

1. В эксперименте BEST на высоком уровне достоверности подтверждена галлиевая аномалия.

В лаборатории Галлий-германиевого нейтринного телескопа Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН выполнен эксперимент BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions). В эксперименте получены результаты измерения скорости захвата нейтрино в двух концентрических галлиевых мишенях на двух расстояниях от интенсивного нейтринного источника ^{51}Cr . По итогам эксперимента подготовлена статья для публикации в журнале Physical Review Letters.

С 05 июля по 13 октября 2019 года было выполнено 10 облучений двух зонной галлиевой мишени источником электронных нейтрино ^{51}Cr интенсивностью 3.414 ± 0.008 МКи. Источник устанавливался в центре мишеней, средняя длительность каждого облучения составляла около 9.2 д. По окончании каждого облучения проводилось раздельное извлечение из каждой мишени и счет атомов ^{71}Ge , образовавшихся в реакции $^{71}\text{Ga}(\nu e, e^{-})^{71}\text{Ge}$. Результаты измерений в двух галлиевых мишенях оказались очень близкими, но на 20-24% ниже ожидаемых, полученных из теоретического моделирования. Отношение результатов составляет 0.97 ± 0.08 , что в пределах ошибки согласуется с единицей. Полученные результаты в эксперименте BEST не показали разницу в скоростях захвата в зонах на разных расстояниях от источника.

Из результатов эксперимента BEST получены ограничения на параметры осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях (Рис.1).

Результаты согласуются с гипотезой осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния с относительно большой разностью квадратов масс $\Delta m^2 (>0.5 \text{ эВ}^2)$ и углом смешивания $\sin^2 2\theta (\sim 0.4)$. Полученный дефицит нейтрино в зонах, подтверждает и усиливает «галлиевую аномалию», наблюдаемую ранее в четырех галлиевых экспериментах с источниками. Средневзвешенный результат всех галлиевых экспериментов с источниками, включая результаты BEST, составляет 0.80 ± 0.05 , что на 4 σ меньше единицы.

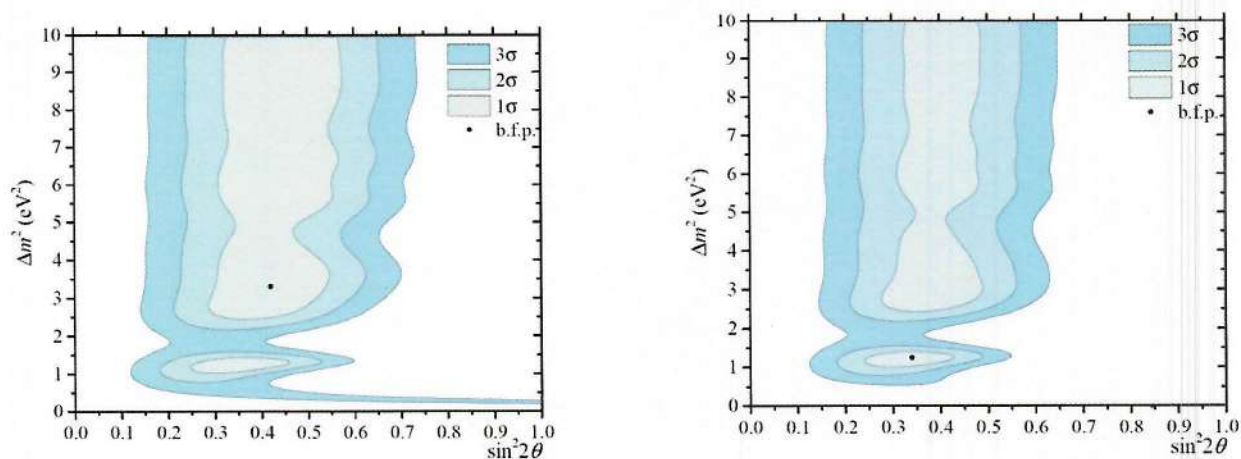


Рис.1. Разрешенные области для двух результатов BEST (слева), b.f.p. - $\sin^2 2\theta = 0.42$, $\Delta m^2 = 3.3 \text{ эВ}^2$; разрешенные области для двух результатов BEST, двух результатов GALLEX, и двух результатов SAGE, b.f.p. - $\sin^2 2\theta = 0.34$, $\Delta m^2 = 1.25 \text{ эВ}^2$ (справа).

Публикации:

V. Gavrin, T. Ibragimova, J. Kozlova, V. Tarasov, E. Veretenkin, and A. Zvir, Measurement of neutrino source activity in the experiment BEST by calorimetric method, Journal of Instrumentation 16 (04), P04012.

V.V. Barinov, B.T. Cleveland, S.N. Danshin, et al. Results from the Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST). arXiv:2109.11482v1 [nucl-ex]

Координатор работ: Гаврин Владимир Николаевич

Тел: +7 (903) 7292764

Эл. почта: gavrin@inr.ru

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

2. Наблюдение фотонов с энергией выше 300 ТэВ, связанных с высокоэнергетическим нейтрино из области Лебеда

Галактические центры ускорения космических лучей до энергий порядка 10^{15} эВ и выше, получившие название ПэВатроны, были обнаружены по их гамма-излучению с энергиями выше 100 ТэВ. Однако совместная генерация гамма-лучей и нейтрино, которая однозначно указывает на взаимодействие космических лучей с окружающей материей и излучением, до сих пор не наблюдалась. В ноябре 2020 года нейтринная обсерватория IceCube о нейтринном событии с энергией ~ 150 ТэВ из области одного из многообещающих Галактических ПэВатронов, Кокона Лебеда. В данной работе мы сообщаем о наблюдении на установке “Ковер-2” избытка атмосферных ливней с уровнем достоверности 3σ с того же направления. Распределение ливневых событий во времени, и время прихода нейтринного события приведены на рисунке 1. Данное событие может быть интерпретировано как возможная вспышка длительностью несколько месяцев, сопровождающаяся фотонами с энергиями выше 300 ТэВ, совпадающими по времени

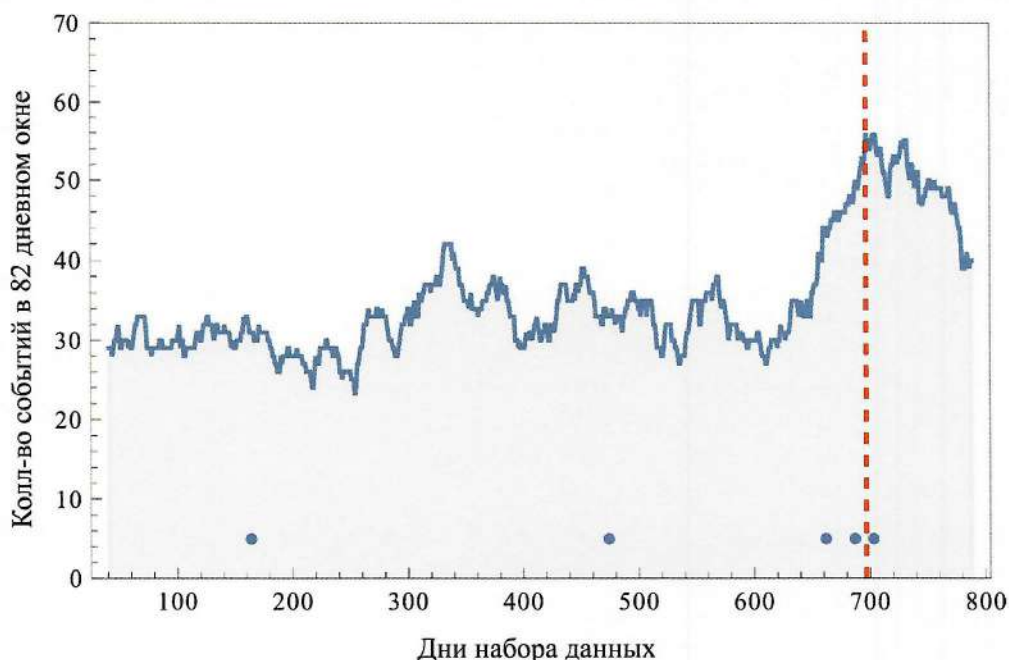


Рисунок 1. Количество событий в интервале $d = 82$ дней с центром в данный день сбора данных. Синие точки указывают дни регистрации ливней – кандидатов в фотонные события сверхвысокой энергии. Красной вертикальной пунктирной линией указано время прихода нейтрино.

прихода с нейтринным событием. Плотность потока энергии гамма-вспышки того же порядка, как и для нейтрино, если предположить стандартный механизм образования нейтрино. Полученный экспериментальный результат является первым свидетельством совместного образования нейтрино высоких энергий и гамма-лучей в Галактическом источнике.

Публикации:

1. D.D. Dzhabpuev, Yu.Z. Afashokov, I.M. Dzaparova, T.A. Dzhatdov, E.A. Gorbacheva, I.S. Karpikov, M.M. Khadzhiev, N.F. Klimenko, A.U. Kudzhaev, A.N. Kurenaya, A.S. Lidvansky, O.I. Mikhailova, V.B. Petkov, E.I. Podlesnyi, V.S. Romanenko, G.I. Rubtsov, S.V. Troitsky, I.B. Unatlov, I.A. Vaiman, A.F. Yanin, Ya.V. Zhezher, K.V. Zhuravleva. *Observation of photons above 300 TeV associated with a high-energy neutrino from the Cygnus Cocoon region*. *ApJL* 916, L22, 2021. arXiv:2105.07242

Координатор работ: Джаппуев Дахир Даниялович

эл.почта: dzhabpuev@mail.ru

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

3. Первые кандидаты на события от астрофизических нейтрино высоких энергий на глубоководном нейтринном телескопе Baikal-GVD

В начале марта 2021 года в ходе визита Министра науки и высшего образования РФ В.Н.Фалькова состоялся официальный ввод в эксплуатацию Байкальского глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD в составе 8-ми кластеров глубоководных гирлянд регистрирующей и управляющей аппаратуры (2304 оптических модулей). Эффективный объем детектора в задаче регистрации событий от нейтрино высоких энергий (свыше 100 ТэВ) достиг в этом году значения близкого к 0.4 куб.км и он является крупнейшим нейтринным телескопом Северного полушария. При анализе данных, полученных при работе детектора в конфигурациях 2018, 2019 и 2020 годов были выделены первые 10 кандидатов на события, инициированные нейтрино высоких энергий астрофизической природы. Детектор Baikal-GVD включен в международные системы многоканальных оповещений, с целью поиска и последующего изучения транзиентных астрофизических источников методами многоволновой и многоканальной астрономии. Выполнен анализ данных и опубликованы первые результаты поиска событий от нейтрино на детекторе Baikal-GVD, ассоциированных с оповещением антарктического детектора IceCube. (ИЯИ РАН, ОИЯИ, Коллаборация Baikal-GVD).

Публикации:

1. Zh-A.M.Dzhilkibaev for Collaboration Baikal-GVD. Baikal-GVD: Status and Perspectives, *PoS(2021)002*; doi: 10.22323/1.395.002.,

2. А.В.Аврутин и др.Глубоководный черенковский детектор в озере Байкал, ЖЭТФ (принято в печать), 2021.

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

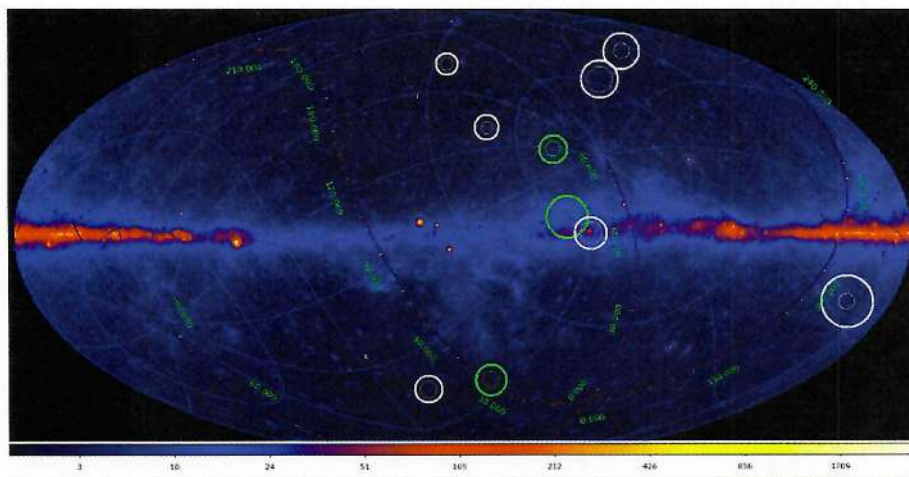


Рис.1. Положение гамма-источников и первых десяти кандидатов на астрофизические нейтринные события Baikal-GVD на небесной сфере. Координатная сетка на рисунке соответствует экваториальной системе координат. Внутренняя и внешняя окружности вокруг событий соответствуют вероятности регистрации 50% и 90%.

Координатор: Домогацкий Григорий Владимирович

тел.: 8(499)783-92-98, 8(499)135-65-85, 8(903)629-32-70

эл. почта: domogats@yandex.ru

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

4. Открытие ПэВатронов в нашей Галактике

Международный высокогорный эксперимент LHAASO (Large High Altitude Air Shower Observatory), создание которого продолжается в КНР, при участии ИЯИ РАН, начал получать научную информацию в конце 2019 г. К середине 2020 г. уже был получен важнейший результат – открытие ПэВатронов в нашей Галактике, т. е. астрономических источников, излучающих гамма-кванты с энергиями выше 1 ПэВ. Этот результат был опубликован в 2021 г. в журнале Nature [1]. Ко времени публикации статьи было обнаружено 12 новых гамма-источников в области энергий выше 100 ТэВ (см. Табл. 1 из работы [1]). Максимальная зарегистрированная энергия гамма-ливней, ко времени написания статьи, составляет 1.42 ПэВ от источника LHAASO J2032+4102, расположенного в Коконе созвездия Лебедь.

