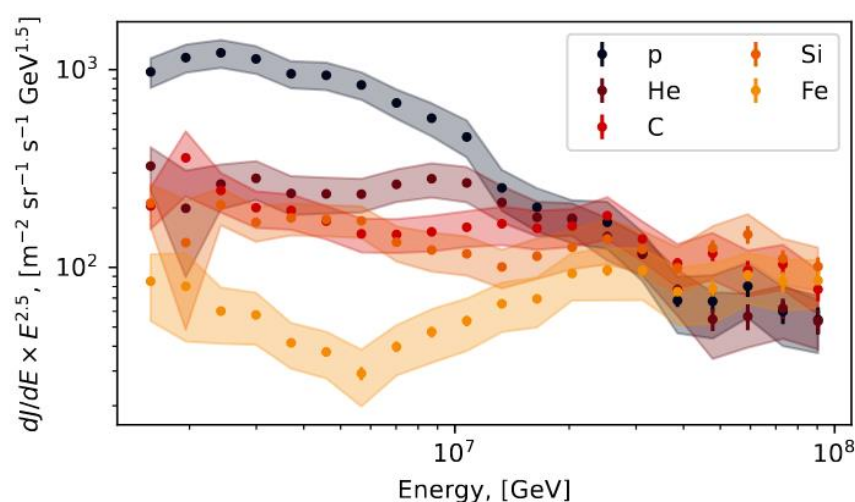


Рис. 1. Полученные в данной работе энергетические спектры пяти массовых компонент (протоны p, гелий He, углерод C, кремний Si, железо Fe) с использованием модели адронных взаимодействий QGSJet-II.04.

Публикации

1. Kuznetsov, M. Yu., Petrov, N. A., Plokhikh, I. A., & Sotnikov, V. V. (2024). Energy spectra of elemental groups of cosmic rays with the KASCADE experiment data and machine learning. In *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* (Vol. 2024, Issue 05, p. 125). <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/05/125> [arxiv:2312.08279]

Координатор работ: Петров Никита Александрович

эл. почта: N.A.Petrov@inp.nsk.su

тел. +7 (983) 139-8143

ПФНИ 1.3.3 Ядерная физика и физика элементарных частиц

7. Установление существования близкого внегалактического источника космических лучей ультравысоких энергий

Несмотря на десятилетия наблюдений, до сих пор не был достоверно обнаружен ни один источник космических лучей ультравысоких энергий (космических частиц с энергиями более 10^{18} эВ, КЛУВЭ). В ноябре 2023 года обсерватория Telescope Array

сообщила о наблюдении частицы космического происхождения с рекордно высокой энергией 244 ЭэВ (2.44×10^{20} эВ). В настоящей работе был проведен анализ возможного происхождения этой частицы, который установил, что частица с высокой вероятностью является тяжелым ядром, а ее источник находится не далее 5 Мпк (примерно 16 млн. св. лет) от Земли. Это первое однозначное указание на существование столь близкого источника КЛУВЭ. Также была впервые ограничена средняя концентрация источников КЛУВЭ излучающих тяжелые частицы: их должно быть не менее чем 1 на 10000 кубических Мпк, что исключает многие классы астрофизических объектов, такие как галактики со вспышкой звездообразования и скопления галактик, в качестве основных источников КЛУВЭ.

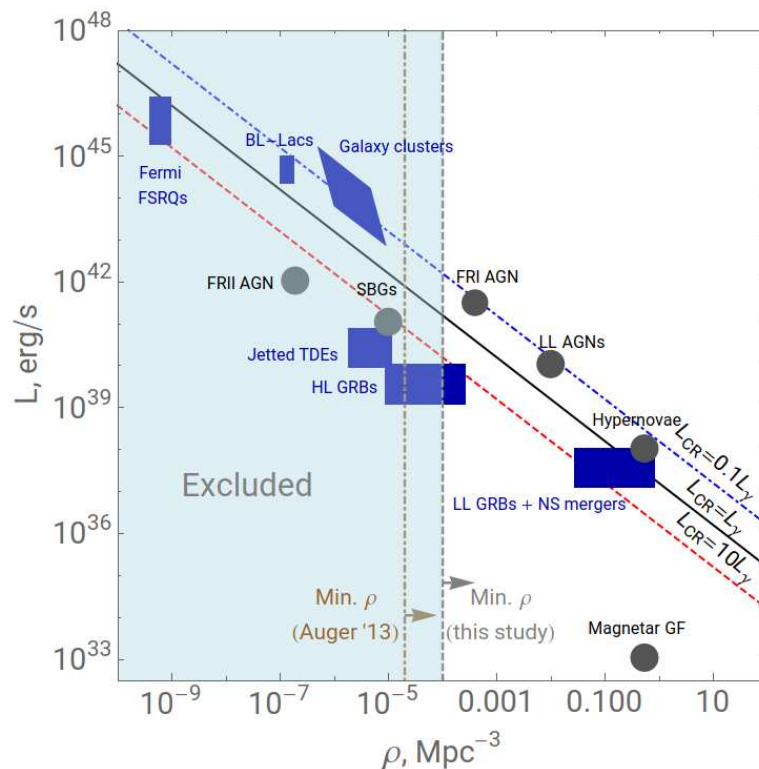


Рис.1 Предполагаемые классы источников КЛУВЭ в зависимости от их концентрации и эффективной светимости. Черная сплошная линия соответствует полной светимости всех источников, установленной экспериментом Pierre Auger. Вертикальная пунктирная серая линия - ограничение на концентрацию источников полученное в настоящей работе.

Публикации:

1. M.Yu. Kuznetsov, A nearby source of ultra-high energy cosmic rays, принята к печати в JCAP 28.02.2024; arXiv:2311.14628.

