

**1. Новые ограничения на параметры стерильных нейтрино.** Пока неизвестно, из чего состоит скрытая масса Вселенной, но одним из хорошо мотивированных теоретически вариантов являются стерильные нейтрино  $\nu_s$  с массами порядка кэВ [1, 2]. В работе исследователей из ИКИ РАН, ИЯИ РАН и МФТИ выполнен новый поиск распадной линии  $\nu_s$  в данных космического рентгеновского телескопа NuSTAR за 11 лет наблюдений [3]. Отбирались фотоны, пришедшие с углов в несколько градусов от оптической оси телескопа (такую засветку называют "stray light") в интервале энергий 3 – 20 кэВ и направлениями  $> 3^\circ$  от плоскости Галактики, где мал вклад астрофизических объектов диска. Спектр излучения оказался примерно степенным, а дополнительного максимума, соответствующего распадам  $\nu_s$ , не обнаружено. Это позволило получить новые жёсткие ограничения на угол смешивания  $\nu_s$  и ширину их распада. Хотя пока всё ещё остаётся небольшая область допустимых параметров, ограничения уже вплотную приблизились к тому, чтобы закрыть простейшие модели  $\nu_s$  как основного компонента тёмной материи.

**2. Совместный анализ данных по осцилляциям нейтрино.** В то время как некоторые параметры нейтринных осцилляций уже достаточно точно измерены, другие пока остаются неопределёнными. Коллаборации T2K и Супер-Камиоканде выполнили совместный анализ полученных ими данных в общей области измеряемых энергий нейтрино [4]. В эксперименте T2K (Tokai-to-Kamioka) регистрируются нейтрино от ускорителя в ближнем детекторе и в дальнем (на расстоянии 295 км), которым служит детектор Супер-Камиоканде. Измеряемые T2K разности квадратов масс (в зависимости от упорядочивания) и угол смешивания  $\delta_{CP}$ , отвечающий за  $CP$ -нарушение, дают схожий вклад в асимметрию осцилляций нейтрино и антинейтрино, что создаёт вырождение. Но это вырождение можно снять с учётом данных Супер-Камиоканде для атмосферных нейтрино, прошедших через Землю и испытавших резонансное усиление осцилляций. Подобный взаимодополняющий анализ T2K и Супер-Камиоканде показал, что сохранение  $CP$ -инвариантности в осцилляциях нейтрино исключено на уровне 1,9 $\sigma$ , а обратный порядок масс исключается на уровне 1,2 $\sigma$ . Основную погрешность в результат вносит неопределённость в моделях рождения адронов.

**3. Туннелирование Ландау – Зенера в открытой системе.** Теория туннелирования, построенная независимо Л.Д. Ландау и С. Зенером в 1932 г., описывает переходы между квантовыми энергетическими уровнями, которые при изменении внешних параметров (например, магнитного поля) сначала сближаются до минимального расстояния щели  $\Delta$  и затем расходятся. Такой вид энергетического спектра реализуется во множестве физических систем. Режим туннелирования называют слабым или сильным в зависимости от отношения характерной энергии шума, создаваемого окружением, к  $\Delta$ . X. Dai (Университет Уотерлу, Канада) и соавторы выполнили эксперимент со сверхпроводящим перестраиваемым кубитом, в котором прослежен переход от слабого к сильному туннелированию Ландау – Зенера и впервые обнаружено предсказываемое теоретически немонотонное поведение темпа туннелирования [5]. Авторы разработали теоретическую модель "спиновой бани", качественно воспроизводящую их экспериментальные результаты.