Table 1 | UHE γ -ray sources

| Source name | RA (°) | dec. (°) | Significance above 100 TeV ($\times\sigma$) | E_{\max} (PeV) | Flux at 100 TeV (CU) |
|-------------------|--------|----------|---|-----------------------|----------------------|
| LHAASO J0534+2202 | 83.55 | 22.05 | 17.8 | 0.88 ± 0.11 | 1.00(0.14) |
| LHAASO J1825-1326 | 276.45 | -13.45 | 16.4 | 0.42 ± 0.16 | 3.57(0.52) |
| LHAASO J1839-0545 | 279.95 | -5.75 | 7.7 | 0.21 ± 0.05 | 0.70(0.18) |
| LHAASO J1843-0338 | 280.75 | -3.65 | 8.5 | $0.26 - 0.10^{+0.16}$ | 0.73(0.17) |
| LHAASO J1849-0003 | 282.35 | -0.05 | 10.4 | 0.35 ± 0.07 | 0.74(0.15) |
| LHAASO J1908+0621 | 287.05 | 6.35 | 17.2 | 0.44 ± 0.05 | 1.36(0.18) |
| LHAASO J1929+1745 | 292.25 | 17.75 | 7.4 | $0.71 - 0.07^{+0.16}$ | 0.38(0.09) |
| LHAASO J1956+2845 | 299.05 | 28.75 | 7.4 | 0.42 ± 0.03 | 0.41(0.09) |
| LHAASO J2018+3651 | 304.75 | 36.85 | 10.4 | 0.27 ± 0.02 | 0.50(0.10) |
| LHAASO J2032+4102 | 308.05 | 41.05 | 10.5 | 1.42 ± 0.13 | 0.54(0.10) |
| LHAASO J2108+5157 | 317.15 | 51.95 | 8.3 | 0.43 ± 0.05 | 0.38(0.09) |
| LHAASO J2226+6057 | 336.75 | 60.95 | 13.6 | 0.57 ± 0.19 | 1.05(0.16) |

Celestial coordinates (RA, dec.); statistical significance of detection above 100 TeV (calculated using a point-like template for the Crab Nebula and LHAASO J2108+5157 and 0.3° extension templates for the other sources); the corresponding differential photon fluxes at 100 TeV; and detected highest photon energies. Errors are estimated as the boundary values of the area that contains $\pm 34.14\%$ of events with respect to the most probable value of the event distribution. In most cases, the distribution is a Gaussian and the error is 1 σ .

Кроме того, в 2021 г. был измерен [3] с высокой точностью энергетический спектр гамма-квантов, вплоть до энергий в ПэВной области, от хорошо известного источника (пульсара) в Крабовидной туманности. Полученный спектр, а также статистическая значимость результата показаны на рисунках 1 и 2. Как следует из рис. 2, статистическая значимость наблюдения этого источника, при работе только $\frac{1}{2}$ установки, уже составляет 46.4σ для энергий от 40 до 400 ТэВ и 6.6σ для энергий выше 400 ЕэВ. При измерениях при более низких энергиях с помощью водно-черенковского детектора WCDA [2] этот источник виден со значимостью 77σ . Из рис. 1 следует, что в этом источнике, как и в ряде других, работает не только лептонный механизм ускорения с образованием гамма-квантов при обратном комптоновском рассеянии ускоренных электронов на фотонах, но и адронный, с образованием гамма-квантов через распады нейтральных пионов. Это означает, что эти же объекты должны ускорять и космические лучи, протоны и более тяжелые ядра, по крайней мере до энергий $\sim 10\text{-}20$ ПэВ.

Полученные выдающиеся результаты, опубликованные в ведущих физических журналах, открывают новый этап развития не только гамма-астрономии сверхвысоких энергий, но и физики космических лучей, поскольку теперь с величайшей точностью (0.05 градуса) известны направления на источники космических лучей. В ближайшие несколько лет следует ожидать прорыва в разработке теории ускорения космических лучей и понимания их природы.

Группа из Института ядерных исследований РАН, под руководством д.ф.-м.н. Стенькина Ю.В., участвует в этом эксперименте.

Список соавторов от ИЯИ РАН:

Кулешов Д.А., Лёвочкин К.Р., Рулев В.В., Стенькин Ю.В., Степанов В.И., Щеголев О.Б.

Публикации:

1. The LHAASO collaboration. Detection of Ultra-high Energy Photons up to 1.4 PeV from 12 Gamma-ray Sources. *Nature* 594, 33–36 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03498-z>
2. The LHAASO Collaboration. PeV gamma-ray emission from the Crab Nebula. *Science*: 373, Issue 6553, pp. 425-430 (2021). DOI: 10.1126/science.abg5137.
3. The LHAASO Collaborations. Performance of LHAASO-WCDA and observation of the Crab Nebula as a standard candle. *China Phys. C* **45** (2021) 8, 085002. DOI: 10.1088/1674-1137/ac041b

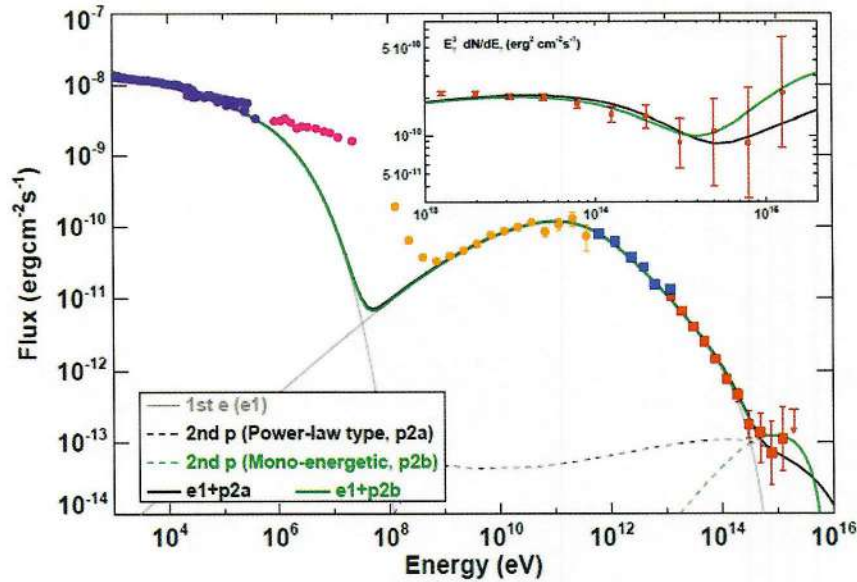


Figure S5: A two-zone scenario with the the main (electron) and second (proton) relativistic particle populations. The first electron component (e1) is the same as the one in Fig. S4. The dashed black and green curves represent the π^0 -decay γ -ray flux calculated for (a) the proton spectrum of the form $E_p^{-2} \exp(-E_p/30 \text{ PeV})$ with the total energy $W_p = 3 \times 10^{47} \text{ erg}$ (p2a) and (b) monoenergetic 10 PeV protons with $W_p = 5 \times 10^{46} \text{ erg}$ (p2b.) respectively. The thick solid black curve represents the sum of e1 and p2a, while the solid thick green curve represents the sum of e1 and p2b, respectively.

Рис. 1. Измеренный установкой KM2A (1 км² установка из электронных и мюонных детекторов), являющейся частью LHAASO, спектр гамма-квантов от «Краба» в сравнении с результатами других экспериментов [3].

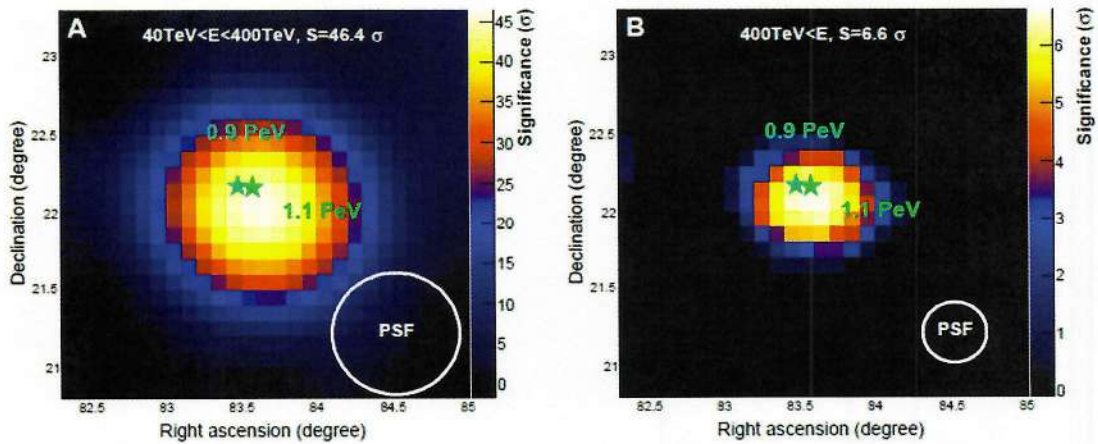


Figure S1: Significance maps of Crab Nebula. The map is centered on the Crab Nebula at energy 40–400 TeV (panel A) and $> 400 \text{ TeV}$ (panel B). The circles indicate the PSF of KM2A. The color scale represents the significance. S is the maximum value in the map. The stars mark the direction of the 0.9 PeV and 1.1 PeV events.

.Рис. 2. Наблюдение установкой KM2A источника в Крабовидной туманности при энергиях выше 25 ТэВ [3].

Координатор: Стенькин Юрий Васильевич

тел.: 8(499)284-34-58

эл. почта: yuri.stenkin@rambler.ru

5. Исследование кэвных стерильных нейтрино как кандидатов на тёмную материю на установке «Троицк ню-масс».

На основе результатов измерений по захвату электронов в ядрах Ве-7, опубликованных в работе [1], получены лучшие ограничения на примесь тяжелого стерильного нейтрино в процессе с испусканием стандартного электронного нейтрино. Распад Ве-7 является двухчастичным с рождением нейтрино и ядра отдачи Li-7. В случае распада с образованием тяжелого нейтрино с массой в несколько десятков кэВ спектр ядер отдачи будет искажен.

Анализируя спектры с учетом имеющихся статистических ошибок, были получены верхние оценки на возможную примесь стерильных нейтрино в интервале масс от 300 до 750 кэВ.

Результаты обработки были опубликованы в Журнале JETP Letters [2]. Полученные пределы на один-два порядка лучше существующих пределов в этом диапазоне масс.

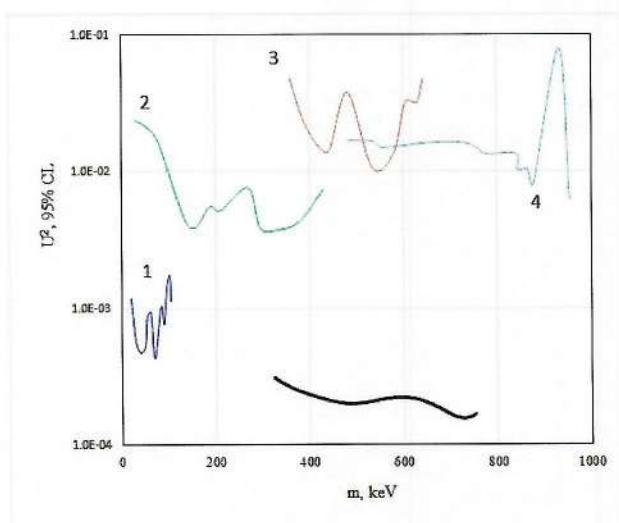


Рис.1 Верхние пределы (черная толстая кривая) на 95% уровне достоверности на вероятность смешивание стерильного и электронного нейтрино в зависимости от массы стерильного нейтрино [2].

[1] S.Fretwell, et al., *Phys. Rev. Lett.* 125, no.3, 032701 (2020).

[2] N.A. Likhovid and V.S. Pantuev “Search for a heavy neutrino in the mass range under 750 keV using electron capture in ^7Be ”. *JETP Lett.* 114 (2021) 1, 8-10, *Pisma Zh.Eksp.Teor.Fiz.* 114 (2021) 1, 4-5.

Координатор: Пантуев Владислав Сергеевич

Тел. +7 (965) 219 78 54

e-mail: pantuev@inr.ru

ПФНИ: 1.3.3. «Ядерная физика и физика элементарных частиц»

6. Биологические эффекты отсутствия естественного радиационного фона, изученные молекулярно-генетическими методами, в модельном организме *D. melanogaster*.

Естественный радиационный фон является постоянным многокомпонентным фактором окружающей среды, который способен влиять на биологические организмы, однако на данный момент эффекты, связанные с его подавлением, по-прежнему остаются неясными. Эта область биофизических исследований активно развивается в ряде исследовательских центров (LNGS, CNRS Modane, SNOLAB и др.) и стремится объяснить механизмы возникновения биологических ответов на хронические фоновые количества радиации.

Целью нашей работы было впервые изучить реакцию модельного организма *D. melanogaster* (плодовая мушка) на условия практически полного отсутствия радиационного фона в Низкофоновой лаборатории глубокого залегания НЛГЗ-4900 БНО ИЯИ РАН. Для регистрации биологических ответов мы использовали транскриптомный метод (RNA-seq), что позволяло получить полную картину изменений в регуляции работы всех генов модельного организма и дать развернутый ответ на вопрос о влиянии пониженного радиационного фона на жизнедеятельность организмов.

Мы обнаружили, что у плодовых мушек после двухнедельного эксперимента в камерах низкофоновой лаборатории активировались нейрорегуляция ответов на внешние стимулы и иммунный ответ, а первичные метаболические процессы замедлились по сравнению с контрольными группами, расположенными в лаборатории на поверхности. Сравнительный анализ наших данных с ответами *D. melanogaster*, изученных ранее таким же методом, после воздействия низких и высоких доз ионизирующих излучений, не выявил в них общих тенденций (см. рис. 1), также ответ был неспецифичен и к целому ряду возможных стресс-факторов окружающей среды НЛГЗ-4900 (гипоксия и т.д.). Мы предположили, что наблюдаемые изменения в экспрессии генов могут быть объяснены, в частности, хроническим недостатком естественных стимулов, которые необходимы для полноценного развития модельного организма. Подводя итог, данная работа расширяет спектр междисциплинарных исследований Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, которая является уникальной базой для биологических исследований.