Координатор работ: Кузнецов Михаил Юрьевич

эл.почта: mkuzn@inr.ac.ru

тел. +7 9067604741

ПФНИ 1.3.3 Ядерная физика и физика элементарных частиц

8. Алгебраическая структура метода ренормализационной группы в перенормируемых моделях квантовой теории поля

Фундаментальный теоретический метод ренормализационной группы Боголюбова - Ширкова, изучающий наблюдаемую на различных коллайдерах энергетическую зависимость характеристик процессов физики элементарных частиц, физики высоких энергий и квантовой теории поля, может быть перереформулирован на строгом

математическом языке с применением элементов теории групп. Показана выделенность понятий алгебры Витта и более широко известной алгебры Вирасоро, используемой, например для описания двумерных точно-решаемых моделей квантовой теории поля. Проиллюстрировано что изучаемый теоретический метод имеет еще более строгое чем ожидалось теоретическое основание, в частности вытекающее из формулы Бейкера Кэмбелла Хауздорфа для генераторов конкретных групповых преобразований.

Публикации:

1. A.L.Kataev and K. V. Stepanyantz, "Algebraic structure of the renormalization group in the renormalizable QFT theories," [arXiv:2404.15856 [hep-th]].

Координатор работ: Катаев Андрей Львович

эл.почта: kataev@ms2.inr.ac.ru

тел. +7 9150330167

ПНФИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

9. Исследование скрытых лептонных скалярных порталов с использованием эксперимента NA64 в ЦЕРНе

Изучен потенциал эксперимента NA64 в CERN SPS для поиска процессов Новой физики, включающих редкие процессы после столкновения электронов с энергией 100 ГэВ с ядрами-мишенями. Новый лептонный портал Темного сектора, в котором скалярный бозон может быть рожден в реакции, подобной тормозному излучению с изменением аромата лептона, используется в качестве эталонного процесса. В этой работе было разработано реалистичное Монте-Карло моделирование экспериментальной установки NA64. Были исследованы основные фоновые процессы и рассчитана ожидаемую чувствительность эксперимента. Результаты показывают, что при незначительной оптимизации установки, эксперимент NA64 может исследовать большую часть доступного пространства параметров, совместимого с (g-2) аномалией мюонов и предсказаниями реликтовой плотности Темной материи в контексте нового лептонного портала Темного сектора для статистики в 10^{11} электронов, накопленных на мишени. Этот результат открывает путь к исследованию процессов, связанных с нарушением аромата заряженных лептонов в NA64.

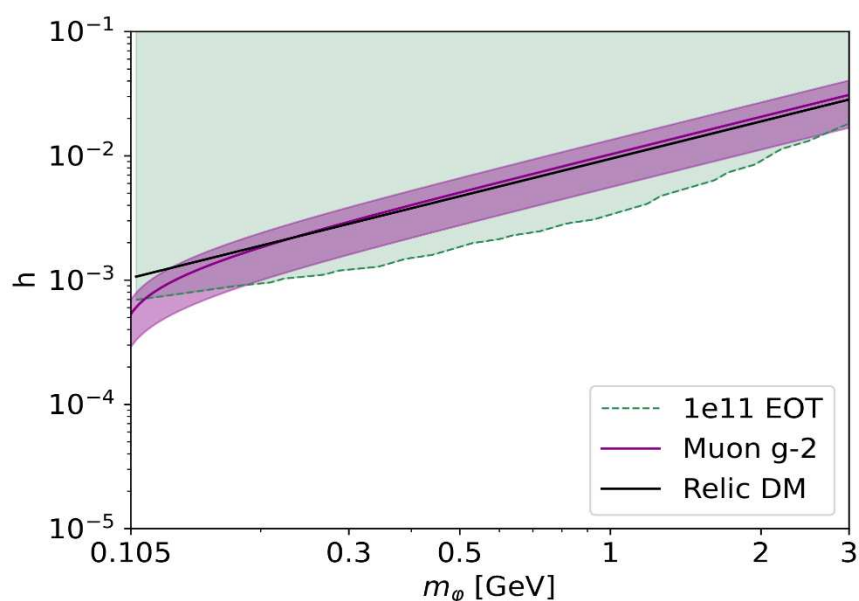


Рисунок 1. Планируемая чувствительность NA64e на уровне достоверности 90% CL в пространстве параметров (m_ϕ, h) с учетом статистики в 10^{11} электронов, накопленных на

мишени. Регион, соответствующий решению аномалии мюона $g - 2$ показан фиолетовым цветом. Характерная кривая реликтовой плотности Темной Материи показана черным цветом.

Публикации:

1. A. Ponten, H. Sieber, B. B. Oberhauser, P. Crivelli, D. Kirpichnikov, S. N. Gninenko, M. H"osgen, L. M. Bueno, M. Mongillo and A. Zhevlakov, ``Probing hidden leptonic scalar portals using the NA64 experiment at CERN," Eur. Phys. J. C 84 (2024) no.10, 1035

Координатор работ: Кирпичников Дмитрий Викторович

эл.почта: dmbrick@gmail.com

тел. +7 (915)-098-50-06

ПНФИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

10. Ограничения на параметры нарушения лоренц-инвариантности кубического типа в квантовой электродинамике из формирования фотонных атмосферных ливней

Получены ограничения на масштаб энергии нарушения инвариантности Лоренца (LIV) для фотонов с кубическим дисперсионным соотношением из недавних наблюдений гамма-излучения в диапазоне энергий 100 ТэВ–ПэВ по данным обсерватории LHAASO. Предполагая модель эффективной теории поля Майерса–Поспелова, вычисляется подавление для процесса Бете–Гайтлера, который в основном отвечает за формирование атмосферных ливней, инициированных фотонами. Сравнивая события высокоэнергетических фотонов с подавленными предсказаниями потока, мы получаем 95% CL ограничения на масштаб нарушения лоренц-инвариантности. Полученное ограничение ливня ELIV О (10 20 ГэВ) значительно слабее существующих ограничений из полученных при учёте процесса вакуумного двулучепреломления, но является независимым.

