

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВОСТИ ФИЗИКИ В СЕТИ INTERNET: МАРТ 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.2025.02.039866>

1. Протяжённость волнового пакета нейтрино. Нейтрино сложно регистрировать из-за малого сечения взаимодействия, но это же обстоятельство позволяет нейтрино длительное время сохранять квантовую когерентность — до тех пор, пока не произойдёт пространственное расхождение волновых пакетов, соответствующих разным массовым состояниям, что должно сопровождаться декогеренцией и затуханием нейтринных осцилляций [1]. Поэтому вопрос о размере волнового пакета имеет важное значение для физики нейтрино. Ранее в экспериментах с реакторными нейтрино были получены лишь слабые ограничения (> 21 пм) на размер волнового пакета нейтрино. J. Smolksy (Горная школа Колорадо, США) и соавторы получили новое прямое ограничение [2]. Их экспериментальная установка включала ядра ${}^7\text{Be}$, внедрённые в верхний слой танталовой плёнки одиночного сверхпроводящего туннельного перехода, который использовался в качестве датчика с высоким разрешением по энергии (~ 1 эВ). При температуре 0,1 К наблюдались 4 пика, соответствующих захвату e^- с K- и L-оболочек, и измерялась энергетическая ширина дочернего ядра отдачи, испускаемого при радиоактивном распаде ${}^7\text{Be}$. В результате было получено ограничение снизу на размер волнового пакета — 6,2 пм (на три порядка больше размера ядра). Некоторые аномалии, наблюдавшиеся в реакторных нейтринных экспериментах, ранее пытались объяснить малым размером волнового пакета нейтрино, однако новое ограничение практически исключает такую гипотезу.

2. Перемещение по замкнутой кривой времени. В Общей теории относительности формально существуют математические решения, включающие замкнутые времениподобные кривые, по которым объекты могут попадать в своё прошлое. Примерами является метрика чёрных дыр с угловым моментом и метрика Гёделя (вселенная с вращением). Однако, как считалось, при пролёте по временной петле должны возникать логические противоречия — парадоксы путешественника во времени. L. Gavassino (Вандербильтский университет, США) выполнил новый анализ данной проблемы в аксиально-симметричной вселенной гёделевского типа с точки зрения стандартной квантовой механики [3]. Было показано, что система, перемещаемая по замкнутой петле времени, подвергается спонтанной квантовой дискретизации и в процессе пролёта происходит обращение энтропийной стрелы времени. Энтропия в итоге уменьшается до её первоначального значения, и система возвращается к исходному состоянию. Это подразумевает, например, что воспоминания наблюдателя внутри космического корабля, перемещающегося по петле времени, обязательно стираются к концу путешествия. Данная концепция близка к предлагавшемуся И.Д. Новиковым (АКЦ ФИАН) "принципу самосогласованности". Таким образом, в квантовом случае удаётся избежать логических противоречий для случая перемещений по замкнутым временным линиям.

3. Двухфотонное туннелирование Ландау – Зинера – Штюкельберга – Майораны (ЛЗШМ). Слабые непертурбативные квантово-механические эффекты за пределами основного порядка обычно с трудом поддаются теоретическому анализу из-за невозможности применить теорию возмущений. Один из таких эффектов — туннелирование ЛЗШМ, наблюдаемое в ряде явлений физики твёрдого тела и в других физических ситуациях. Исследователи из Университета Аалто (Финляндия) I. Björkman, M. Kuzmanović и G.S. Paraoanu изучили двухфотонное туннелирование ЛЗШМ в слабоангармоничном трансмонном кубите [4]. Наблюдение эффектов высших порядков в этой системе удаётся благодаря тому, что процессы первого порядка оказываются крайне слабыми. Переход из основного состояния кубита во второе возбуждённое состояние, минуя первое, осуществлялся с помощью двухфотонного фазомодулированного импульса. Наблюдался перенос населённости уровня на 98 %. Преимущество данного подхода заключается в высокой стабильно-

сти квантовых переходов, что важно для управления процессами квантовой динамики.