**Ю.Н. Ерошенко.** Институт ядерных исследований РАН, просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация  
E-mail: [erosh@ufn.ru](mailto:erosh@ufn.ru)

**4. Нестандартная квантовая статистика.** Как правило, частицы подчиняются квантовой статистике Ферми – Дирака или Бозе – Эйнштейна и соответственно называются фермионами или бозонами. Исключение составляет энионная статистика квазичастиц в некоторых двумерных системах. Исследователи из Университета Райса (США) и Института квантовой оптики Общества имени М. Планка (Германия) Z. Wang и K.R.A. Hazzard в своей теоретической работе [6] показали, что для идентичных квазичастиц при любом числе измерений возможен четвёртый вариант квантовой статистики (парастатистика), в некотором смысле промежуточной между статистиками фермионов и бозонов, однако несводимой ни к одной из них. В этом случае при перестановке двух частиц волновая функция испытывает более сложное преобразование, чем просто изменение знака. Гипотеза о возможности парастатистики была рассмотрена ещё в 1953 г., но ранее делался вывод, что парастатистика эквивалентна статистике фермионов или бозонов. В работе [6] сформулированы правила вторичного квантования парачастиц, также выведен обобщённый принцип исключения и указано на нетривиальные термодинамические свойства систем парачастиц. Возможно, квазичастицы, подчиняющиеся правилам парастатистики, могут быть выявлены в физике твёрдого тела, но такими свойствами могут обладать и неизвестные пока элементарные частицы.

**5. Дробный квантовый эффект Холла и экситоны.** В случае дробного квантового эффекта Холла, наблюдаемого в двумерных электронных системах, квазичастицы несут лишь часть единичного электрического заряда. Предсказывалось, что в слоистых системах межслойные экситоны (связанные состояния электронов и дырок) могут быть фермионами или энионами из-за спаривания между компонентами, несущими дробные заряды, однако в экспериментах этот эффект ранее не был продемонстрирован. N.J. Zhang (Брауновский университет, США) и соавторы впервые выполнили соответствующий эксперимент и обнаружили новые интересные свойства экситонов [7]. Два слоя графена в геометрии Корбино, разделённые гексагональным нитридом бора, были включены в независимые электрические цепи, и в сильном магнитном поле создавался конденсат из межслойных экситонов. Обнаружены два класса состояний дробного квантового эффекта Холла с нецелыми числами заполнения: дробный аналог экситонных конденсатов и двухслойное обобщение фермионных состояний Джайна. Их свойства объясняются наличием экситонных квазичастиц с дробной статистикой, названных "дробными экситонами".

**6. Долгоживущее квантовое состояние кота Шрёдингера (СКШ).** Когерентные состояния, такие как состояние квантовой запутанности или СКШ, представляют большой интерес для устройств квантовой информации, для квантовой метрологии и для фундаментальных исследований, в том числе для поиска эффектов за пределами Стандартной модели [8, 9]. Однако общей проблемой неклассических состояний является декогеренция, приводящая к малому времени их жизни. Y.A. Yang (Научно-технический университет Китая) и соавторы в своём эксперименте с атомом  $^{173}\text{Yb}$  в оптической решётке сумели достичь рекордно большого времени когерентности СКШ  $\simeq 1,4 \times 10^3$  с [10]. СКШ было реализовано на двух противоположно направленных спинах ядра с проекциями  $m = +5/2$  и  $m = -5/2$ . Необходимая для этого нелинейность создавалась эффектом штарковского сдвига. С помощью специальной последовательности лазерных импульсов система была переведена в область гильбертова пространства состояний, где влияние шумов

очень слабое. Как показала рамсеевская интерферометрия, в данной области указанное СКШ с  $m = \pm 5/2$  является долгоживущим.