На Рисунке 1. приведены соответствующие спектры галактического источника.

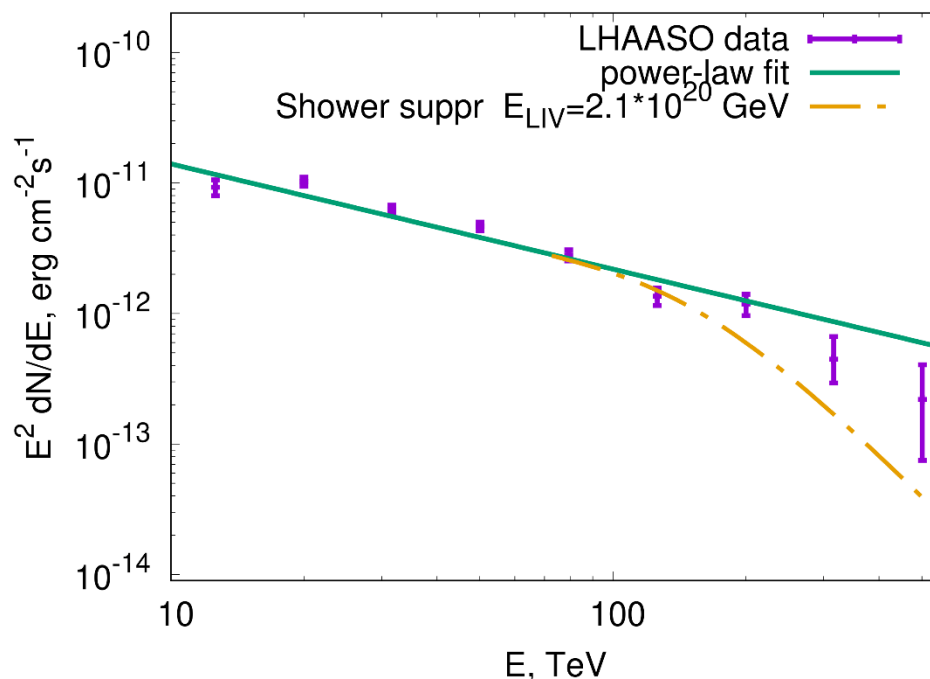


Рисунок 1. Спектры галактического источника J1908+0621, измеренные LHAASO (точки данных), степенная аппроксимация спектров (зеленая сплошная кривая), прогнозируемый поток при досветовом нарушении симметрии Лоренца LIV (желтая штрихпунктирная кривая).

Публикации:

1. Petr Satunin, Andrey Sharofeev. Shower formation constraints on cubic Lorentz invariance violation parameters in quantum electrodynamics. *Eur.Phys.J.C* 84 (2024) 8, 793

Координатор работ: Сатунин Петр Сергеевич

эл.почта: 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

11. Уменьшение эффективной массы η' - мезона в плотной ядерной среде за счёт частичного восстановления аксиальной $U_A(1)$ симметрии

Коллаборация PHENIX, Брукхевенская национальная лаборатория, США, участниками которой являются сотрудники ИЯИ, представила интригующее указание на существенное уменьшение эффективной массы η' -(эта-прайм) мезона (вакуумная масса 958 МэВ) в плотной ядерной среде. Для того, чтобы описать экспериментальные данные по исследованию корреляций двух пи-мезонов в столкновениях ядер Au+Au, масса η' - мезона должна составлять 581 МэВ [1]. Эффект был давно предсказан и ассоциируется с частичным восстановлением аксиальной $U_A(1)$ симметрии квантовой хромодинамики [2].

Этот результат стимулирует дальнейшие теоретические исследования по восстановлению (частично) $U_A(1)$ симметрии в горячей и плотной адронной среде.

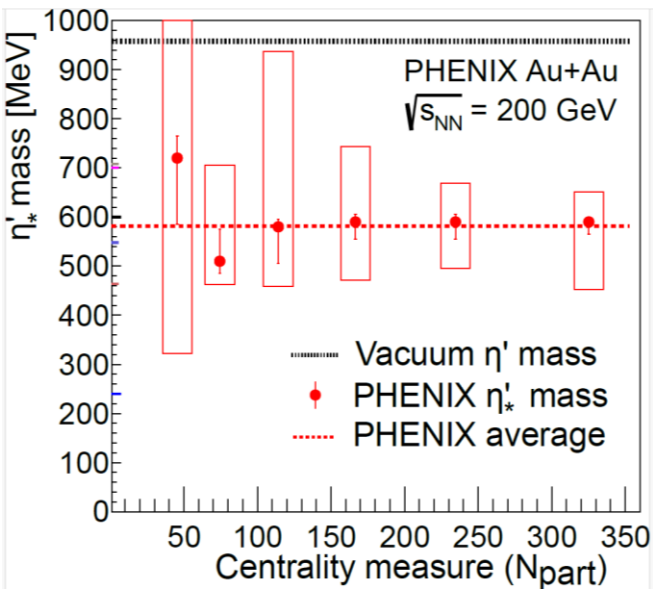


Рисунок 1. Эффективная масса η' -мезона в зависимости от числа нуклонов ядер золота, участвующих в столкновении. Верхняя пунктирная линия – вакуумное значение.

Вертикальными линиями у точек указаны статистические ошибки, прямоугольниками – систематические ошибки.