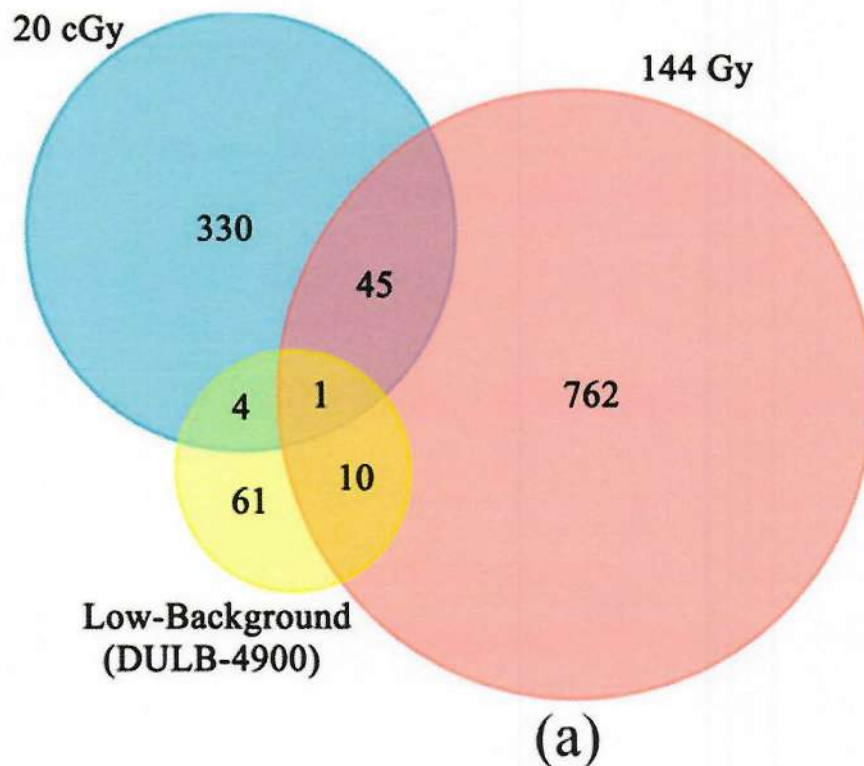


Рис. 1. Диаграмма, представляющая количество общих генов, которые продемонстрировали изменение уровня экспрессии для *D. melanogaster*, выросших в условиях низкого

радиационного фона в НЛГЗ-4900 (DULB-4900) и ПОСЛЕ воздействием облучения с низкой (20 CGE), высокой (144 ГР) доз ионизирующих излучений (а)

Результат получен совместно с ОИЯИ (М.П. Зарубин, Е.В. Кравченко)

Публикация:

Zarubin M, Gangapshv A, Gavriljuk Y, Kazalov V, Kravchenko E, "First transcriptome profiling of *D. melanogaster* after development in a deep underground low radiation background laboratory". PLoS ONE 16(8):e0255066. <https://doi.org/10.1371/journal.Pone.0255066>

Координатор: Гангапшев Альберт Мусаевич,

тел.: 8 (86638) 75-206,

E-mail: gangapsh@list.ru

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

7. Аномальная высокотемпературная сверхпроводимость в YN_6 .

Новый класс сверхпроводников на основе поли- гидридов металлов стабильных при высоких давлениях был экспериментально обнаружен в 2015 году (SH_3 , $T_C \sim 203$ К) и представляет собой новый быстрорастущий класс высокотемпературных сверхпроводников, как полагают, со стандартным фонным механизмом спаривания. Новый высокотемпературный сверхпроводник - гексагидрид иттрия YN_6 со структурой I_{m3m} был синтезирован при высоком давлении методом лазерного нагрева в алмазных наковальнях. Температура сверхпроводящего перехода равна $T_C \approx 224$ К при давлении $P \sim 166$ ГПа. Экстраполированное верхнее критическое магнитное поле $B_{c2}(0)$ в YN_6 на удивление очень высокое: 116–158 Тл, что в 2–2.5 раза больше расчетных оценок. Выраженный изотопный сдвиг T_C в дейтериде иттрия YD_6 с изотопным коэффициентом 0.4 подтверждает фонную модель сверхпроводимости. Теоретические расчёты по модели функционала сверхпроводящей плотности (SCDFT), и ангармонические расчеты, вместе с аномально высоким критическим магнитным полем предполагают заметное отклонения сверхпроводящих свойств от обычных моделей Мигдала–Элиашберга и Бардина – Купера – Шриффера и предполагают наличие дополнительного механизма сверхпроводимости [1].

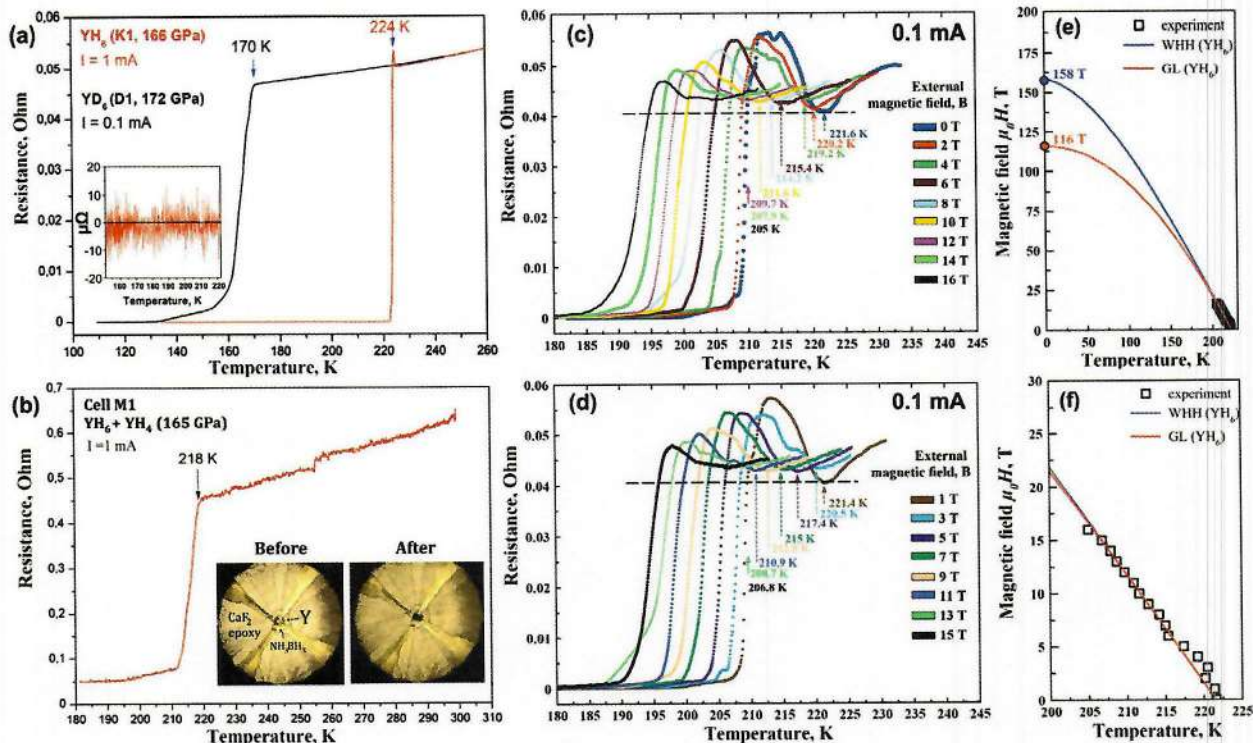


Рис. 1. Сверхпроводящие переходы в $Im3m$ - YH_6 : **(a)** температурная зависимость электрического сопротивления $R(T)$ в YH_6 и YD_6 . На вставке: сопротивление падает до нуля после охлаждения ниже T_c ; **(b)** температурная зависимость электрического сопротивления. Наблюдается 9-кратное снижение. На вставке: фото камеры DAC-M1 с образцом Y и электродами до и после лазерного нагрева. **(c, d)** Зависимость электрического сопротивления во внешнем магнитном поле (0–16 Тл) при 183 ГПа и токе 0.1 мА для четного (c) и нечетного (d) значений магнитного поля (выраженного в Тл). Критические температуры определялись в начале скачка сопротивления. **(e)** Верхнее критическое магнитное поле экстраполировалось с использованием теории Вертхамера – Гельфанда – Хоэнберга и теории Гинзбурга – Ландау. **(f)** Зависимость критической температуры T_c (YH_6) от приложенного магнитного поля.

Публикация:

[1] **Ivan A. Troyan**, Dmitrii V. Semenok, Alexander G. Kvashnin, Andrey V. Sadakov, Oleg A. Sobolevskiy, Vladimir M. Pudalov, **Anna G. Ivanova**, Vitali B. Prakapenka, Eran Greenberg, **Alexander G. Gavriliuk**, Igor S. Lyubutin, Viktor V. Struzhkin, Aitor Bergara, Ion Errea, Raffaello Bianco, Matteo Calandra, Francesco Mauri, Lorenzo Monacelli, Ryosuke Akashi, Artem R. Oganov "Anomalous High-Temperature Superconductivity in YH_6 ", *Advanced Materials*, 2006832 (2021).

Коллаборация: ИЯИ РАН, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, ФИАН, СКОЛТЕХ.

Координатор: Троян Иван Александрович,

тел.: +7(915) 051-4493,

E-mail: itrojan@mail.ru

ПФНИ 1.3.2.8. Квантовая макрофизика, Бозе-конденсаты, сверхпроводимость

8. Ограничения эксперимента NA64 на новую физику из поисков невидимых распадов

В рамках эксперимента NA64 произведен поиск нового X -бозона в реакции $eZ \rightarrow eZX$, распадающегося в основном в невидимые моды. Рассмотрены случаи векторного, аксиально-векторного, скалярного и псевдоскалярного типов этой частицы, для которых получены новые ограничения на связь X -бозона с электроном. Из полученных результатов следует, что пределы на возможный вклад X -бозона в аномальный магнитный момент электрона составляют $|\Delta a_e| \leq 10^{-15} - 10^{-13}$ для области масс $m_X < 1$ ГэВ. Эти ограничения NA64 являются существенно более строгими, чем аналогичные пределы, полученные недавно из результатов прецизионных измерений постоянной тонкой структуры в экспериментах, выполненных в лабораториях LKB (Франция) и Berkeley (США).

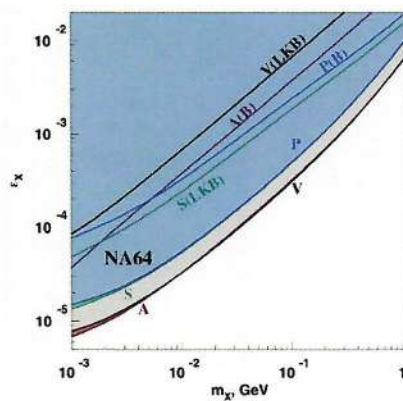


Рисунок 1 – Пределы на д.у. 90% на параметр связи ϵ_X в плоскости (m_X, ϵ_X) , полученные в эксперименте NA64 и представленные в сравнении с результатами экспериментов LKB и Berkely.

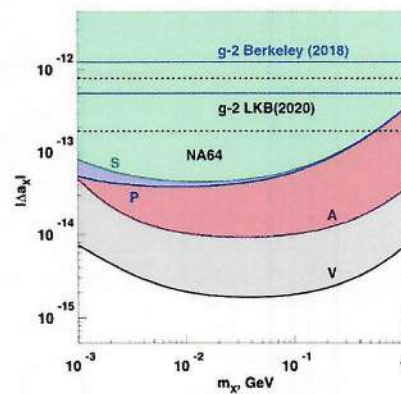


Рисунок 2 – Полученная в эксперименте NA64 область исключения на д.у. 90% в плоскости $(m_X, |\Delta a_e|)$ для S, P, V и A-вкладов в a_e наряду с результатами LKB и Berkely.

Публикация:

Yu.M. Andreev et al. (NA64 Collaboration). Constraints on New Physics in Electron $g-2$ from a Search for Invisible Decays of a Scalar, Pseudoscalar, Vector and Axial Vector // Phys.Rev.Lett. 126, 211802 (2021)

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, ТГПУ, ТПУ, ФИАН (Россия), Университет Лондонского колледжа (Великобритания), Университет Бонна (Германия), Технический университет Мюнхена (Германия), Университет Патраса (Греция), Университет Андреса Белло (Чили), Технический университет (Чили), Институт САФИР Миллениум (Чили), Институт физики частиц и астрофизики (Швейцария), ЦЕРН

Координатор: Гниненко Сергей Николаевич

тел.: 8(495)850-42-50

эл. почта: sergei.gninenko@cern.ch

9. В эксперименте TALE измерен химический состав космических лучей в диапазоне энергий от 2 ПэВ до 2 ЭэВ.

На флуоресцентном телескопе TALE (Telescope Array Low-energy Extension) выполнено измерение состава космических лучей ультравысоких энергий. Используя черенковский свет, испускаемый частицами широкого атмосферного ливня в дополнение к флуоресцентному излучению, в рамках одного эксперимента получен состав космических лучей в рекордно широком диапазоне энергий от 2×10^{15} эВ до 2×10^{18} эВ.

Коллаборация Telescope Array, авторы из ИЯИ РАН О.Е. Калашев, М.Ю. Кузнецов, Б.К. Лубсандоржиев, М.С. Пширков, Г.И. Рубцов, И.И. Ткачев, С.В. Троицкий, Я.В. Жежер.

