

1. Поиск стерильных нейтрино. В эксперименте BEST (Baksan Experiment on Sterile Transitions), выполняемом в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, получены новые данные, подтверждающие наличие так называемой "галлиевой аномалии" (дефицита электронных нейтрино), которая может свидетельствовать о существовании стерильного нейтрино ν_s [1]. Галлиевая аномалия ранее была обнаружена в экспериментах SAGE и GALLEX по регистрации нейтрино от Солнца на основе реакции ${}^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-) {}^{71}\text{Ge}$. Во время калибровки детекторов радиоактивными источниками темп счёта оказался ниже, чем ожидалось. Возможным объяснением служит превращение (осцилляции) части электронных нейтрино в стерильные нейтрино $\nu_e \rightarrow \nu_s$, не участвующие напрямую в слабых взаимодействиях. Гипотетические ν_s пока достоверно не обнаружены, но некоторые указания на их существование были получены в осцилляционных экспериментах. Достаточно массивные ν_s также могли бы составлять "тёплую" тёмную материю во Вселенной. В новом галлиевом эксперименте BEST В.Н. Гаврин (Институт ядерных исследований РАН) и его коллеги регистрировали нейтрино от радиоактивного источника ${}^{51}\text{Cr}$ с хорошо известной активностью, подготовленного на реакторе в Димитровграде. В детекторе BEST применялись два объёма галлия на различных средних расстояниях до источника. Наличие двух длин осцилляции снижает теоретические неопределённости. Также при интерпретации результатов использовалось уточнённое сечение реакции — это даёт большую уверенность в том, что все ядерно-физические процессы учитываются корректно. Дефицит ν_e по новым измерениям составил 20–24%, а общая достоверность наличия галлиевой аномалии увеличилась от $2-3\sigma$ до более чем 5σ [2]. Тем самым, повышается вероятность существования ν_s , если не будут найдены другие причины расхождения. При этом наиболее вероятными значениями массового параметра и угла смешивания ν_s являются $\Delta m^2 \approx 1,25 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 \theta \approx 0,34$ (с учётом данных SAGE и GALLEX). В другом эксперименте BeEST (Beryllium Electron capture in Superconducting Tunnel junctions) впервые получено ограничение на ν_s с использованием β -распадов ${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li}$ [3]. Ядра ${}^7\text{Be}$ были внедрены в квантовый сенсор, представляющий собой сверхпроводящий туннельный контакт. Наблюдались распады с захватом одного из электронов с электронной оболочки в ядро атома. При этом вылетает (не регистрируемое в эксперименте) нейтрино, а ядро получает отдачу. Энергия отдачи возбуждает электроны, вызывая тем самым скачки туннельного тока. В спектре энергии отдачи наблюдались четыре пика, соответствующие основным и возбуждённым состояниям ядер ${}^7\text{Li}$. При наличии ν_s спектр должен был бы получить искажения. На достигнутом уровне точности этот эффект не обнаружен. Полученное ограничение на элемент матрицы смешивания ν_e с ν_s в интервале масс 100–850 кэВ на порядок величины лучше, чем ограничения по данным других экспериментов. Поиск ν_s проводится также в эксперименте NOvA, в котором принимают участие учёные из ИЯИ РАН, ОИЯИ и ФИАН [4]. Измерения выполняются с помощью двух детекторов на расстояниях 1 и 810 км от ускорительного источника антинейтрино в Фермилабе, но осцилляции в ν_s пока не обнаружено. Отсутствие заметного вклада ν_s позволило получить дополнительные ограничения на углы смешивания и

массовые параметры. Для достоверных выводов о существовании ν_s потребуются дальнейшие исследования.