Публикации:

1. N.J. Abdulameer, Pantuev V.S. et al., PHENIX Collaboration, Centrality dependence of L'evy-stable two-pion Bose-Einstein correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions. Принято в печать в журнале Physical Review C, с указанным рисунком на обложке выпуска.
2. J. Kapusta, D. Kharzeev, and L. McLerran, The Return of the Prodigal Goldstone Boson. Phys. Rev. D 53, (1996) 5028.

Координатор работ: Пантуев Владислав Сергеевич

эл.почта: pantuev@mail.ru

тел. +7 965-219-78-54

ПНФИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

12. Рождение антипротонов и нуклонные корреляции на коллайдере NICA

Выполнены расчеты распределений по поперечному импульсу антипротонов, рожденных при столкновении ядер висмута с энергией $\sqrt{s_{nn}} = 8.4$ ГэВ на коллайдере NICA с целью изучения возможности обнаружения двух нуклонных корреляций. Определены значения кинематических параметров, при которых наиболее эффективна регистрация антипротонов, рожденных на коррелированных нуклонах. Показано, что в диапазоне средних быстрот для нуклон-нуклонных соударений, результаты расчета по стандартной модели URQMD согласуются с данными оценок по феноменологической партонной модели. Оценки сечений при параметрах Бьеркена больше единицы позволяют получить достаточный выход антипротонов при планируемой светимости. Исследование рождения частиц в кинематических условиях, запрещенных для нуклон-нуклонных столкновений, представляет собой новый метод изучения нуклонных корреляций в ядрах. Измерение рождения антипротонов имеет преимущество из-за лучшего выделения над фоновыми процессами. Детальное исследование коротко действующих корреляций в ядрах имеет большое значение для интерпретации центральных столкновений тяжелых ядер и для планирования экспериментов по поиску кварк-глюонной плазмы.

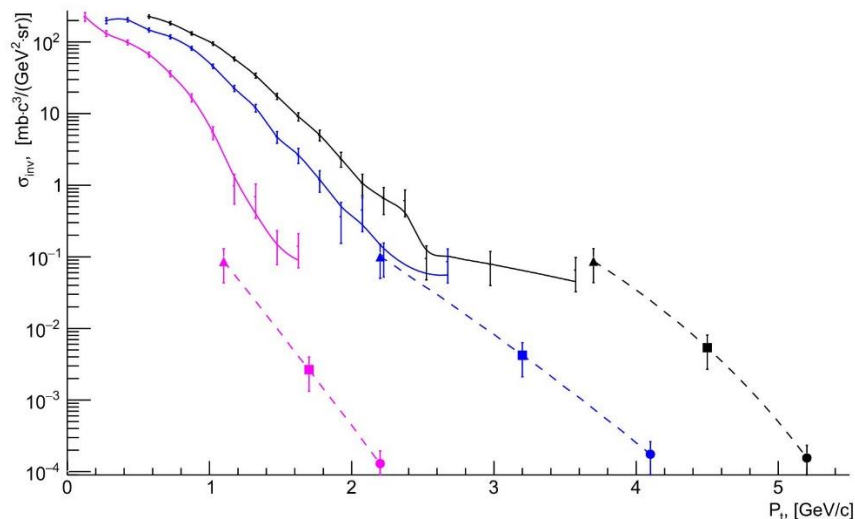


Рис. 1. Зависимость инвариантного сечения рождения антипротонов при столкновении ядер висмута с энергией $\sqrt{s_{nn}} = 8.4$ ГэВ от поперечного импульса антипротона при быстротах -0.1 – черная линия, -1.1 – синяя линия, -1.9 – фиолетовая линия. Сплошные линии результаты расчета по программе UrQMD, пунктирные по партонной модели, где треугольники при параметре Бьеркена $X=1$, квадраты $X=1.5$, кружки $X=2$

Публикация:

1.А.Б. Курепин, В.С. Попов, Н.А. Курепин, Л.А. Якобнюк, “Рождение антипротонов и нуклонные корреляции на коллайдере NICA”, в печати Письма в ЭЧАЯ (2024) Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 23-22-00077

Координатор работ: Курепин Алексей Борисович

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

ПФНИ 1.3.3.1 Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

13. Получено подтверждение предсказания модели Богатая водородом Земля.

Выполнен независимый анализ данных, полученных на детекторе BOREXINO (Гран Сассо, Италия) в эксперименте по поиску природных потоков нейтрино малых энергий ($E > 100$ КэВ). Анализ выполнен с целью подтверждения или опровержения предсказания модели Земли – Богатая водородом Земля, доли калия в теле Земли. В анализ был введен новый источник событий – рассеяние на электронах гео-антинейтрино от радиоактивных распадов изотопа калий-40. Результатом анализа является вывод авторов, что наличие anomalously большого количества калия в теле Земли, предсказанного Моделью Богатая водородом Земля, позволяет получить существенно лучшее согласие с экспериментальными данными (меньшее значение функции хи-квадрат). Таким образом, получено подтверждение предсказания модели Богатая водородом Земля.