4. Нейтрино высоких энергий. С помощью нейтринного телескопа KM3NeT, расположенного в Средиземном море, зарегистрировано нейтрино рекордно высокой энергии, источником которого, вероятно, является блазар — галактика с активным ядром и джетом, направленным почти точно на нас [5]. При взаимодействиях нейтрино вблизи подводных детекторов рождаются мюоны, создающие каскады заряженных частиц, и наблюдается излучение Вавилова – Черенкова. В событии от 13 февраля 2023 г., получившем номер KM3-230213A, обнаружен мюон с энергией 120^{+110}_{-60} ПэВ, летящий в почти горизонтальном направлении, а энергия соответствующего нейтрино ~ 220 ПэВ в 30 раз больше максимальной энергии, регистрировавшейся в эксперименте IceCube. Энергетический спектр нейтрино быстро спадает, поэтому нейтрино KM3-230213A, скорее всего, возникло по иному механизму, чем нейтрино меньших энергий. В пределах области локализации KM3-230213A находятся 12 блазаров. Указанием на конкретный источник нейтрино могут служить транзитные события, и ранее уже была установлена связь некоторых событий IceCube с радиовспышками на блазарах [6, 7]. Радиотелескопом RATAN-600, работающим в САО РАН, также была зафиксирована вспышка на блазаре PMN J0606-0724, находящемся в направлении нейтринного события KM3-230213A, а максимум вспышки совпал по времени с приходом нейтрино, причём вероятность случайного совпадения составляет всего 0,26 % [8]. Таким образом, этот блазар является вероятным источником нейтрино. Одним из возможных объяснений KM3-230213A остаются также космогенные нейтрино, предсказанные В.С. Березинским и Г.Т. Зацепиным в 1969 г. Они рождаются при взаимодействии космических лучей сверхвысокой энергии с фоновыми фотонами.

5. Сверхмассивная чёрная дыра (СМЧД) в Большом Магеллановом Облаке (БМО). Некоторые звёзды в гало нашей Галактики движутся с высокими скоростями (> 1000 км с^{-1}) по траекториям, которые уводят их в межгалактическое пространство. Одним из путей образования сверхбыстрых звёзд является механизм Дж. Хилла: захват одной из звёзд двойной системы СМЧД и выброс второй звезды с высокой скоростью. J.J. Nap (Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики, США) и соавторы по данным телескопов Хаббла и Gaia выполнили новый расчёт траекторий высокоскоростных звёзд спектрального класса В и показали, что наиболее вероятным местом вылета половины звёзд является не центр Галактики, а БМО [9]. При этом масса СМЧД в БМО, отвечающей за выброс звёзд, составляет $\sim 6 \times 10^5 M_\odot$ — почти на порядок меньше массы СМЧД в центре Галактики. Такая модель также хорошо воспроизводит наблюдаемую кластеризацию высокоскоростных звёзд в созвездии Льва за счёт наличия дополнительного буста скорости при движения БМО вокруг Галактики.

Список литературы

1. Akhmedov E, Smirnov A Y J. *High Energy Phys.* **2022** 82 (2022)
2. Smolksy J et al. *Nature* **638** 640 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08479-6>
3. Gavassino L *Class. Quantum Grav.* **42** 015002 (2024) <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ad98df>
4. Björkman I, Kuzmanović M, Paraoanu G S *Phys. Rev. Lett.* **134** 060602 (2025) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.060602>
5. Aiello S et al. (The KM3NeT Collab.) *Nature* **638** 376 (2025) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08543-1>
6. Plavin A, Kovalev Yu Y, Kovalev Yu A, Troitsky S *Astrophys. J.* **894** 101 (2020)
7. Троицкий С В *УФН* **194** 371 (2024); Troitsky S V *Phys. Usp.* **67** 349 (2024)
8. Adriani O et al. (KM3NeT Collab., MessMapp Group, Fermi-LAT Collab., Owens Valley Radio Observatory 40-m Telescope Group, SVOM Collab.), arXiv:2502.08484, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.08484>
9. Han J J et al., arXiv:2502.00102, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.00102>; submitted to *Astrophys. J.*

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