2. Взаимодействие ϕ -мезонов с протонами. В рамках квантовой хромодинамики предсказывается сдвиг массы адронов в ядерной среде за счёт частичного восстановления киральной симметрии. Некоторые свидетельства этого эффекта были получены в экспериментах с ϕ -мезонами, однако полученные данные сложно интерпретировать из-за теоретических и экспериментальных неопределённостей в механизме взаимодействия ϕ -мезонов с нуклонами. В эксперименте ALICE, выполняемом на Большом адронном коллайдере, исследовались рр-столкновения с энергией в системе центра масс 13 ТэВ и наблюдались процессы взаимодействия рождавшихся ϕ -мезонов с протонами [5]. Установлено, что взаимодействие ϕ имеет характер притяжения и основной вклад в него дают упругие процессы, а неупругие составляют лишь $< 0,17\%$. Из результатов измерения двучастичных корреляционных функций частиц была найдена константа взаимодействия $g_{N-\phi} = 0,14 \pm 0,03$ (стат.) $\pm 0,02$ (сист.). Возможно, что эти новые данные помогут прояснить различные эффекты, связанные со взаимодействием ϕ -мезонов с нуклонами. В эксперименте ALICE принимают участие российские исследователи из ИЯФ СО РАН, ИЯИ РАН, ОИЯИ, МФТИ, НИЦ "Курчатовский институт" (включая ИТЭФ, ГНЦ ИФВЭ и ПИЯФ), МИФИ, РФЯЦ – ВНИИЭФ и СПбГУ.

3. Фотоядерная реакция $\gamma n \rightarrow K^0 \Sigma^0$. В эксперименте BGOOD, выполняемом в Боннском университете при участии российских исследователей из ПИЯФ и ИЯИ РАН, измерено сечение реакции $\gamma n \rightarrow K^0 \Sigma^0$ вблизи порога K^* [6]. При энергии ~ 2050 МэВ обнаружен пик, который может соответствовать мультикварковому векторному мезон-барионному резонансу. Эта модель была предложена А. Ramos и Е. Oset в 2013 г. для сектора uds -кварков. Аналогичная модель в виде пентакварковой конфигурации в секторе чармированных тяжёлых кварков привлекалась ранее для объяснения P_c -состояний, наблюдавшихся в эксперименте LHCb на Большом адронном коллайдере. В эксперименте BGOOD мишени из жидкого водорода и дейтерия облучались гамма-квантами тормозного излучения, генерируемого пучком электронов. Продукты реакций наблюдались с помощью магнитных спектрометров, трековых и пластиковых сцинтилляционных детекторов. Частицы-кандидаты K^0 отбирались путём регистрации пар фотонов от распадов $K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \rightarrow (\gamma\gamma)(\gamma\gamma)$, а также применялись другие критерии селекции. В рамках статистических неопределённостей пик при 2050 МэВ соответствует модели А. Ramos и Е. Ose. Тем самым, возможно, впервые было обнаружено мультикварковое состояние в секторе лёгких кварков. Однако, поскольку не исключены альтернативные интерпретации, требуется дополнительный набор статистики и новые эксперименты. О ядерной фотонике см. [7, 8].

4. Дифракционный метод измерения силы Казимира – Полдера. Сила Казимира – Полдера возникает между отдельным атомом и поляризуемой поверхностью за счёт квантовых флуктуаций электромагнитного поля. Измерение этой силы интересно как с фундаментальной точки зрения для поиска новых взаимодействий в нанометровых масштабах, так и может оказаться важным для микроэлектромеханических систем. С. Garcion (Университет Сорбонна Париж Север, Франция) и соавторы в своём эксперименте продемонстрировали новый способ измерения силы Казимира – Полдера на

масштабах $\approx 15-51$ нм в процессе интерференции пучка атомов на плоской дифракционной решётке [9]. Идея их метода заключается в том, что при сближении атома с решёткой на атом действует сила Казимира–Полдера, что ведёт к уменьшению эффективной ширины щелей решётки, а это, в свою очередь, влияет на интерференционную картину. Решётка была создана методом электронной литографии в пластине Si_3N_4 толщиной 100 нм на площадке 1×1 мм². На решётку направлялся пучок метастабильных атомов аргона со скоростями ~ 20 м с⁻¹. Интерференционная картина, регистрируемая детектором позади пластины, соответствовала основному вкладу от потенциала Казимира–Полдера, причём были заметны отклонения на уровне 15 %, объясняемые вкладом потенциала ван дер Ваальса. Тем самым, эксперимент продемонстрировал высокую чувствительность нового дифракционного метода.