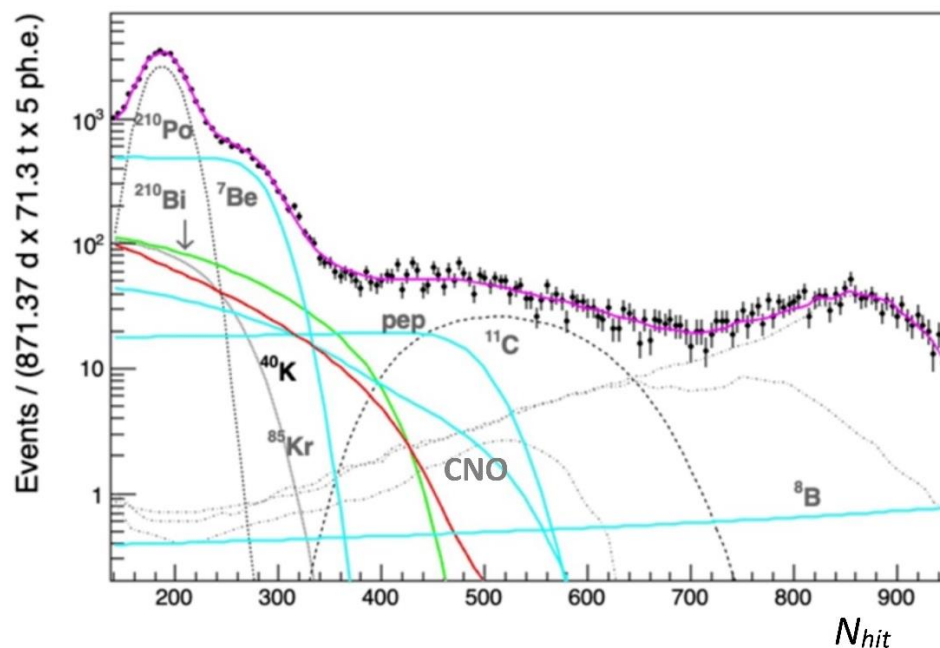


Рис. Зависимость числа событий от энергосодержания в детекторе Борексино.

Публикация:

1.L. B. Bezrukov and V. V. Sinev. Searches for Geoantineutrino Flux from 40K on the Basis of Data from the Borexino Detector. *Physics of Atomic Nuclei*, 2024, Vol. 87, No. 6, pp. 711–717. <https://doi.org/10.1134/S1063778824700674>.

Координатор: Безруков Леонид Борисович, Синёв Валерий Витальевич

эл. почта: bezrukov1945@mail.ru, 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.

14. Новый предел на аксионо-подобную псевдоскалярную частицу

В эксперименте ОКА (коллаборация ИФВЭ - ИЯИ РАН - ОИЯИ) получен новый результат по поиску аксионо-подобной частицы в распадах положительных каонов [1]. Аксион - гипотетическая нейтральная псевдоскалярная элементарная частица, постулированная для решения проблемы сохранения комбинированной CP-симметрии в квантовой хромодинамике. Аксион может рождаться в распаде положительного каона на два пиона и аксион. В эксперименте ОКА было проанализировано более 3-х миллиардов распадов положительных каонов. В результате не было обнаружено ни одного события с аксионом в конечном состоянии. Был получен верхний предел на вероятность такого распада от 2.5×10^{-6} до 2×10^{-7} в зависимости от массы аксиона в интервале от 0 до 200 МэВ, что более чем на порядок лучше наиболее сильного до настоящего времени предела, полученного в этом распаде в эксперименте E787 в БНЛ.

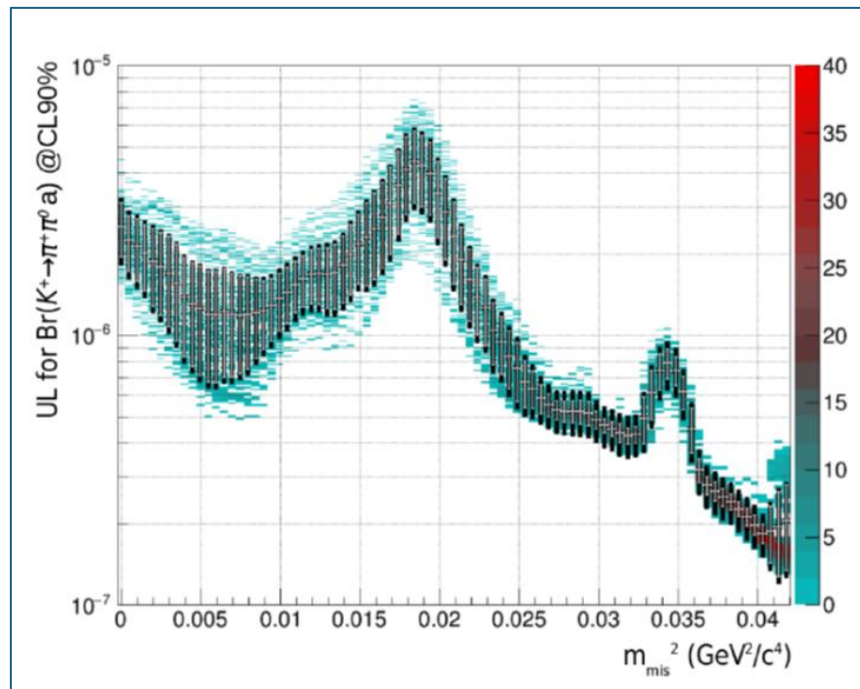


Рис.1. Верхний предел (доверительный интервал 90%) на вероятность распада $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$. Вертикальные линии показывают систематические, соответствующие 1 стандартному отклонению.

Публикация:

[1] A.S. Sadovsky et al. Searches for the light invisible axion-like particle in $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 a$ decay. Eur.Phys.J.C 84 (2024) 3, 266.

Кооперация с другими организациями:

- 1) Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия
- 2) Институт физики высоких энергий НИЦ КИ, 142281, Протвино, Московская область, Россия
- 3) Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Московская обл, Россия

Координатор работ: Куденко Юрий Григорьевич

эл.почта: kudenko@inr.ru

тел. +7-903-6159125

ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

15. Темные пятна на изображениях астрофизических черных дыр

В ближайшем десятилетии детальные наблюдения форм темных пятен на изображениях сверхмассивных черных дыр SgrA* в центре нашей галактики и M87* в центре гигантской эллиптической галактики M87 предоставят уникальную возможность проверки общей теории относительности Эйнштейна и ее различных модификаций в режиме сильного поля. Первые изображения черных дыр SgrA* и M87*, полученные недавно международным проектом “Телескоп для Горизонта Событий”, подтвердили правильность теории гравитации Эйнштейна лишь качественно с небольшой точностью. Реализация международного проекта “Космической Обсерватории Миллиметрон”, предложенного и разработанного российскими учеными, позволит найти правильную теорию гравитации и окажет мощное стимулирующее влияние на развитие отечественных технологий производства электроники, а также методов искусственного интеллекта и обработки больших объемов данных.