Публикация:

1. Abbasi et al. [Telescope Array Collaboration], The Cosmic-Ray Composition between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE Detector in Monocular Mode, *Astrophys. J.* 909 (2021) 2, 178

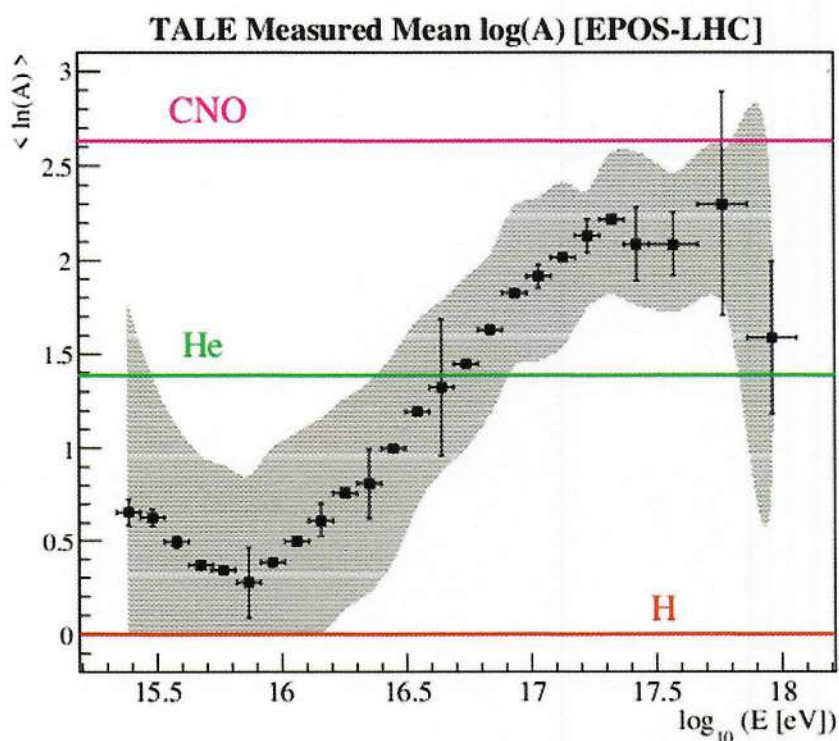


Рис. 1. Средняя атомная масса космических лучей ультравысоких энергий, измеренная в эксперименте TALE.

Координатор: Рубцов Григорий Игоревич

тел. +7(903)755-1732, +7(499)135-0585

эл. почта: grisha@ms2.inr.ac.ru

ПФНИ 1.3.3.4. Физика космических лучей

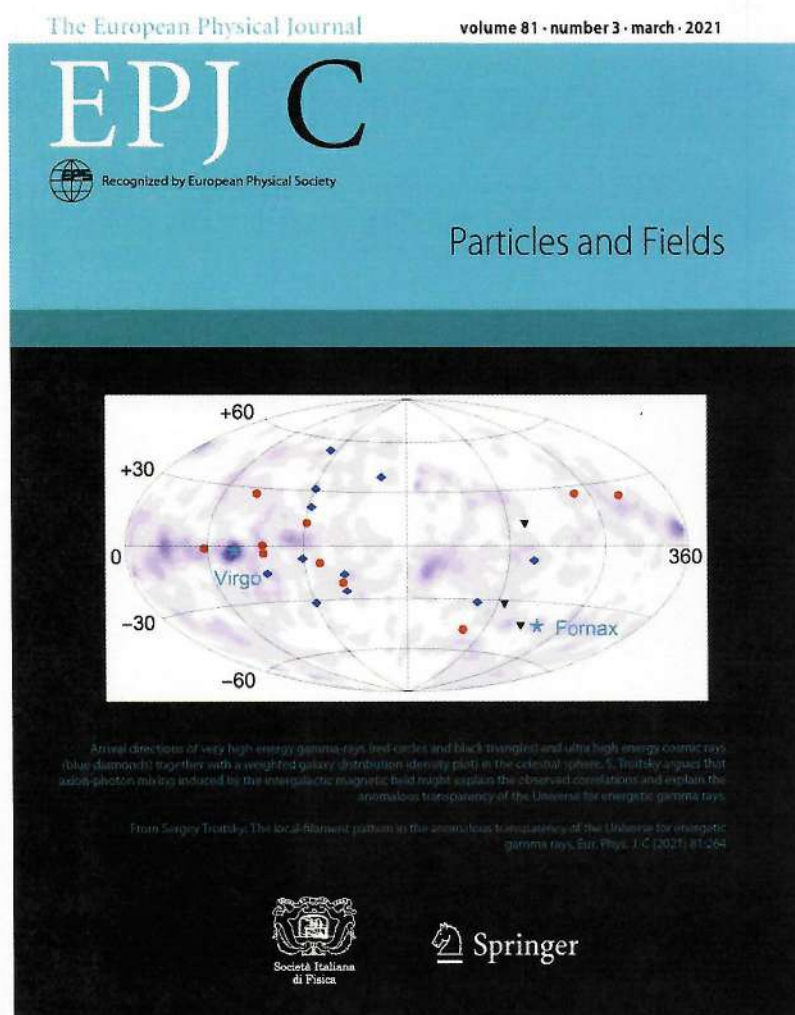
10. Анизотропия аномальной прозрачности Вселенной и ее связь с Местным филаментом.

Обнаружено, что как блазары, демонстрирующие аномально низкое поглощение гамма-излучения с энергиями выше 100 ГэВ, так и лацертиды, коррелирующие с космическими лучами сверхвысоких энергий в данных эксперимента HiRes, распределены по небу не изотропно и одинаково – все они наблюдаются сквозь области повышенной плотности галактик в Местной ветви крупномасштабной структуры Вселенной. Статистическая значимость отличия от изотропии составляет 4.0 стандартных отклонения после учета всех штрафных факторов. Это наблюдение находится в согласии со сценарием смешивания фотонов с аксионоподобной частицей с массой около 1 нэВ и константой связи с фотонами около $10^{(-11)}$ 1/ГэВ.

Публикация:

S.V. Troitsky. “The local-filament pattern in the anomalous transparency of the Universe for energetic gamma rays”. Eur. Phys. J. C, 81 (2021) 3 <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-021-09051-6>

обложка выпуска журнала:



На рисунке: карта неба в сверхгалактических координатах. Красные точки – блазары, особенности в спектрах которых указывают на аномальную прозрачность Вселенной; синие ромбы – лацертиды, коррелирующие с космическими лучами HiRes; черные треугольники – гамма-всплески, зарегистрированные при энергиях выше 100 ГэВ. Все они видны сквозь области повышенной плотности галактик – и повышенного магнитного поля – в Местном сверхскоплении (показано фиолетовой заливкой).

Координатор: Троицкий Сергей Вадимович

тел: 8(499)783-92-91

email: sergey.troitsky@gmail.com

11. Двусторонние ограничения на шкалу энергии нарушения лоренц-инвариантности для фотонов с четвертой дисперсией из наблюдений гамма-лучей в экспериментах Tibet-AS γ и LHAASO.

Были получены новые двусторонние ограничения на шкалу энергии нарушения лоренц-инвариантности для фотонов с четвертой дисперсией из недавних наблюдений гамма-лучей в экспериментах Tibet-AS γ и LHAASO. Ограничения основаны на учете процессов тройного расщепления фотонов (сверхсветовой сценарий) и подавления образования ливней (субсветовой сценарий). Ограничения в субсветовом сценарии имеют большую точность, чем полученные из анализа процесса производства пар внегалактическими фотонами на инфракрасном фоне, и являются самыми сильными в литературе.

P. Satunin. "Two-sided constraints on Lorentz invariance violation from Tibet-AS γ and LHAASO very-high-energy photon observations". *Eur.Phys.J.C* 81 (2021) 750 arXiv: [2106.06393](https://arxiv.org/abs/2106.06393)

Подробнее можно прочитать в научно-популярной статье в Коммерсанте: <https://www.kommersant.ru/doc/>

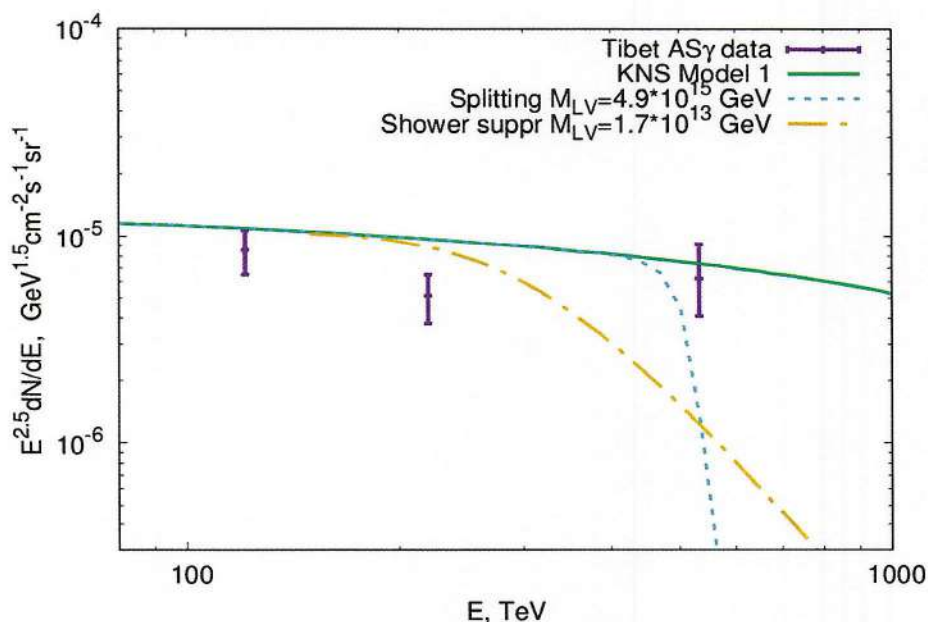
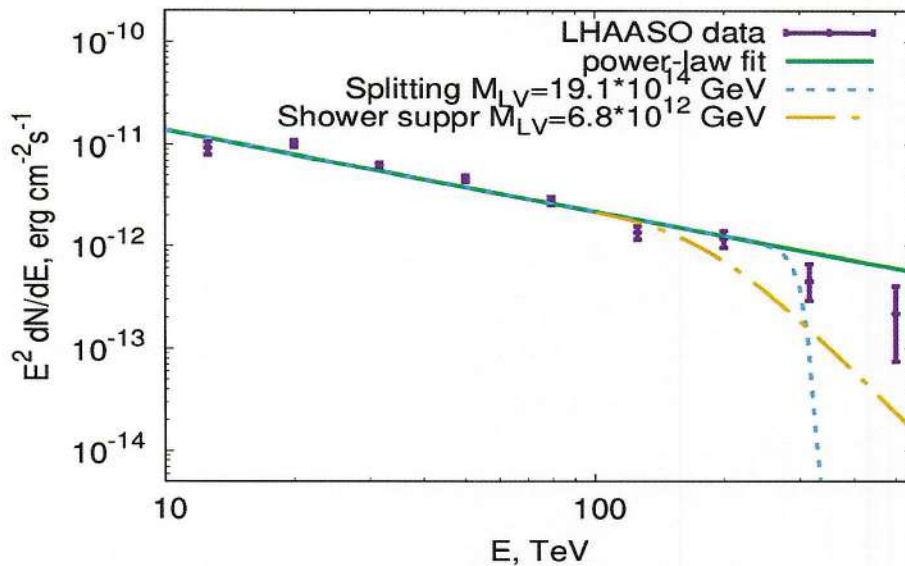


Рис1. Спектр диффузного излучения галактической плоскости в энергетическом диапазоне выше 100 ТэВ. Точки с погрешностями - наблюдательные данные, полученные коллаборацией Tibet-AS γ , зеленая сплошная линия - максимальное теоретическое предсказание для диффузного излучения галактики, полученное Колдобским, Нероновым и Семикозом, пунктирные линии показывают подавление наблюдаемого излучения в сценариях супер- и суб-светового нарушения лоренц-инвариантности для фотонов.



На Рис 2. спектры галактического источника, J1908+0621, измеренного коллаборацией LHAASO. Зеленая сплошная линия для источника показывает аппроксимацию спектра по степенным законам, пунктирные линии, как и в предыдущем пункте -- подавление наблюдаемого излучения в сценариях супер- и суб-светового нарушения лоренц-инвариантности для фотонов.

Координатор: Сатунин Петр Сергеевич

тел: 8(499)783-92-91

email: petr.satunin@gmail.com

ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

12. Разработан совместимый с Geant4 пакет для моделирования темной материи в экспериментах с фиксированной мишенью

Был разработан программный пакет DMG4 для моделирования рождения частиц ТМ (темной материи) в экспериментах с фиксированной мишенью. Наиболее удобный способ (и единственно возможный в экспериментах с фиксированной мишенью) — моделировать процессы рождения ТМ в рамках алгоритмов Монте-Карло. Фреймворк Geant4 был выбран как наиболее популярное и универсальное решение для решения данных задач на сегодняшний день. Разработанный пакет DMG4 позволяет моделировать процессы образования частиц DM в экспериментах с электронным и мюонным пучком на мишени. В пакете можно смоделировать рождение и распад четырех типов переносчиков взаимодействия между частицами стандартной модели и темной материей: векторных, скалярных, псевдоскалярных и аксиально-векторных. Полные сечения процессов тормозного излучения рассчитываются численно на точном древесном уровне. Программный код позволяет моделировать как невидимые распады частиц посредников, так и их видимые распады на e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, 2γ . Предлагаемое расширение реализует собственные программные интерфейсы приложений (API) Geant4, разработанные для этих целей, и может быть легко встроено в существующие приложения для моделирования. В качестве примера использования DMG4 были промоделированы процессы рождения темного фотона и легкой скалярной частицы в эксперименте NA64e с электронным пучком на фиксированной мишени. На рис. 1 представлена блок-схема, иллюстрирующая основные компоненты пакета DMG4.