**7. Спектроскопия ядерного квадрупольного резонанса отдельных ядер.** Спектроскопия ядерного квадрупольного резонанса, основанная на регистрации взаимодействия между электрическим квадрупольным моментом ядер и градиентами электрических полей, находит широкое практическое применение для обнаружения и идентификации различных веществ. Но в данном методе ранее удавалось детектировать лишь резонанс от больших макроскопических ансамблей ядер. S.A. Breitweiser (Пенсильванский университет, США) и соавторы впервые продемонстрировали метод ядерного квадрупольного резонанса для единичных ядер азота в азото-замещённых вакансиях в алмазе (в NV-центрах) [11]. Эксперимент выполнялся при комнатной температуре методом спектроскопии с динамической развязкой. NV-центры при этом служили как квантовыми датчиками, так и исследуемыми системами. Измерения выявили значительные различия в квадрупольных и сверхтонких параметрах между разными NV-центрами, а также ранее неизвестное слабое в гамма-диапазоне NV-центров, возникающее в результате нарушения симметрии. Разработанная методика может найти применение для создания сверхчувствительных ядерных сенсоров.

**8. Льдоподобные оболочки вокруг наночастиц в воде.** В 2010 г. в работе А.Ф. Бункина и С.М. Першина (ИОФ РАН) было обнаружено, что вокруг крупных молекул белка в водном растворе возникает льдоподобная структура из молекул воды. В новом эксперименте [12] измерение сдвига "гравитационного центра" ОН-полосы комбинационного рассеяния, а также резонансов Мандельштама–Бриллюэна показало образование льдоподобной структуры вокруг наночастиц кварца в водной суспензии при комнатной температуре. Пучок лазера направлялся в суспензию, находящуюся в кварцевой кювете. Рассеянное излучение регистрировалось спектрометром комбинационного рассеяния и интерферометром Фабри–Перо. Было обнаружено смещение ОН-полосы в сторону компоненты льда, а в спектре наблюдалась известная линия воды со сдвигом 7,5 ГГц и новая линия 14,3 ГГц. Последний сдвиг линии стоковой компоненты даёт скорость звука в среде вокруг наночастиц  $\sim 2900$  м с<sup>-1</sup>. Эта величина существенно выше скорости звука в воде и близка к скорости звука во льду, что подтверждает формирование льдоподобных гидратных оболочек вокруг наночастиц кварца. Данное исследование, как продолжение цикла работ победителей конкурса научных работ РАН, выполненных совместно с НАН Беларуси, имеет важное значение, в частности для криогенных биотехнологий.

**9. Локализация источника быстрого радиовсплеска (БРВ).** Механизм генерации миллисекундных космических радиоимпульсов, приходящих с межгалактических расстояний, пока не выяснен. По одной из теорий, такие БРВ возникают вблизи магнитаров — нейтронных звёзд с сильными магнитными полями [13]. Но оставалось неясным, сколь далеко от компактного звёздного остатка находится область генерации радиоизлучения. K. Nimmo (Массачусетский технологический институт, США) и соавторы сумели локализовать эту область путём наблюдения мерцаний БРВ FRB 20221022A10 [14]. Мерцания возникают при рассеянии излучения на стохастических неоднородностях космической среды на луче зрения. В спектре FRB 20221022A10, полученном с помощью радиотелескопа CHIME, были выявлены две области мерцаний: одна в хозяйской галактике БРВ, а вторая в нашей Галактике. Положение этих областей и ограничения на плотность числа электронов говорят о том, что размер области генерации  $\leq 3 \times 10^4$  км, и она находится в пределах магнитосферы либо около её границы. Тем самым исключаются внемагнитосферные модели генерации БРВ на большом расстоянии от компактного объекта, например, в распространяющейся ударной волне. Подобный же вывод для FRB 20221022A10 был сделан в 2024 г. в работе R. McKinven и др. из наблюдений изменения угла поляризации излучения.