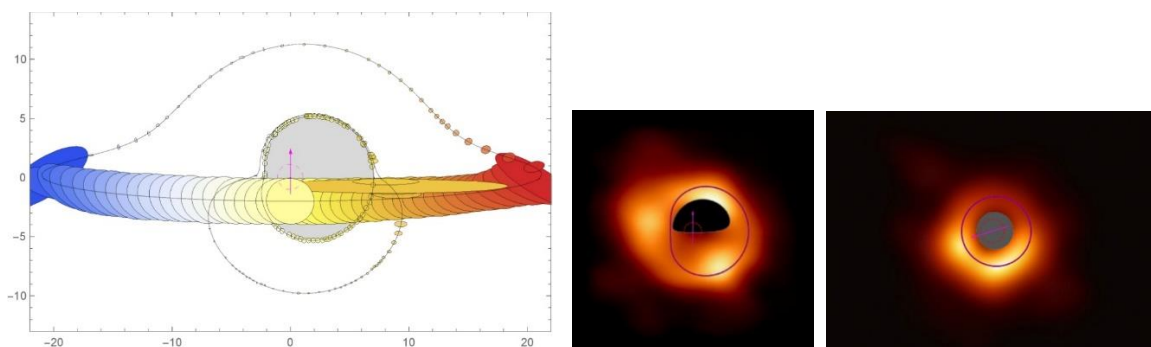


Рисунок. **Левая панель:** Гравитационно линзированные изображения (прямое и два световых эха) звезды на круговой орбите вокруг черной дыры SgrA*. Серая область – тень черной дыры. Пунктирная окружность соответствует размеру горизонта событий черной дыры в пространстве Эвклида без гравитации. **Правая панель:** Модели темных пятен, на

фоне изображений SgrA* (слева) и M87* (справа). Оранжевые кривые - внешние границы теней этих черных дыр.

Публикации:

1. В. И. Докучаев. *Изображения черных дыр, видимые удаленным наблюдателем*. Гравитация и космология **30**, 246–253, 2024. arXiv:2401.01694 [gr-qc].
2. V.I. Dokuchaev, K.E. Prokorev. *Generalized Einstein–Rosen bridge inside black holes*. ЖЭТФ, **165**, 800–806, 2024; arXiv:2312.15870 [gr-qc];

Координатор работ: Докучаев Вячеслав Иванович

тел. +7(906)-045-85-61, эл.почта: dokuchaev@inr.ac.ru

ПНФИ 719. Физика. 1.3.3.3. Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц.

16. Тестирование структуры X(3872) в фоторождении

В последние годы в ряде высокоэнергетических экспериментов (коллаборации Belle, BESIII, LHCb, CMS, ATLAS) было обнаружено существование в природе экзотических адронных состояний (XYZ состояний), проявляющих свойства, выходящие за рамки традиционной кварковой модели (двухкварковые мезоны и трехкварковые барионы). Открытые состояния имеют в своей структуре 4 и 5 валентных кварков и поэтому получили название тетракварки и пентакварки. Среди этих экзотических состояний особое внимание привлекал в последние два десятилетия и привлекает до сих пор X(3872) мезон 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 чармониумподобного состояния, компактного четырехкваркового состояния, молекулярного состояния или смеси чармониумподобного и молекулярного состояний с предполагаемыми вероятностями.

Впервые рассмотрена возможность изучения внутренней структуры X(3872) мезонов в реакциях их фоторождения на ядерных мишенях. В рамках разработанной новой модели было впервые показано, что рассмотренные наблюдаемые (полные и дифференциальные сечения, прозрачности) обладают определенной чувствительностью к предполагаемой структуре X(3872) мезона – важный для ее будущих экспериментальных исследований (в частности, на ускорительном комплексе CEBAF).

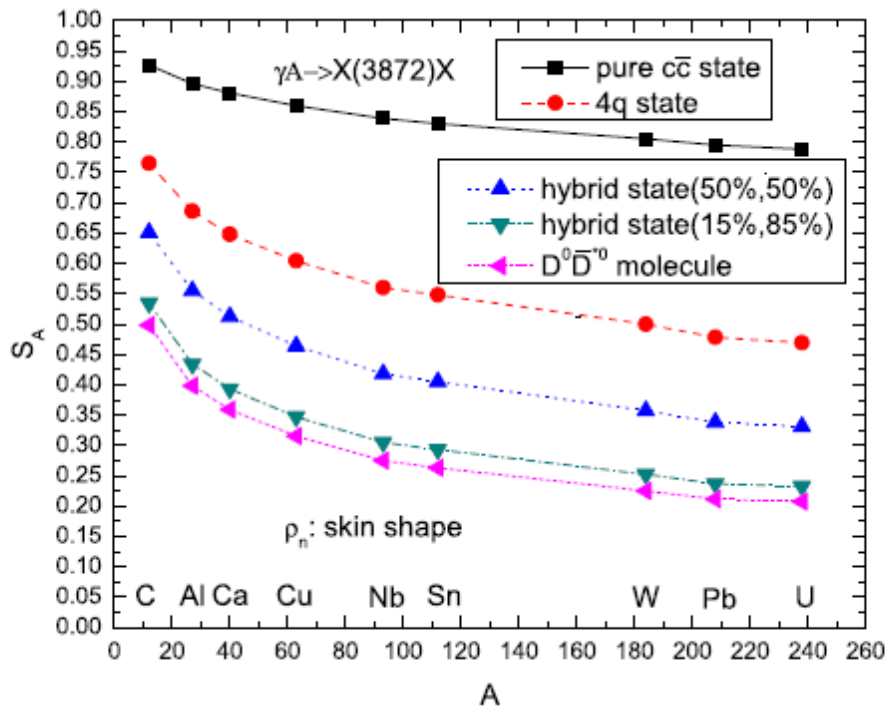


Рисунок 1. Прозрачность ядер S_A для $X(3872)$ мезонов, рожденных в прямых взаимодействиях первичных фотонов с внутриядерными нуклонами, в зависимости от массового числа ядра-мишени в различных предположениях о внутренней структуре этих мезонов (указано на рисунке).