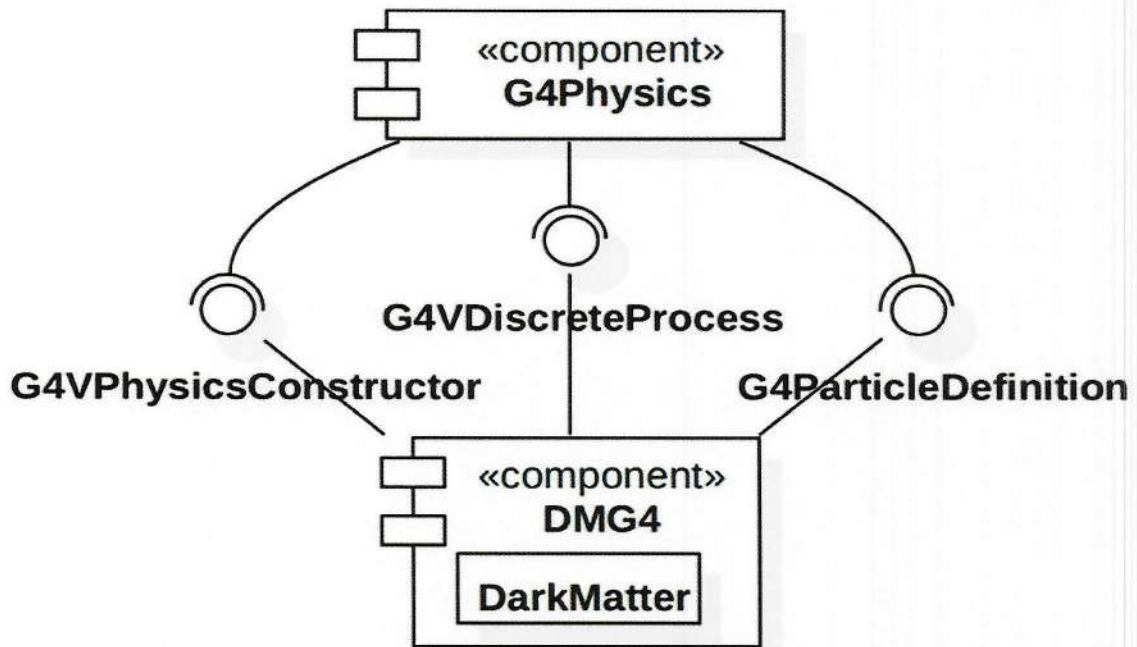


Рис. 1 Блок схема, иллюстрирующая основные компоненты пакета DMG4

Публикация:

M. Bondi, A. Celentano, R. R. Dusaev, D. V. Kirpichnikov, M. M. Kirsanov, N. V. Krasnikov, L. Marsicano and D. Shchukin, "Fully Geant4 compatible package for the simulation of Dark Matter in fixed target experiments," Comput. Phys. Commun. 269, 108129 (2021) arXiv:2101.12192 [hep-ph]

Координатор: Кирсанов Михаил Михайлович

тел: 8(499)783-92-91

email: Mikhail.Kirsanov@cern.ch

ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

13. Выполнен расчет эффективности метода регистрации аксионоподобных частиц в сверхпроводящем цилиндрическом резонаторе

В модели аксионной электродинамики был исследован вопрос об излучении аксионоподобных частиц сверхпроводящим цилиндрическим резонатором с двумя модами накачки. С помощью численного моделирования была рассчитана плотность энергии рождённых аксионоподобных частиц для различных пар электромагнитных мод, значений массы аксионоподобной частицы и конфигураций цилиндрического резонатора, что позволило оценить оптимальные условия для производства аксионоподобных частиц. Кроме того, был рассмотрен вопрос детектирования рождённых аксионоподобных частиц при помощи отдельного резонатора с магнитным полем и были выведены ограничения на константу связи g_{agg} для различных комбинаций мод накачки в зависимости от массы аксионоподобной частицы.

Публикация:

D.Salnikov, P.Satunin, D.Kirpichnikov, M.Fitkevich. "Examining axion-like particles with superconducting radio-frequency cavity". JHEP 03 (2021) 143 [arXiv:2011.12871 [hep-ph]]

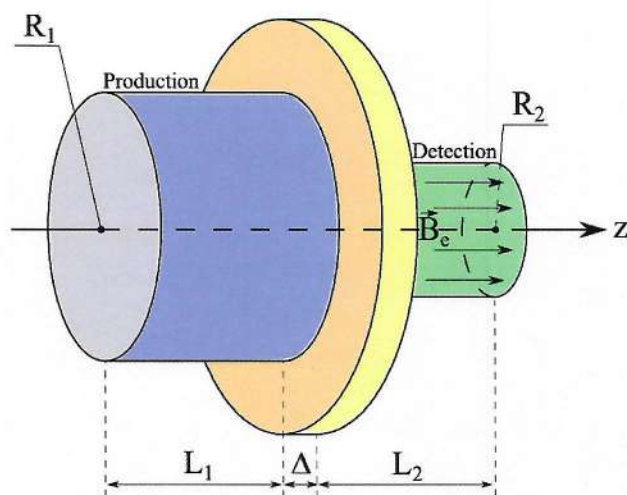


Рис. 3. Схема предлагаемой экспериментальной установки

Координатор: Сатунин Петр Сергеевич

тел: 8(499)783-92-91

email: petr.satunin@gmail.com

ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

14. Скрытая симметрия зануления чисел Лява.

Измерение гравитационных волн от слияния черных дыр с помощью интерферометра «Лайго» положило начало прецизионному исследованию астрофизических компактных объектов. Одним из ключевых параметров таких объектов, который непосредственно определяет форму измеряемого гравитационно-волнового импульса, является число Лява. Число Лява параметризует упругую деформацию небесного тела под влиянием внешнего гравитационного поля. Это фундаментальное свойство тела, которое определяет, насколько сильно оно может быть «сплюснено» или «растянуто» приливными силами. Прямые вычисления в рамках теории относительности показали, что приливные числа Лява для черных дыр равны нулю в четырех измерениях. Таким образом, черные дыры являются наиболее упругими объектами во Вселенной! Причина зануления чисел Лява для черных дыр оставалась загадкой более десяти лет. Эта задача была недавно разрешена в работе под руководством научного сотрудника ИЯИ РАН Иванова М. М., опубликованной в престижном журнале «Physical Review Letters». Было показано, что приливные возмущения черных дыр в теории относительности обладают дополнительной «скрытой» симметрией, названной «симметрия Лява». Данная пространственно-временная симметрия соответствует группе линейных преобразований двумерной плоскости $SL(2, R)$. Авторы статьи доказали, что зануление чисел Лява для черных дыр в четырех измерениях, а также загадочная феноменология чисел Лява в гипотетических пространствах старших размерностей могут быть напрямую выведены из теории представлений группы $SL(2, R)$, что даёт совершенно новый взгляд на динамику

черных дыр в теории гравитации, и открывает новые перспективы их исследования.



(c): Victor de Schwanberg/Science Photo Library

Публикация:

P. Charalambous, S. Dubovsky, M.M. Ivanov, Hidden Symmetry of Vanishing Love Numbers, Phys.Rev.Lett. 127 (2021) 10, 101101.

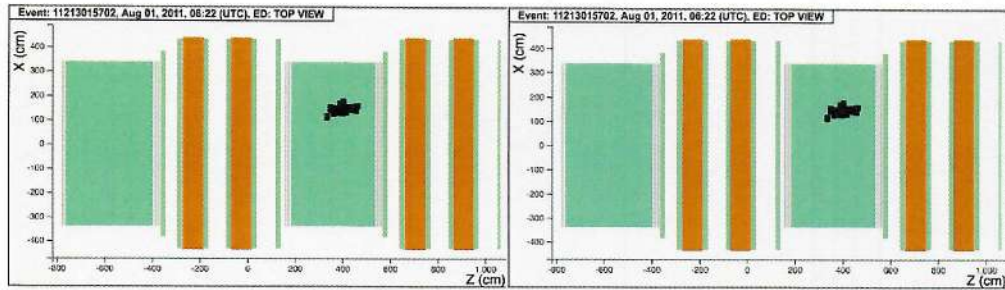
Координатор: Иванов Михаил Михайлович

тел: 8(499)783-92-91

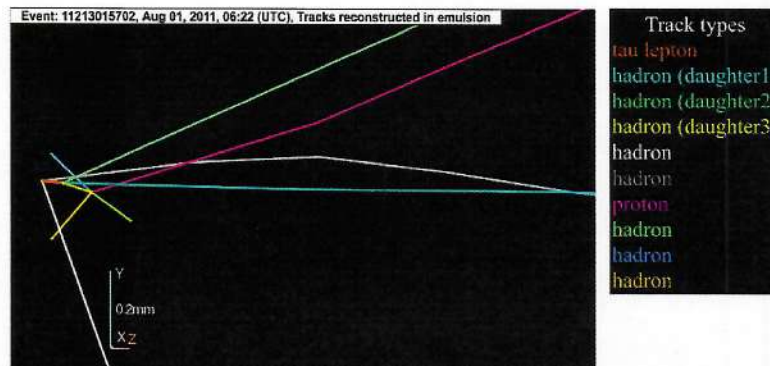
ПФНИ 1.3.3. Ядерная физика и физика элементарных частиц

15. Кандидаты на взаимодействие тау нейтрино в детекторе OPERA

Эксперимент OPERA был разработан для обнаружения появления тау нейтрино (ν_τ) в пучке мюонных нейтрино (ν_μ), вызванного осцилляциями нейтрино. Детектор, расположенный в подземной лаборатории Гран-Сассо, состоял из ядерной фотографической эмульсии и свинцовой мишени массой около 1,25 кт, дополненной электронными детекторами. С 2008 по 2012 год на него воздействовал пучок CNGS: почти чистый пучок ν_μ с базой 730 км, аккумуляровавший в общей сложности 1.8×10^{20} протонов на мишень. Было оценено открытие осцилляций $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ со статистической значимостью $6,1 \sigma$, наблюдая десять кандидатов на взаимодействие ν_τ . Подробное описание кандидатов на взаимодействие тау нейтрино, делает доступными данные для использования всем сообществом.



(a)



(b)

Рис. 1 Событие кандидата в тау-нейтрино 11213015702 (Brick 4838). Взаимодействие нейтрино в 69 произошло 1 августа 2011 г. во втором супермодуле, в 15-й кирпичной стене.

Публикация:

Agafonova, N., Alexandrov, A., Anokhina, A. et al. OPERA tau neutrino charged current interactions. Sci Data 8, 218 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00991-y>

Координатор: Агафонова Наталья Юрьевна

тел.: 8(915)148-76-65

эл. почта: agafonova@inr.ru

ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

16. Впервые измерены спиновые асимметрии в фоторождении π^0 мезонов на квазисвободных нейтронах

Международной коллаборацией A2 на пучке линейно поляризованных фотонов ускорителя МАМИ (Германия) с участием ученых из ИЯИ РАН проведены первые в мире измерения спиновых асимметрий фоторождения π^0 мезонов на квазисвободных нейтронах, связанных в дейтроне, в диапазоне энергий 390-610 МэВ [1]. В экспериментах использовалась детектирующая система, состоящая из калориметров Crystal Ball и TAPS. Вылетающие пионы регистрировались в интервале углов 49-148°. В этой кинематической области поляризационные наблюдаемые чувствительны к вкладам резонансов $\Delta(1232)$ и $N(1440)$. Получено хорошее согласие с теоретическими расчетами в рамках мультипольного анализа (Рис. 1).

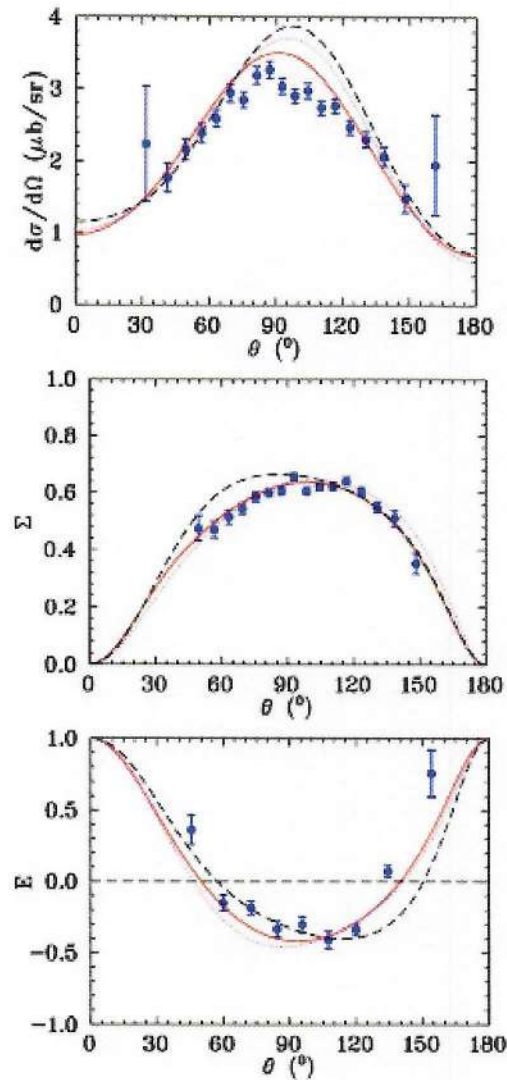


Рис. 1. Дифференциальное сечение $d\sigma/d\Omega$ и спиновые асимметрии Σ и E (точки – эксперимент, кривые – расчет в рамках мультипольного анализа).

Публикация:

1. S.Mullen et al. (A2 collaboration at MAMI). Single π^0 production off neutrons bound in deuteron with linearly polarized photons. Eur. Phys. J. A, 57, 205 (2021).

Коллаборация A2, автор из ИЯИ РАН: Г.М.Гуревич

Координатор: Гуревич Григорий Манович

тел.: 8(499)135-40-43

эл. почта: gurevich@inr.ru

ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

17. Наблюдение новых очарованных пентакварков в эксперименте LHCb

В 2015 г. LHCb коллаборация опубликовала результаты анализа распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^0$, в которых в спектре инвариантной массы $(J/\psi, p)$ пар были обнаружены резонансные структуры $P_c(4380)^+$ и $P_c(4450)^+$, объясненные минимальным набором из пяти кварков $c\bar{c}uud$, это так называемый очарованный пентакварк. Новый результат обработки расширенного набора данных RUN1+RUN2 был представлен недавно [1]. Большая статистика и точность метода позволили подтвердить первое наблюдение дважды очарованного тетракварка, T_{cc}^+ , с составом кварков $c\bar{c}uud$. Два тяжелых кварка одного

аромата делают это состояние экзотичным, проявляющимся в масс-спектре $D^0 D^0 \pi^+$ мезонов с массой $3875 \text{ MeV}/c^2$. Близость к порогу $D^{*+} D^0$ возможно указывает на молекулярное строение связей. Дальнейшее изучение требуется для определения деталей обнаруженной структуры.