**10. Эволюция тёмной энергии (ТЭ).** Неоднородности в распределении галактик (крупномасштабная структура Вселенной) содержат

ценную информацию о спектре начальных возмущений и составе Вселенной, определяющем динамику её расширения [15]. Кроме того, по данным о неоднородностях можно проверять теорию гравитации с целью поиска отличий от эйнштейновской Общей теории относительности (ОТО) [16–18]. В проекте DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) исследуется кластеризация галактик и квазаров, а также линий  $\text{Ly}_\alpha$  в спектрах квазаров с помощью специально сконфигурированных обзорных телескопов. Коллаборацией DESI представлены новые результаты пяти лет наблюдений [19]. В них получены спектры и корреляционные функции 40 млн галактик и квазаров на  $0 < z < 4$ , в том числе измерялось положение пика, соответствующего барионным акустическим осцилляциям. Найденная величина постоянной Хаббла близка к результатам измерений спутника Планк, а ограничение на сумму масс нейтрино имеет вид  $\sum m_\nu < 0,071$  эВ. На достигнутом уровне точности все данные согласуются с предсказаниями ОТО. Интересным новым результатом является то, что параметр уравнения состояния ТЭ, вероятно, отличен от  $-1$  (в настоящее время  $w = -0,761 \pm 0,065$ ) и увеличивается по мере расширения Вселенной. В таком случае плотность ТЭ может эволюционировать со временем и не является космологической постоянной (о ТЭ см. [20, 21]).

## Список литературы

1. Горбунов Д С, Рубаков В А *Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва* (М.: ЛЕНАНД, 2016); Пер. на англ. яз.: Rubakov V A, Gorbunov D S *Introduction to the Theory of the Early Universe: Hot Big Bang Theory* (Hackensack, NJ: World Scientific, 2017)
2. Горбунов Д С *УФН* **184** 545 (2014); Gorbunov D S *Phys. Usp.* **57** 503 (2014)
3. Krivonos R A et al. *Phys. Rev. Lett.* **133** 261002 (2024) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.261002>
4. Abe K et al. (Super-Kamiokande Collab., T2K Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **134** 011801 (2025) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.011801>
5. Dai X et al. *Nat. Commun.* **16** 329 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55588-x>
6. Wang Z, Hazzard K R A *Nature* **637** 314 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08262-7>
7. Zhang N J et al. *Nature* **637** 327 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08274-3>
8. Рубаков В А *УФН* **169** 1299 (1999); Rubakov V A *Phys. Usp.* **42** 1193 (1999)
9. Боос Э Э и др. *УФН* **195** 116 (2025); Boos E E et al. *Phys. Usp.* **68** (2) (2025) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.12.039820>
10. Yang Y A et al. *Nat. Photon.* **19** 89 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41566-024-01555-3>
11. Breitweiser S A et al. *Nano Lett.* **24** 16253 (2024) <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c04112>
12. Першин С М и др. *Письма в ЖЭТФ* **121** 93 (2025); [http://jetpletters.ru/ps/2492/article\\_36555.shtml](http://jetpletters.ru/ps/2492/article_36555.shtml)
13. Попов С Б, Постнов К А, Пширков М С *УФН* **188** 1063 (2018); Popov S B, Postnov K A, Pshirkov M S *Phys. Usp.* **61** 965 (2018)
14. Nimmo K et al. *Nature* **637** 48 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08297-w>
15. Сильченко О К *УФН* **195** 188 (2025); Sil'chenko O K *Phys. Usp.* **68** (2) (2025) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.11.039810>
16. Рубаков В А, Тиняков П Г *УФН* **178** 785 (2008); Rubakov V A, Tinyakov P G *Phys. Usp.* **51** 759 (2008)
17. Волкова В Е, Миронов С А *УФН* **195** 172 (2025); Volkova V E, Mironov S A **68** (2) (2025) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.12.039826>
18. Постнов К А, Порайко Н К, Пширков М С *УФН* **195** 154 (2025); Postnov K A, Porayko N A, Pshirkov M S *Phys. Usp.* **68** (2) (2025) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.11.039812>
19. Adame A G et al. (DESI Collab.), arXiv:2411.12022, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.12022>
20. Лукаш В Н, Рубаков В А *УФН* **178** 301 (2008); Lukash V N, Rubakov V A *Phys. Usp.* **51** 283 (2008)
21. Рубаков В А *УФН* **184** 137 (2014); Rubakov V A *Phys. Usp.* **57** 128 (2014)