Публикации:

1. Е. Ya. Paryev. Probing the structure of $X(3872)$ in photoproduction. Nucl. Phys. A 1047 (2024) 122876, arXiv: 2405.01089 [hep-ph].

Координатор работ: Парьев Эдуард Яковлевич

эл.почта: paryev@inr.ru

ПНФИ 1.3.3.1. Физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий.

Наиболее значимые результаты, имеющие инновационный потенциал

1. Получение актиния-225 для медицинского применения из металлического тория, облученного протонами средних энергий

Радиофармпрепараты на основе актиния-225 ($T_{1/2} = 9.9$ дн.) и дочернего продукта его распада висмута-213 ($T_{1/2} = 9.9$ дн.) являются чрезвычайно перспективными для эффективной терапии различных онкологических заболеваний. Существующее производство ^{225}Ac в России и мире далеко от растущих потребностей в этом радионуклиде.

На основе проведенных радиоизотопных и радиохимических исследований в ИЯИ РАН в сотрудничестве с другими российскими организациями завершена разработка высокопроизводительной технологии получения актиния-225 из массивной мишени тория-232, облученной протонами с энергией до 160 МэВ на линейном ускорителе ИЯИ РАН.

Мишень из металлического тория в ниобиевой оболочке изготавливают с использованием диффузионной сварки, что обеспечивает хороший контакт основного вещества мишени с оболочкой и эффективное охлаждение водой во время облучения высокоинтенсивным пучком протонов. Химическая переработка облученной мишени включает селективное растворение Nb и Th в смеси кислот HF и HNO₃ разных концентраций, затем – жидкостную экстракцию тория и экстракционную хроматографию с сорбентами DGA, LN и TRU. В результате достигается высокий химический выход 87%, а также приемлемая химическая и радионуклидная чистота продукта 99,8% (за исключением примеси 0.1-0.2% ²²⁷Ac), пригодного для использования при изготовлении радиофармпрепаратов на основе ²²⁵Ac и ²¹³Bi. Разработаны несколько перспективных схем для радионуклидного медицинского генератора ²¹³Bi.

Разработанным методом за одно облучение в течение 10 дн. на ускорителе ИЯИ РАН можно получать до 100 ГБк актиния-225, что сравнимо с годовым производством в мире. В ближайшее время планируется начать регулярное получение актиния-225 с его поставкой в фармацевтические и медицинские учреждения в России и за рубежом.



Рисунок. Мишени из металлического тория в ниобиевой оболочке для получения актиния-225 (слева – до, справа – после облучения на линейном ускорителе ИЯИ РАН)

Публикации:

1. S. V. Ermolaev, A.N. Vasiliev, E. V. Lapshina, A.A. Kobtsev, B. L. Zhuikov. *Production of ²²⁵Ac for medical application from ²³²Th-metallic targets in Nb shells irradiated with middle-energy protons*. New J. Chem., 2024, 48, 8222-8232, DOI: 10.1039/d3nj05778jrsc.li/njc
2. С.В. Ермолаев, А.Н. Васильев, Е.В. Лапшина, Б.Л. Жуйков. *Способ получения актиния-225*. Патент РФ № 2725414, Опубл. 2.07.2020.
3. Б.Л. Жуйков, Н.А. Головин, А.А. Кобцев, Д.А. Чесноков. *Способ изготовления мишени из металлического тория для получения радионуклидов*. Заявка на патент РФ № RU 2024 120 592 A, 18.07.2024.

Координатор работ: Жуйков Борис Леонидович

эл. почта: bz@inr.ru

тел. +7 903 7977871

ПНФИ 1.4.3.9. Физикохимия радионуклидов.

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

ПФНИ: 1.3.3 Ядерная физика и физика элементарных частиц

2. Запуск спектрометра установки BM@N на ускорительном комплексе NICA в ОИЯИ

Первые экспериментальные результаты по исследованию свойств сверхплотной ядерной материи, образующейся в столкновениях ионов ксенона с энергией 3.0 и 3.8 АГэВ с мишенью из йодистого цезия, получены на спектрометре заряженных частиц установки BM@N с фиксированной мишенью, расположенной на выведенном пучке Нуклотрона ускорительного комплекса NICA в ОИЯИ в 2023г. ИЯИ РАН разработал и изготовил для этой установки ряд передних детекторных систем для определения геометрии ядро-ядерных столкновений (прицельного параметра и угла плоскости реакции) и измерения спектров заряженных фрагментов – это передний адронный калориметр, пучковый кварцевый годоскоп и многоканальная сцинтилляционная стенка, рис.1, структура и параметры которых приводятся в публикации.



Рисунок 1. Расположение передних детекторов, разработанных и изготовленных в ИЯИ РАН, на установке BM@N в ОИЯИ.