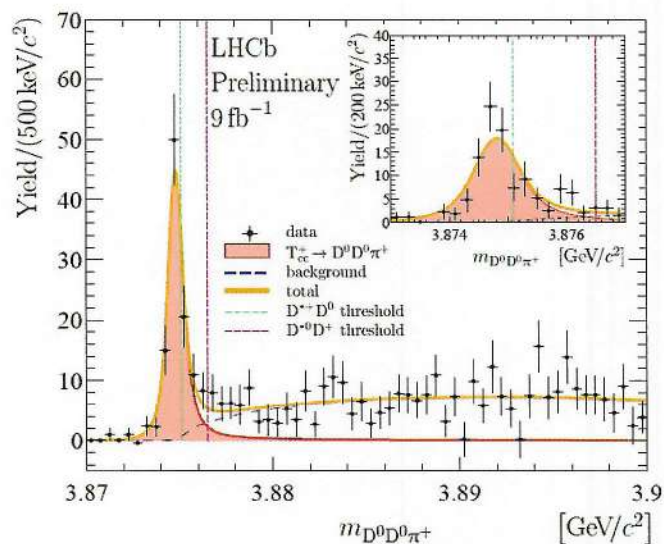
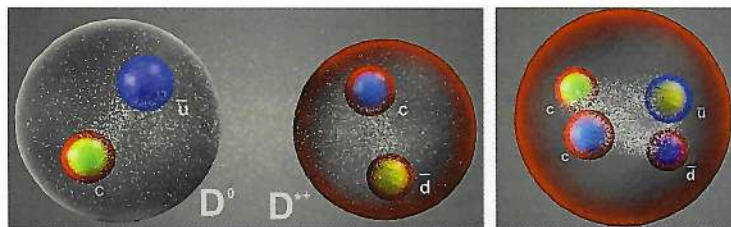


Рисунок. Показаны распределения масс ($D^0 D^0 \pi^+$). Точками показаны экспериментальные данные. В нижнем ряду представлены (цветом) результаты для найденных новых кварковых состояний.



Публикации

By LHCb Collaboration (Roel Aaij, Sergey Filippov, Evgeny Gushchin, et al.). “Observation of an exotic narrow doubly charmed tetraquark”, arXiv:2109.01038.

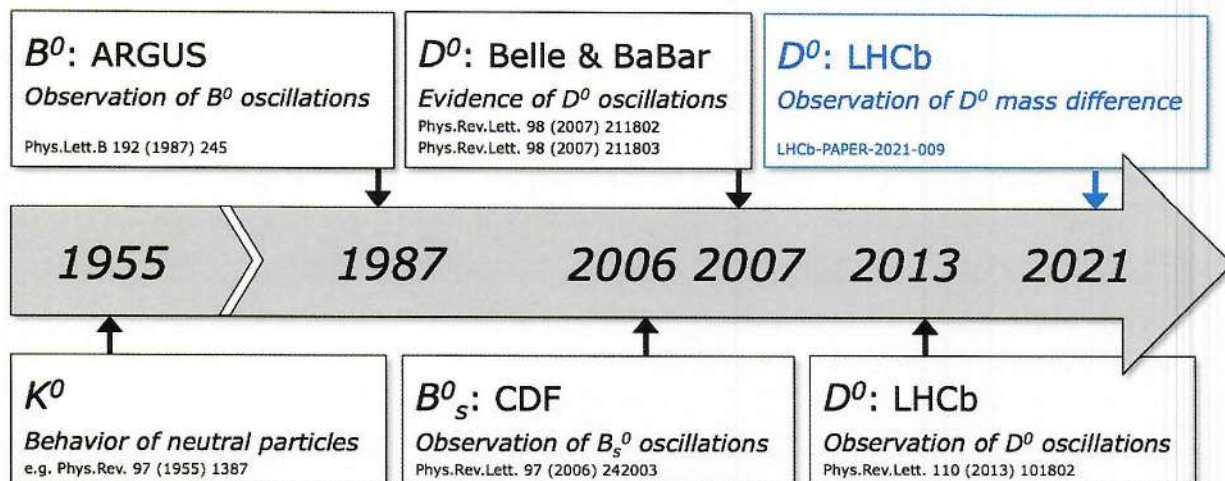
Координатор: Гуцин Евгений Николаевич

эл. почта: guschin@inr.ru

ПФНИ 1.3.3. Ядерная физика и физика элементарных частиц

18. Первое наблюдение разницы масс между нейтральными очарованными мезонами в эксперименте LHCb

В LHCb достигнута беспрецедентная точность изучения осцилляций $D^0 - \bar{D}^0$. Недавно доложен результат [1] о первом в мире наблюдении разницы масс нейтральных очарованных мезонов, которая определяет частоту осцилляций. Опубликованное значение разницы масс $6.4 \times 10^{-6} \text{ eV}$ является наименьшим в мире между частицами, $\sim 1 \times 10^{-38} \text{ g}$.



Публикации

1. By The LHCb Collaboration (Roel Aaij, Sergey Filippov, Evgeny Gushchin, et al.), 'Observation of the mass difference between neutral charm-meson eigenstates', arXiv:2106.03744; Phys. Rev. Lett. 127, 111801 (2021).

Координатор: *Гущин Евгений Николаевич*

эл. почта: guschin@inr.ru

ПФНИ 1.3.3. Ядерная физика и физика элементарных частиц

19. Околопороговое рождение каскадных гиперонов в антикаон-ядерных и фотоядерных реакциях

Впервые показана заметная чувствительность инклюзивных дифференциальных и полных сечений (абсолютных и относительных) рождения каскадных Ξ^- гиперонов на ядрах в антикаон-ядерных и фотоядерных реакциях вблизи порога к возможным вариациям Ξ^- -ядерного потенциала при конечных импульсах <1 ГэВ/с (см. прилагаемые ниже рисунки). На основе этого, впервые сделан важный вывод о возможности экспериментального измерения этих вариаций на ускорительных комплексах J-PARC (Япония) и SEBAF (США). Полученная информация будет способствовать существенному улучшению наших знаний о плохо известных в настоящее время свойствах Ξ^- гиперонов в ядерной среде как при нормальной плотности и малых импульсах (существование гиперядер со странностью $S=-2$), так и в плотной ядерной материи и при конечных импульсах (строение ядра нейтронных звезд, так называемый гиперонный "пазл"), а также и в целом о взаимодействии гиперонов в $S=-2$ секторе.

Публикации:

- 1) E. Ya. Paryev. Medium effects in antikaon-induced Ξ^- hyperon production on nuclei near threshold. Nucl. Phys. A 1013 (2021) 122222 (27 pages).
- 2) E. Ya. Paryev. Momentum dependence of near-threshold photoproduction of Ξ^- hyperons off nuclei and their properties in the nuclear medium. Nucl. Phys. A 1017 (2022) 122352 (22 pages). Available online 8 November 2021.

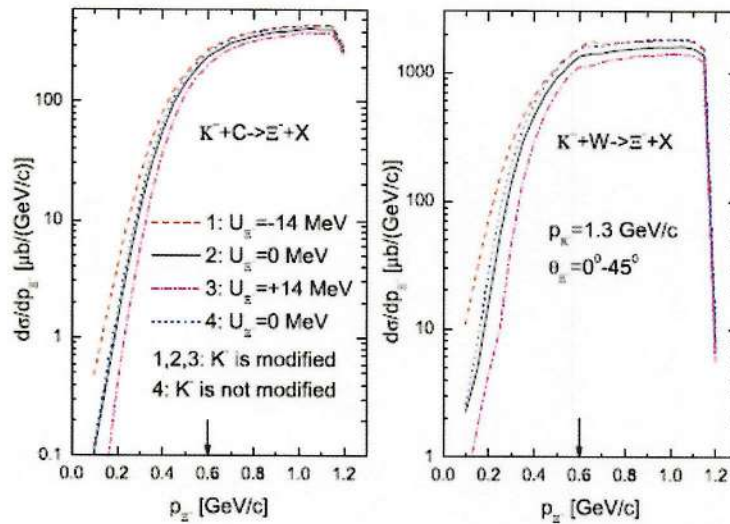


Fig. 5. (Color online) Momentum differential cross sections for the production of Ξ^- hyperons from the direct $K^- p \rightarrow K^+ \Xi^-$ and $K^- n \rightarrow K^0 \Xi^-$ processes in the laboratory polar angular range of 0° – 45° in the interaction of medium-modified and not modified K^- mesons having vacuum momentum of 1.3 GeV/c with ^{12}C (left) and ^{184}W (right) nuclei, calculated for different values of the Ξ^- hyperon effective scalar potential U_{Ξ^-} at density ρ_0 indicated in the inset and for the nominal Ξ^- absorption in the nuclear matter. The arrows indicate the boundary between the low-momentum and high-momentum parts of the Ξ^- spectra.

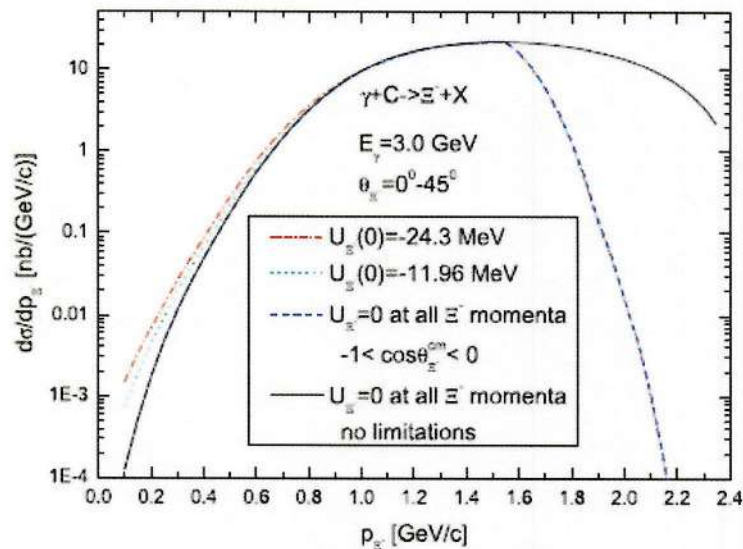


Fig. 5. (Color online.) Momentum differential cross sections for the production of Ξ^- hyperons from the direct $\gamma p \rightarrow K^+ K^+ \Xi^-$ and $\gamma n \rightarrow K^+ K^0 \Xi^-$ processes in the laboratory polar angular range of 0° – 45° in the interaction of photons of energy of 3.0 GeV with ^{12}C nucleus. They were calculated for two different momentum dependences of the Ξ^- hyperon effective scalar potential U_{Ξ^-} at density ρ_0 with the values $U_{\Xi^-}(0) = -24.3$ MeV and $U_{\Xi^-}(0) = -11.96$ MeV, presented in Fig. 1, for zero potential at all Ξ^- momenta, requiring that the Ξ^- hyperons go backwards in the center-of-mass system of the incident photon beam and a target nucleon at rest, as well as for zero potential at all Ξ^- momenta without any constraints on the Ξ^- emission angle in this system.

Координатор: Парьев Эдуард Яковлевич

Тел: +7 (903) 588 1334

20. Механизм температурных вариаций средней энергии мюонов на больших глубинах

Рассмотрены источники сезонных температурных вариаций средней энергии потока мюонов, обнаруженные в эксперименте LVD. Показано, что вариации связаны с процессами генерации мюонов в верхних слоях атмосферы и прохождения мюонами слоя грунта большой толщины. Сезонные вариации средней энергии атмосферных мюонов до 10% являются новым эффектом в мюонной физике. Более высокая амплитуда сезонных вариаций космогенных нейтронов по сравнению с амплитудой вариаций интенсивности мюонов была обнаружена с помощью детектора LVD. Зависимость $N_n \propto \bar{E}_\mu^{0.78}$ связывает вариации нейтронов с вариациями средней энергии мюонов. Отсюда следует, что температурный эффект, влияющий на генерацию мюонов, изменяет не только их интенсивность, но и среднюю энергию.

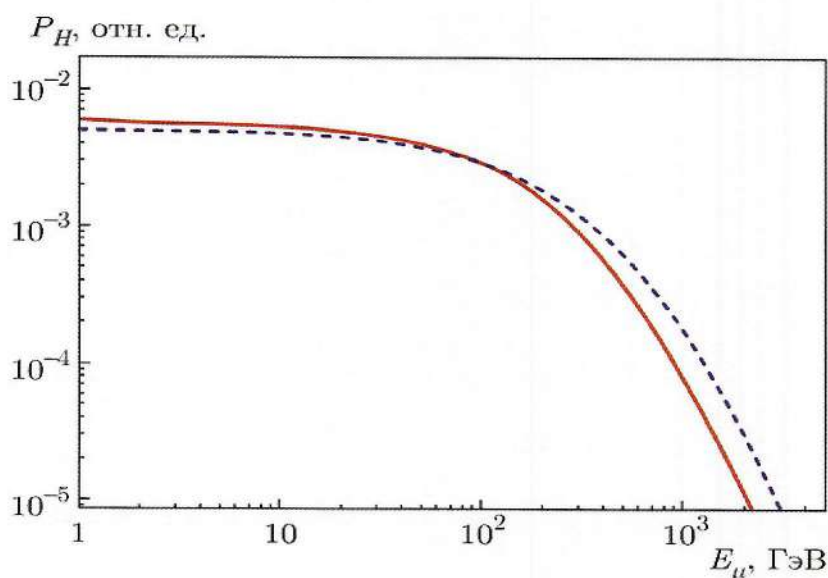


Рис. 1 Сезонная трансформация формы спектра мюонов, качественное представление. Красная кривая — среднегодовой спектр, синяя пунктирная — летний спектр.

