

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВОСТИ ФИЗИКИ В СЕТИ INTERNET: ФЕВРАЛЬ 2025
(по материалам электронных препринтов)

Ю.Н. Ерошенко

PACS numbers: 01.10.-m, 01.30.-y, 01.90.+g

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.02.039860>

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 v_s с массами порядка кэВ [1, 2]. В работе исследователей из ИКИ РАН, ИЯИ РАН и МФТИ выполнен новый поиск распадной линии v_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 распадом v_s , не обнаружено. Это позволило получить новые жёсткие ограничения на угол смешивания v_s и ширину их распада. Хотя пока всё ещё остаётся небольшая область допустимых параметров, ограничения уже вплотную приблизились к тому, чтобы закрыть простейшие модели v_s как основного компонента тёмной материи.

2. Совместный анализ данных по осцилляциям нейтрино. В то время как некоторые параметры нейтриноных осцилляций уже достаточно точно измерены, другие пока остаются неопределёнными. Коллаборации T2K и Супер-Камиоканда 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-Камиоканда. Измеряемые T2K разности квадратов масс (в зависимости от упорядочивания) и угол смешивания δ_{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-Камиоканда для атмосферных нейтрино, прошедших через Землю и испытавших резонансное усиление осцилляций. Подобный взаимодополняющий анализ T2K и Супер-Камиоканда показал, что сохранение CP -инвариантности в осцилляциях нейтрино исключено на уровне 1.9σ , а обратный порядок масс исключается на уровне 1.2σ . 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 Δ 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 Δ . Х. 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

4. Нестандартная квантовая статистика. Как правило, частицы подчиняются квантовой статистике Ферми–Дирака или Бозе–Эйнштейна и соответственно называются фермионами или бозонами. Исключение составляет эйонная 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 эйонами 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 Джейна. 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}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 азотзамещенных вакансиях в алмазе (в NV-центрах) [11]. Эксперимент выполнялся при комнатной температуре методом спектроскопии с динамической связкой. 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 слагаемое в гамильтониане 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" OH-полосы комбинационного рассеяния, а также резонансов Мандельштама – Бриллюзона 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 OH-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 стоксовой компоненты даёт скорость звука в среде вокруг наночастиц ~ 2900 м с $^{-1}$. 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 Беларусь, имеет важное значение, в частности для криогенных биотехнологий.

9. Локализация источника быстрого радиоспленеска (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 недородностях космической среды на уровне зрения. В спектре FRB 20221022A10, полученному 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 Ly α 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

- 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)
- Горбунов Д С УФН **184** 545 (2014); Gorbunov D S *Phys. Usp.* **57** 503 (2014)
- Krivonos R A et al. *Phys. Rev. Lett.* **133** 261002 (2024) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.133.261002>
- Abe K et al. (Super-Kamiokande Collab., T2K Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **134** 011801 (2025) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.011801>
- Dai X et al. *Nat. Commun.* **16** 329 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55588-x>
- Wang Z, Hazzard K R A *Nature* **637** 314 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08262-7>
- Zhang N J et al. *Nature* **637** 327 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08274-3>
- Рубаков В А УФН **169** 1299 (1999); Rubakov V A *Phys. Usp.* **42** 1193 (1999)
- 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>
- Yang Y A et al. *Nat. Photon.* **19** 89 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41566-024-01555-3>
- Breitweiser S A et al. *Nano Lett.* **24** 16253 (2024) <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c04112>
- Першин С М и др. *Письма в ЖЭТФ* **121** 93 (2025); http://jetpletters.ru/ps/2492/article_36555.shtml
- 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)
- Nimmo K et al. *Nature* **637** 48 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08297-w>
- 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>
- Рубаков В А, Тиняков П Г УФН **178** 785 (2008); Rubakov V A, Tinyakov P G *Phys. Usp.* **51** 759 (2008)
- Волкова В Е, Миронов С А УФН **195** 172 (2025); Volkova V E, Mironov S A *Phys. Usp.* **68** (2) (2025) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2024.12.039826>
- 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>
- Adame A G et al. (DESI Collab.), arXiv:2411.12022, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.12022>
- Лукаш В Н, Рубаков В А УФН **178** 301 (2008); Lukash V N, Rubakov V A *Phys. Usp.* **51** 283 (2008)
- Рубаков В А УФН **184** 137 (2014); Rubakov V A *Phys. Usp.* **57** 128 (2014)