Публикации

1. Afanasiev (JINR), D. Finogeev (INR RAS), M. Golubeva (INR RAS), F. Guber (INR RAS), A. Ivashkin (INR RAS), A. Izvestnyy (INR RAS), N. Karpushkin (INR RAS), D. Liapin (INR RAS), A. Makhnev (INR RAS), S. Morozov (INR), D. Serebryakov (INR RAS), A. Shabanov (INR RAS), A. Zubankov (INR RAS) et al., The BM@N spectrometer at the NICA accelerator complex, Nucl.Instrum.Meth.A., 2024, Vol. 1065, P. 169532. DOI: 10.1016/j.nima.2024.169532 (publication), e-Print: 2312.17573 [hep-ex] – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.17573>

Координатор работ: Губер Федор Фридрихович

эл.почта: guber@inr.ru

ПНФИ 1.3.3.2. Фундаментальная физика атомного ядра

3. *Позиционно-чувствительный детектор-мишень быстрых и медленных нейтронов для исследования реакций с легкими ядрами*

Для исследования реакций взаимодействия быстрых нейтронов с энергией выше 1 МэВ с легкими ядрами, в частности, с ядром ^{10}B был разработан и изготовлен позиционно-чувствительный детектор нейтронов размерами $50 \times 50 \text{ мм}^2$, представляющий из себя одновременно твердотельную сменную мишень из ^{10}B и проволочную камеру с четырьмя чувствительными газовыми промежутками для измерения частичных и полных потерь вторичных ядер. Это позволяет определить энергию, угол вылета и тип вторичного ядра. Детектор является универсальным прибором и может быть пересобран с заменой мишени и настроен изменением вида газа и давления для изучения реакций на легких ядрах таких как ^6Li , ^9Be , $^{10,11}\text{B}$. Он предназначен для регистрации как тепловых, так и быстрых нейтронов, с ожидаемой эффективностью к быстрым нейтронам $\sim 0.0001 \%$. Детектор является центральным элементом экспериментальной установки, которая также включает спектрометр пар электронов и позитронов. С помощью данной установки на пучках быстрых нейтронов канала РАДЭКС ИЯИ РАН будут определены вклады переходов из возбужденного состояния ядра ^8Be в основное различной мультипольности, при его образовании в реакции $n+^{10}\text{B}$, а также на поиск возможных аномалий при внутриядерном образовании электрон-позитронной пары, находящихся в противоречии с предсказанием стандартной модели.

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

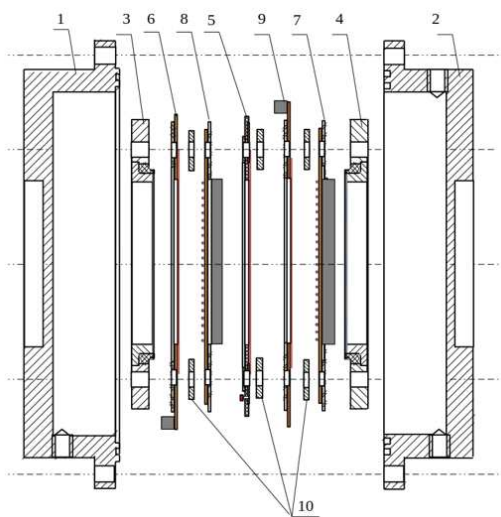


Рис. 1. Устройство детектора: 1 и 2 – крышка и основание корпуса; 3 и 4 – элементы, содержащие слои ^{10}B на кремниевой подложке; 5 – рамка с анодными проволочками; 6 и 7 – Al_2O_3 -рамки с проволочками катодов X_1 и Y_2 ; 8 и 9 – рамки с проволочками сеток Y_1 и X_2 ; 10 – прокладочные шайбы.

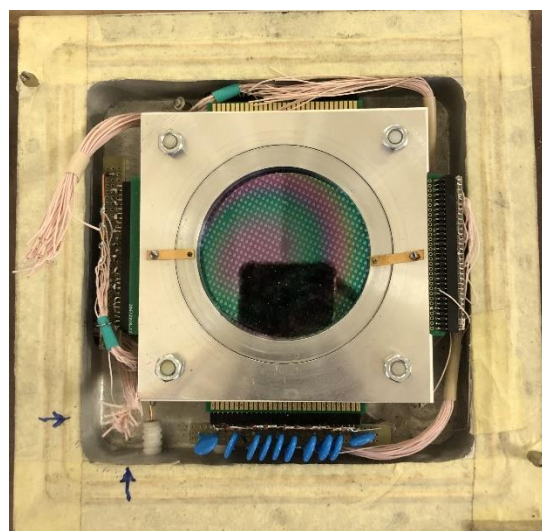


Рис. 2. Сборка детектора, помещенного в основание герметичного корпуса перед закрытием и наполнением детектора рабочим газом.

Публикация:

1. S.I. Potashev, A.A. Afonin, Yu.M. Burmistrov, A.I. Drachev, A.A. Kasparov, S.Kh. Karaevsky, I.V. Meshkov, V.N. Ponomarev, V.I. Razin. Multiwire position-sensitive neutron detector with two layers of boron-10 // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2024. V. 18. No. 4. P. 908-912. DOI: 10.1134/S1027451024700630.
2. S.I. Potashev, I.V. Meshkov, A.A. Afonin, Yu.M. Burmistrov, A.I. Drachev, S.Kh. Karaevsky, A.A. Kasparov, V.N. Ponomarev, V.I. Razin. A study of reactions with light nuclei using a position sensitive fast neutron detector // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2024. V. 51. No. 9. P. 334-338. DOI: 10.3103/S1068335624600657.

Координатор работ: Каспаров Александр Александрович

Телефон: +7(916)979-07-05

e-mail: kasparov200191@gmail.com

Директор ИЯИ РАН,
член-корреспондент РАН

Либанов М.В.



Протокол заседания Ученого совета ИЯИ РАН от «12» декабря 2024 г. № 9