Публикации:

Агафонова Н.Ю., Мальгин А.С. «О механизме температурных вариаций средней энергии мюонов на больших глубинах», *ЖЭТФ*, Том 159, Вып. 1, стр. 88 (Январь 2021). DOI: 10.31857/S0044451021010077. (Английский перевод - N.Yu. Agafonova, A.S. Malgin "On the Mechanism of Temperature Variations in the Average Energy of Muons at Large Depths", *JETP*, Vol. 132, No 1, pp. 73–78 (January 2021). DOI: 10.1134/S1063776121010088)

Координатор: Агафонова Наталья Юрьевна

тел.: 8(915)148-76-65

эл. почта: agafonova@inr.ru

ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

21. Отклик детектора LVD на землетрясения в центральной Италии

В результате изучения временных рядов скорости счета низкоэнергетического фона детектора LVD получено указание на наблюдение за 2-4 суток радоновых предвестников землетрясений с магнитудой больше 3.5 баллов, происходивших в Итальянском регионе. Показано, что изменение температуры, влажности и давления в подземном зале не влияет на ход скорости счета фоновых гамма-квантов в детекторе.

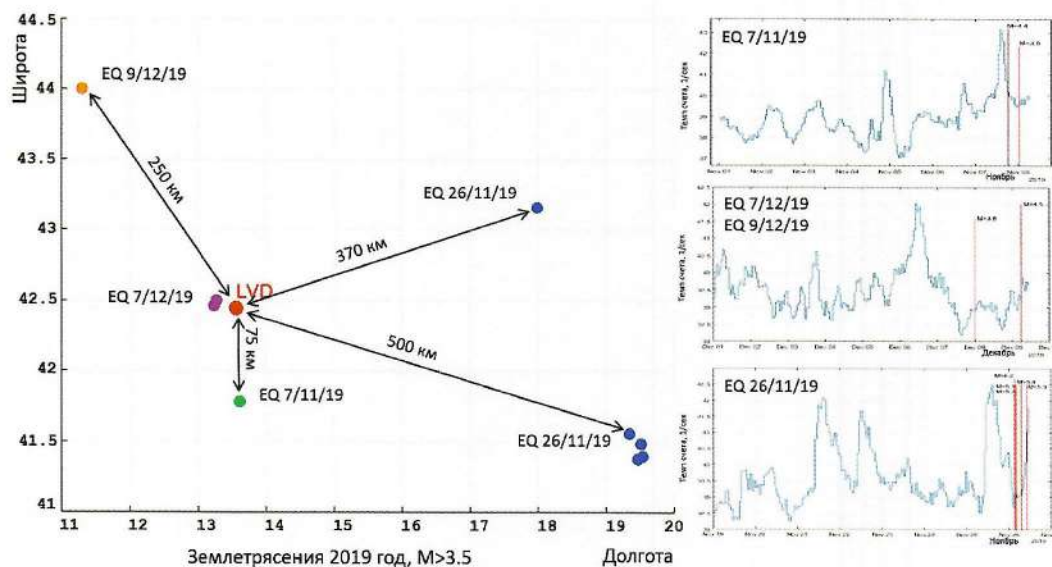


Рис. 2 Сейсмические события 2019 года с магнитудой больше 3.5 и отклик установки LVD. Слева показаны эпицентры сильных толчков и их расположение относительно установки LVD. Справа – данные установки по нижнему порогу (по оси абсцисс – дата, по оси ординат – темп счета в секунду на счетчик). Линиями обозначены моменты сильных толчков.

Публикации:

1. Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина, Р. И. Еникеев, А. С. Мальгин, О. Г. Рязжская, Н. А. Филимонова, И. Р. Шакирьянова, В. Ф. Якушев и коллаборация LVD "Отклик детектора LVD на землетрясения в центральной Италии", Известия РАН. Серия физическая Т.85, N11, 1661-1665 (2021);

2. N. Yu. Agafonova, V.V. Ashikhmin, E.A. Dobrynina, R.I. Enikeev, N.A. Filimonova, O.G. Ryazhskaya, I.R. Shakyrianova, V.F. Yakushev (on behalf of the LVD Collaboration) "Variations of Atmospheric Muons and Background Measured with Large Volume Detector" Physics of Atomic Nuclei, 2021, Vol. 84, No. 6, pp. 1–5 (only eng.) DOI: 10.1134/S1063778821130019

Координатор: Агафонова Наталья Юрьевна

тел.: 8(915)148-76-65

эл. почта: agafonova@inr.ru

ПФНИ 1.3.3.1. Физика элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий

22. Связь компланарности энергичных частиц в космических лучах и near-side «ridge» эффекта малоэнергичных частиц на БАК.

В результате анализа азимутальных эффектов заряженных адронов в центральной области псевдобыстрот, найденных в экспериментах на LHC, и компланарности наиболее

энергичных вторичных частиц в адрон-ядерных взаимодействиях космических лучей при сверхвысоких энергиях, впервые показано, что т.н. long-range near-side «ridge» эффект Коллаборации CMS [1], который не объясняется ни одной из существующих теоретических моделей, в рамках модели FANSY 2.0 [2] является побочным результатом компланарной генерации высокоэнергичных частиц в фрагментационной области [3,4]. Это может означать, что современные теоретические представления о генерации наиболее энергичных частиц в множественных процессах при сверхвысоких энергиях не полностью описывают характеристики подобных взаимодействий.

Публикации:

1. The CMS Collaboration, JHEP09 (2010) 091
2. R.A. Mukhamedshin. FANSY 2.0: A Monte Carlo tool for study of superhigh-energy cosmic-ray interactions. Proton-proton interactions. Eur. Phys. J. Plus (2019) 134: 584
3. R. A. Mukhamedshin. Is There a Relationship between the Collider “Ridge” Effect and Particle Coplanarity in Gamma Ray–Hadron Families? Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2021, Vol. 85, No. 4, pp. 402–404
4. R. A. Mukhamedshin. "On connection between the collider long-range near-side "ridge" effect at $|\eta| < 2.4$ and cosmic-ray coplanarity of most energetic particles" (sent, refereed and resubmitted in Eur. Phys. J. C, ID EPJC-21-03-207.R1).

Координатор: Мухамедшин Рауф Адгамович

эл. почта: rauf_m@mail.ru

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

23. Получено ограничение на диффузный поток гамма-квантов высоких энергий по данным установки TAIGA-GRANDE

В эксперименте TAIGA на широкоугольных черенковских установках Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE проведены прецизионные измерения энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в диапазоне энергий 10^{14} - 10^{18} эВ.

В эксперименте TAIGA на атмосферных черенковских телескопах изображения TAIGA-IACT зарегистрированы гамма-кванты высоких энергий от остатка сверхновой звезды в Крабовидной туманности и внегалактического источника блазара Маркарян 421.

Получено ограничение на диффузный поток гамма-квантов высоких энергий по данным сцинтилляционной установки TAIGA-GRANDE.

Публикации:

1. В.В. Просин, И.И. Астапов, П.А. Безъязыков,, Б.К. Лубсандоржиев и др. Глубина максимума широкого атмосферного ливня (ШАЛ) и средний состав первичных космических лучей в диапазоне энергий 10^{15} – 10^{18} эВ по данным установок для регистрации черенковского света ШАЛ в Тункинской долине Тунка-133 и TAIGA-HiSCORE // Изв. РАН: серия физическая. 2021. Т.85. N.4. С.525-528.

2. Л.Г. Свешникова, и др. Регистрация гамма-квантов от Крабовидной туманности и блазара Маркарян 421 в области энергий болет 3–4 ТэВ атмосферным черенковским телескопом в эксперименте TAIGA // Изв. РАН: серия физическая. 2021. Т.85. N.4. С.529-533.

3. Д.А. Подгрудков, и др. Первые результаты работы прототипа широкоугольного телескопа SIT в составе астрофизического комплекса TAIGA // Изв. РАН: серия физическая. 2021. N.4. С.541-544.

4. A.L. Ivanova, et al. Tunka-Grande array for high-energy gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics: preliminary results // PoS(ICRC2021)361

5. M. Ternovoy, et al. Simulation of the Tunka-Grande, TAIGA-Muon and TAIGA-HiSCORE arrays for a search of astrophysical gamma quanta with energy above 100 TeV // J.Conf.Ser. 1847 (2021) 1, 01247

Координатор: Лубсандоржиев Баярто Константинович

Тел.: +7 (916) 148 38 10

эл.почта: lubsand@rambler.ru

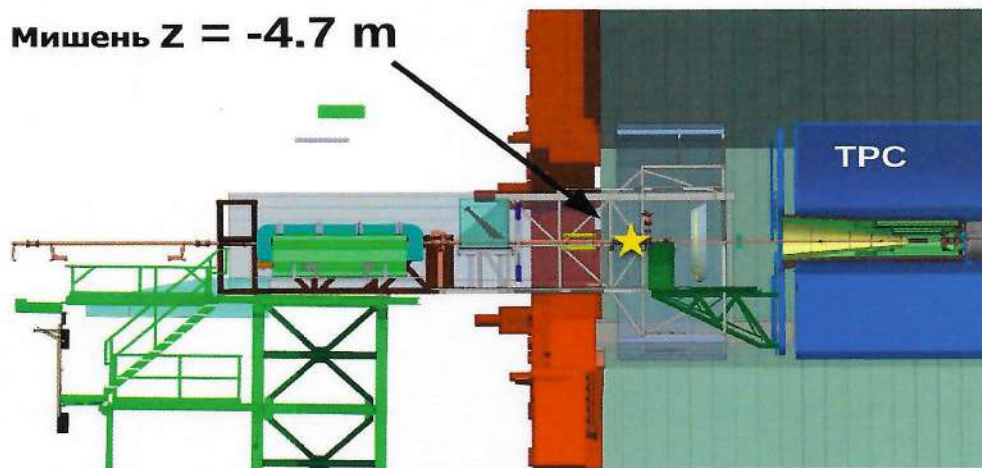
ПФНИ 1.3.3.3. Нейтринная физика, астрофизические и космологические аспекты ядерной физики и физики элементарных частиц.

24. Исследование взаимодействия протонов и тяжелых ионов с ядрами на пучках LHC с фиксированной мишенью в экспериментах ALICE и LHCb

Разработана детальная программа физических исследований с использованием фиксированной мишени на коллайдере LHC и подготовлен проект экспериментов с фиксированными мишенями для установки ALICE и LHCb. Для установки ALICE предложено выполнить отклонение гало пучка с помощью изогнутого кристалла длиной 1.2 см на угол около 150 мкрад и получить коллимированный пучок на твердую фиксированную мишень, после которой располагается второй изогнутый кристалл длиной 7 см с углом отклонения 15 мрад для направления рожденных частиц на существующие детекторы установки ALICE. Проведены разработки системы монтажа и перемещения кристалла и фиксированной мишени. Рассмотрена возможность использования газовой мишени на установках ALICE и LHCb. Предусмотрено размещение поляризованной мишени для проведения экспериментов по исследованию процессов, зависящих от спина. Выполнены расчеты мгновенной светимости, а также интегрированные за год светимости, которые могут быть получены на установках ALICE и LHCb с протонным и ядерными пучками коллайдера LHC в экспериментах с фиксированными мишенями для выходов различных частиц. Проведены оценки акцептанса имеющихся детекторных систем.

Публикации:

- 1) “A fixed-target programme at the LHC: Physics case and projected performances for heavy-ion, hadron, spin and astroparticle studies”, C.Hadjidakis, ... A.B.Kurepin, N.S.Topilskaya et al., Physics Reports 911 (2021) 1–83
- 2) “LHC fixed target experiments: Report from the LHC Fixed Target working group of the CERN Physics Beyond Collider Forum“, C.Barschel, ... A.Kurepin, N.Topilskaya et al., CERN Yellow Reports: Monographs, CERN-2020-004, Published by CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland



Размещение фиксированной мишени на расстоянии – 4.8 м от точки встречи пучков на установке ALICE (LHC)

Авторы: Международный эксперимент на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC CERN, в котором участвует ИЯИ РАН. Членами коллаборации являются сотрудники ИЯИ РАН: А.Б.Курепин, Н.С.Топильская

Координатор: Курепин Алексей Борисович

тел: 8(903)629-32-67

эл.почта: kurepin@inr.ru

ПФНИ 1.3.3. Ядерная физика и физика элементарных частиц

25. Завершена подготовка к развертыванию эксперимента JUNO

Исследована чувствительность к потоку солнечных и низкоэнергетичных атмосферных нейтрино эксперимента JUNO.

Завершено проектирование установки OSIRIS для исследования потоков солнечных нейтрино и on-line контроля радиоактивности жидкого сцинтиллятора эксперимента JUNO.

Завершено массовое производство малогабаритных (3-дюймовые) и крупногабаритных (20-дюймовые) фотоумножителей, 26000 и 18000 соответственно, для центрального детектора эксперимента JUNO.

Разработаны методы и средства массового тестирования фотодетекторов эксперимента JUNO.

Оптимизирован состав жидкого и завершена подготовка к массовому производству жидкого сцинтиллятора эксперимента JUNO.

Публикации:

1. A. Abusleme, et al. Radioactivity control strategy for the JUNO detector // JHEP 11(2021)102
2. A. Abusleme, et al. Calibration strategy of the JUNO experiment // JHEP 03(2021)004.
3. A. Abusleme, et al. JUNO sensitivity to low energy atmospheric neutrino spectra // EPJC, 2021, 81:887.

4. A. Abusleme, et al. The Design and Sensitivity of JUNO's scintillator radiopurity pre-detector OSIRIS // EPJC 2021 81(973)
5. A. Abusleme, et al. Feasibility and physics potential of detecting 8B solar neutrinos at JUNO // Chinese Physics C, 2021, Vol. 45, No. 2 P.023004
6. Qi Wu, et al. Study of after-pulses in the 20-inch HQE-MCP-PMT for the JUNO experiment // Nuclear Instruments and Methods A., 1003. 2021. 165351.
7. Chuanya Cao, et al. Mass production and characterization of 3-inch PMTs for the JUNO experiment // Nuclear Instruments and Methods A. 2021. V.1005. P.165347.
8. A. Abusleme, et al. Optimization of the JUNO liquid scintillator composition using a Daya Bay antineutrino detector // Nuclear Instruments and Methods A. 2021. Vol.988. P.164823

Координатор: Лубсандоржиев Баярто Константинович

Тел.: +7 (916) 148 38 10

эл.почта: lubsand@rambler.ru

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

Наиболее значимые результаты, имеющие инновационный потенциал

1. Разработка $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора для таргетной альфа-терапии

Авторы – Ермолаев С.В., внс, Васильев А. Н. снс, Скасырская А.К.