5. Низкоэнергетические возбуждения в $\text{Cu}_3\text{Zn}(\text{OH})_6\text{FBv}$. Y. Wei (Пекинская национальная лаборатория физики конденсированных сред и Институт физики Китайской академии наук) исследовали удельную теплопроводность при низких температурах соединения $\text{Cu}_3\text{Zn}(\text{OH})_6\text{FBv}$ [10]. Предполагается, что в этом поликристалле имеет место состояние квантовой спиновой жидкости, однако для достоверных выводов требуются более детальные исследования. В частности, помочь прояснить картину может изучение элементарных возбуждений в $\text{Cu}_3\text{Zn}(\text{OH})_6\text{FBv}$ при низкой температуре. Исследователи обнаружили, что при уменьшении температуры при ~ 4 К на графике теплопроводности имеется плечо, а при дальнейшем охлаждении теплопроводность принимает степенной вид $\propto T^{1.7}$. Это поведение лучше всего объясняется взаимодействием вихревых возбуждений — вивонов с магнитными примесями. Данный эффект напоминает изменение длины когерентности в модели Пиппарда для сверхпроводников и может свидетельствовать о дальней квантовой запутанности возбуждений.

6. Микролазер на основе ленты Мёбиуса. Y. Song (Университет Париж-Сакле, Франция и Университет Ланьчжоу, Китай) и соавторы исследовали микролазер, резонатор которого представляет собой полимерное кольцо в виде ленты Мёбиуса радиусом ~ 50 мкм, изготовленное из фоторезиста IP-G780 методом прямой лазерной литографии [11]. Фоторезист был допирован по объёму частицами красителя (активной средой), а накачка осуществлялась с помощью вспомогательного лазера в поперечном направлении. Измеренный с помощью спектрометра и CCD-камеры набор мод генерации лазерного излучения отличается от набора круговых мод в обычных кольцевых микролазерах (мод "шепчущей галереи") и соответствует периодическим геодезическим (кратчайшим траекториям) света на односторонней ленте Мёбиуса.

7. Протонная терапия. В ИЯИ РАН, как и в ряде других российских научных центров, много лет ведётся работа по темам ядерно-физической медицины. Одним из направлений является протонная лучевая терапия — использование пучков протонов для лечения онкологических заболеваний. Протонные пучки позволяют, изменяя энергию ускорителя, выбирать место остановки протонов с максимальной поглощённой дозой и минимизировать облучение окружающих здоровых тканей. Коллектив авторов из ИЯИ РАН разработал концепцию компактных линейных ускорителей для протонной терапии. Целью является получение импульсного пучка протонов с максимальной энергией до 230 МэВ и сечением порядка мм. Было выполнено численное моделирование, с использованием Geant4, воздействия моноэнергетического пучка протонов на ткани [12]. В этих расчётах были оценены характеристики распределения доз облучения. Оптимальным вариантом для формирования дозового поля в области опухоли является магнитная сканирующая система. О ядерной медицине см. [13–18].

8. Нейтрино от Луны. Потоки заряженных частиц (космических лучей), падающие на атмосферу Земли, вызывают рождение "атмосферных" нейтрино. Аналогично, столкновение космических лучей с лунным грунтом ведёт к генерации адронных каскадов и "лунных" ν . Рождение в этом процессе ν с энергиями более 10 ГэВ ранее уже рассматривалось, в том числе в работах исследователей из ИЯИ РАН Г.Т. Зацепина и Л.В. Волковой, и было показано, что поток таких ν от Луны на 2–4 порядка

меньше потока атмосферных ν . Сотрудники ИЯИ РАН и МФТИ С.В. Демидов и Д.С. Горбунов выполнили теоретический расчёт потока ν от Луны в области меньших энергий 10 МэВ–10 ГэВ [19]. Рождающиеся в адронных каскадах пионы и каоны замедляются в лунном реголите. В результате при распадах этих частиц в низкоэнергетическом спектре лунных ν возникает заметная монохроматическая компонента. Оказалось, что при энергии < 53 МэВ поток лунных ν может на порядок превышать поток атмосферных ν , но лишь в направлении на Луну. Зарегистрировать ν от Луны, возможно, удастся следующим поколениям нейтринных телескопов. Выделить лунные ν над фоном может помочь направление их прихода, вариации потока на 12 % при движении Луны по эллиптической орбите вокруг Земли, а также форма спектра.

9. Горизонты сливающихся чёрных дыр. В последние годы гравитационно-волновыми детекторами LIGO/Virgo были обнаружены события слияния чёрных дыр (ЧД). Исследователи из Германии и Канады D. Pook-Kolb, R.A. Hennigar и I. Booth разработали новый метод идентификации ловушечных поверхностей света в численных расчётах и с его помощью проследили поведение горизонтов при слиянии ЧД с разными массами [20]. Оказалось, что после столкновения ЧД их горизонты видимости взаимопроникают, появляется общий внешний горизонт видимости, стремящийся с течением времени к горизонту событий, а внутренний горизонт видимости движется к центру до своего разрушения ловушечными поверхностями. В некотором смысле меньшая ЧД продолжает существовать внутри большей. В нестационарной геометрии появляется большое число таких пересекающихся ловушечных поверхностей, и их число стремится к бесконечности. В работе исследована устойчивость ловушечных поверхностей и обнаружено, что стабильными остаются только три из них, совпадающие с горизонтами.

Список литературы

1. Barinov V V et al., <https://arxiv.org/abs/2109.11482>
2. Barinov V, Gorbunov D, <https://arxiv.org/abs/2109.14654>
3. Friedrich S et al. *Phys. Rev. Lett.* **126** 021803 (2021); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.021803>
4. Acero M-A et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 201801 (2021); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.201801>
5. Acharya S et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 172301 (2021); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.172301>
6. Kohl K et al., <https://arxiv.org/abs/2108.13319>
7. Недорезов В Г, Туринге А А, Шатунов Ю М *УФН* **174** 353 (2004); Nedorezov V G, Turinge A A, Shatunov Yu M *Phys. Usp.* **47** 341 (2004)
8. Недорезов В Г, Рыкованов С Г, Савельев А Б *УФН* **191** 1281 (2021); Nedorezov V G, Rykovanov S G, Savel'ev A B *Phys. Usp.* **64** (12) (2021)
9. Garcion C et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 170402 (2021); <https://arxiv.org/abs/2110.11123>
10. Wei Y et al. *Chinese Physics Letters* **38** 097501 (2021); <http://cpl.iphy.ac.cn/article/10.1088/0256-307X/38/9/097501>
11. Song Y et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 203901 (2021); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.203901>
12. Овчинникова Л и др., Труды XXVII Российской конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC 2021, с. 182; Ovchinnikova L et al., "Effect of a Proton Beam from a Linear Accelerator for Radiation Therapy", in Proc. RuPAC'21 (2021) pp. 182-185; <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOP-SA41>
13. Кравчук Л В *УФН* **180** 665 (2010); Kravchuk L V *Phys. Usp.* **53** 635 (2010)
14. Кравчук Л В *УФН* **191** 1249 (2021); Kravchuk L V *Phys. Usp.* **64** (12) (2021)
15. Акулиничев С В *УФН* **184** 1363 (2014); Akuliniche S V *Phys. Usp.* **57** 1239 (2014)
16. Жуйков Б Л *УФН* **186** 544 (2016); Zhuikov B L *Phys. Usp.* **59** 481 (2016)
17. Клёнов Г И, Хорошков В С *УФН* **186** 891 (2016); Klenov G I, Khoroshkov V S *Phys. Usp.* **59** 807 (2016)
18. Жуйков Б Л, Ермолаев С В *УФН* **191** 1387 (2021); Zhuikov B L, Ermolaev S V *Phys. Usp.* **64** (12) (2021)
19. Demidov S, Gorbunov D *Phys. Rev. D* **104** 043023 (2021); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.104.043023>
20. Pook-Kolb D, Hennigar R A, Booth I *Phys. Rev. Lett.* **127** 181101 (2021); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.181101>