В ИЯИ РАН разработан и запатентован способ получения медицинского радионуклида актиний-225 путем облучения металлического тория-232 протонами средних энергий, позволяющий за 7-10 дней нарабатывать ^{225}Ac в количестве, сопоставимым с уровнем годового производства в мире. Недостатком нового способа является наличие изотопной примеси долгоживущего ^{227}Ac (0.1-0.2% на момент окончания облучения).

В лаборатории радиоизотопного комплекса ИЯИ РАН разработан $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератор, гарантирующий получение ^{213}Bi с низким содержанием как изотопов актиния, так и продуктов распада ^{227}Ac . Конструкция генератора, работающего по циркулирующей схеме (рис. 1), компактна и технологична. Концентрирование целевого ^{213}Bi на колонке (2), отдельно от материнского ^{225}Ac , позволяет проводить десорбцию ^{213}Bi любым удобным хелатором и в перспективе - раствором конъюгата (белок+хелатор). В этом случае мечение конъюгата происходит прямо на колонке (2) генератора, что значительно уменьшает время приготовления радиофармацевтического препарата.

Разработанный генератор по стабильности и эффективности получения ^{213}Bi не уступает наиболее распространенному генератору производства Joint Research Centre of the European Commission (JRC) (Karlsruhe, Germany), используемому в большинстве клинических исследований с ^{213}Bi , а по радионуклидной чистоте ^{213}Bi – значительно превосходит немецкий аналог (табл.).

Данная разработка позволит обеспечить ядерную медицину в России и за рубежом эффективным средством для терапии различных онкологических заболеваний.

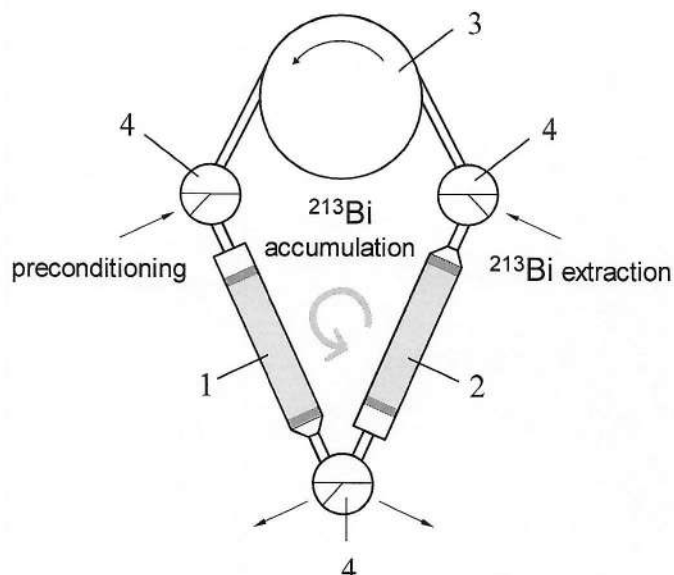


Рисунок 1. Схема $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератора.

- 1 – хроматографическая колонка с материнским ^{225}Ac ,
 2 – хроматографическая колонка для накопления ^{213}Bi ,
 3 – перистальтический насос, 4 – трехходовой кран.

| $^{225}\text{Ac}/^{213}\text{Bi}$ генератор | Эффективность элюирования ^{213}Bi , % (0.5 мл элюата) | Примесь (0.5 мл элюата), % | | | |
|--|--|----------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| | | ^{225}Ac | ^{227}Ac | ^{227}Th | ^{223}Ra |
| ИЯИ РАН | 73 ± 2 | $<10^{-6}$ | $<10^{-8}$ | $<10^{-6}$ | $<10^{-6}$ |
| JRC (Karlsruhe, Germany) | 76 ± 3 * | $2 \cdot 10^{-5}$ * | $<10^{-6}$ | $<10^{-6}$ | $10^{-4} - 10^{-3}$ |

* Опубликованные данные для 0.6 мл элюата (Morgenstern, A.; Bruchertseifer, F.; Apostolidis, C. Bismuth-213 and actinium-225-generator performance and evolving therapeutic applications of two generator-derived alpha-emitting radioisotopes. *Curr. Radiopharm.* **2012**, *5*, 221–227)

Результаты работы опубликованы в журнале **Q1**: Ermolaev, S.; Skasyrskaya, A.; Vasiliev, A. A Radionuclide generator of high-Purity Bi-213 for instant labeling. *Pharmaceutics* **2021**, *13*, 914. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13060914>.

Координатор: Жуйков Борис Леонидович

Тел.: +7 (903) 797 7871

Эл. почта: bz@inr.ru

Направление науки: 1.3. Физические науки

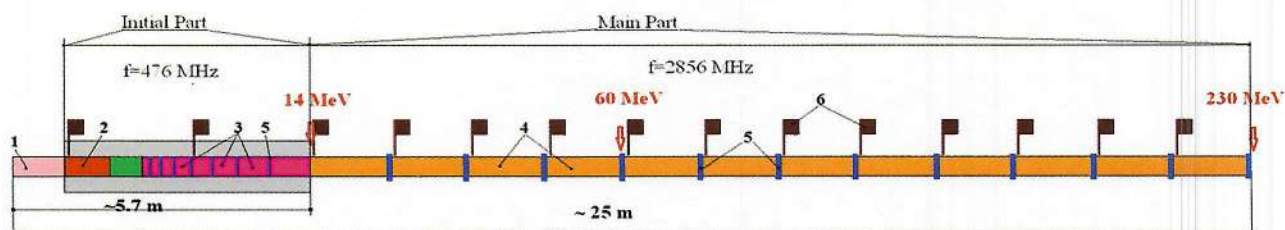
Направление фундаментальных и поисковых научных исследований:

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

2. Разработка физико-технического обоснования компактного линейного ускорителя для протонной терапии.

В 2021 году завершена разработка физико-технического обоснования компактного линейного ускорителя протонов для практической и исследовательской протонной

терапии. При максимальной энергии протонов 230 МэВ и импульсном режиме работы ускоритель имеет длину 26 м. В диапазоне от 60 МэВ до 230 МэВ обеспечивается быстрая регулировка выходной энергии протонов с обеспечением характеристик ‘карандашного’ пучка. Как физические, так и предлагаемые технические решения позволят создать установку, реализуемую на основе освоенного отечественной промышленностью оборудования и по совокупности целевых и технико-экономических показателей превосходящую известные аналоги. Структура ускорителя приведена на рисунке.



1 – источник протонов, 2 – ускоритель с пространственно-однородной фокусировкой, 3 – резонаторы начальной части, 4 – секции на бегущей волне, 5 – элементы фокусировки, 6 – источники ВЧ питания.

Координатор: Парамонов Валентин Витальевич.

эл.почта: paramono@inr.ru,

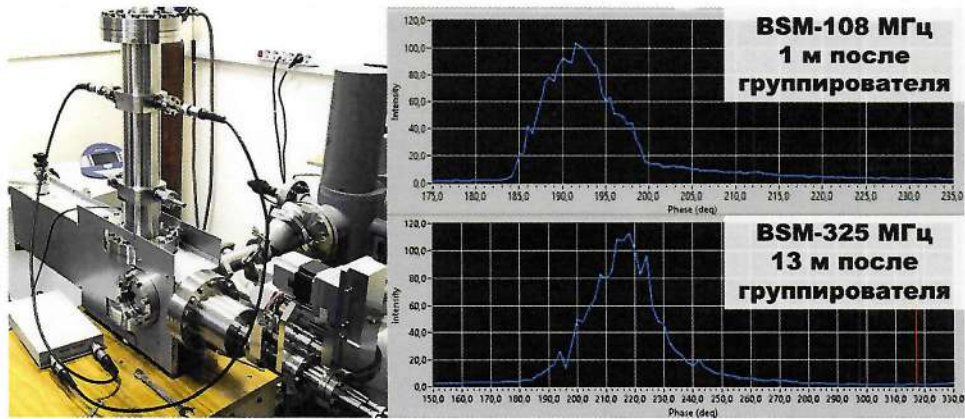
тел.: 8(495)850-42-39

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

3. Разработка и создание устройств диагностики пучка для линейных ускорителей ионов.

В 2021 году выполнен комплекс работ по разработке систем диагностики для создаваемых в России линейных ускорителей протонов, отрицательных ионов водорода и легких ионов. Разрабатываемые системы включают измерители тока пучка, профилометры, ионизационные мониторы поперечного сечения, измерители эмиттанса и измерители формы сгустков. Предложены варианты практической реализации указанных устройств на основе опыта и технологических возможностей ИЯИ РАН, а также коммерчески доступных комплектующих. Для обоснования принятых решений проведены расчетно-модельные оценки рабочих характеристик, разработаны габаритные чертежи устройств и электронные схемы.

Завершено создание измерителей формы сгустков для ускорителя ионов CW-linac и ускорителя протонов Proton linac лаборатории GSI (Дармштадт, Германия), обладающих временным разрешением до 6 пикосекунд. Оба измерителя прошли успешные испытания в GSI на тестовом пучке ионов He^+ с энергией 1.4 МэВ/нуклон.



Измеритель формы сгустков на испытательном стенде в ИЯИ РАН
и результаты измерений формы сгустков тестового пучка ионов He^+ в GSI.

Координатор: Гаврилов Сергей Александрович.

эл.почта: s.gavrilov@gmail.com

тел.: 8(495)850-42-37

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

4. Восстановление сигналов и изображений систем регистрации, обработки и передачи информации на основе тестовых измерений

Разработаны математические методы восстановления параметров воздействий по отклику линейных стационарных (ЛС) систем на основе тестовых измерений. Предложенная методика позволяет избежать моделирования процессов измерений, обработки и передачи информации и обойтись без анализа сложных ЛС систем и определения их импульсных характеристик. Методы предназначены для восстановления одномерных и многомерных непрерывных сигналов и дискретных данных, позволяют обеспечить минимальные потери информации при реконструкции сильно зашумленных сигналов и изображений. Их также можно использовать для моделирования отклика ЛС систем на заданное воздействие.

На рисунке 1А представлен пример реконструкции v_r входного сигнала v со спектром ~ 200 МГц из сигнала w на выходе емкостного делителя напряжения с частотой среза ~ 1 МГц с использованием входного V (~ 20 МГц) и выходного W тестовых сигналов. Погрешность реконструкции $\delta v_r = \frac{\|v_r - v\|}{\|v\|}$ составила 3%. На рисунке 1Б представлен пример восстановления V_r цветного изображения V из искаженного при передаче изображения W с использованием тестовых изображений V_c и W_c . Электрическая схема делителя на рисунке 1А и матрица искажений U на рисунке 1Б представлены для информации и для предложенной методики реконструкции не требуются.

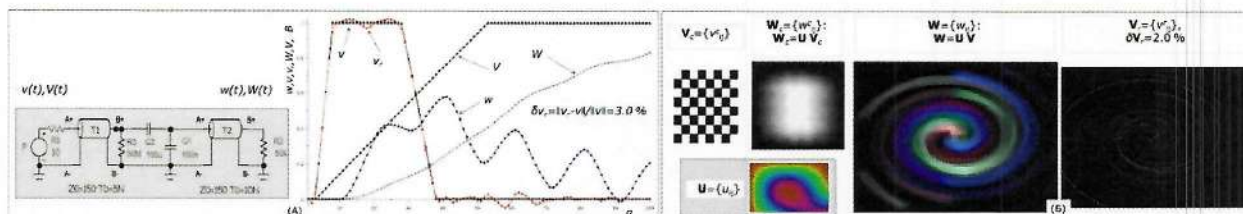


Рисунок 1. Реконструкция v_r сигнала v на входе емкостного делителя напряжения из сигнала w на его выходе с использованием входного V и выходного W тестовых сигналов (А) и восстановление V_r цветного изображения V из искаженного при передаче изображения W с использованием тестовых изображений V_c и W_c (Б).

Предложенные методы могут быть использованы во многих прикладных областях науки и техники, связанных с изучением физических процессов, с регистрацией, детектированием, приемом-передачей, обработкой и моделированием сигналов и изображений. Технический и экономический эффект от внедрения состоит в повышении качества измерений, приема-передачи и обработки сигналов и изображений доступными математическими методами вместо разработки дорогостоящей аппаратуры, сопряженной с трудноразрешимыми научно-техническими и конструкторскими проблемами.

Предложенные методы математической реконструкции на основе тестовых измерений и предложенные ранее методы пошаговых сдвигов дополняют друг друга, имеют широкую область применения и большой инновационный потенциал. Методы относятся к сфере научных разработок, апробированы в докладах на научно-технических советах и семинарах ИЯИ РАН и ОИЯИ, на международных конференциях, защищены публикациями в рецензируемых журналах в России и за рубежом. Алгоритмы реконструкции и моделирования описаны в статьях и препринтах и готовы к практическому применению. Патентная защита алгоритмов и программ расчета не проводилась.

Публикации:

1. Новиков-Бородин А.В. Реконструкция и моделирование экспериментальных данных с использованием тестовых измерений. – Приборы и техника эксперимента, 2021. (принято к публикации 30.10.2021, находится в печати)
2. Novikov-Borodin A.V. Reconstruction and simulation of experimental data using test measurements. – Instruments and Experimental Techniques, 2021, © Pleiades Publishing, Ltd., 2021. (принято к публикации)

Координатор: Новиков-Бородин Андрей Валерьевич

тел.: 8(495)850-42-55

эл. почта: novikov@inr.ru

ПФНИ 1.3.3. Ядерная физика и физика элементарных частиц

Заместитель директора

Профессор РАН

Г.И. Рубцов

Протокол заседания Ученого совета ИЯИ РАН от «21» декабря 2021 г. № 11

