

**1. Когерентное упругое рассеяние нейтрино на аргоне.** При когерентном упругом рассеянии нейтрино испытывает взаимодействие одновременно со всеми нуклонами ядра (с ядром в целом) посредством Z-бозона с малой передачей импульса ядру (см. обзор [1]). Ранее уже наблюдалось когерентное упругое рассеяние нейтрино на ядрах цезия и йода. Коллаборацией COHERENT в Окриджской национальной лаборатории (США) впервые измерено сечение когерентного упругого рассеяния нейтрино на более лёгких ядрах аргона [2]. Это позволило проверить предсказываемую в Стандартной модели зависимость сечения от числа нейтронов в ядре  $\propto N^2$ . Сосуд с 24 кг жидкого атмосферного аргона просматривался двумя фотоумножителями. В сосуд направлялись нейтрино от распадов пионов и мюонов, рождавшихся на протонном ускорителе. За 18 месяцев наблюдений было зарегистрировано 159 событий взаимодействия нейтрино. Полученное сечение  $(2,2 \pm 0,7) \times 10^{-39} \text{ см}^2$  соответствует расчётам в рамках Стандартной модели, а нестандартных взаимодействий на достигнутом уровне точности не обнаружено. Детекторы, работающие на основе регистрации когерентного упругого рассеяния нейтрино, возможно, найдут применения в дистанционном мониторинге ядерных реакторов. В эксперименте COHERENT принимают участие российские исследователи из ИТЭФ, МИФИ и МФТИ.

**2. Пограничное фермиевское стекло.** Большой интерес в физике конденсированного состояния представляют системы, в которых сильное взаимодействие между частицами сочетается с высоким уровнем неупорядоченности. Такие системы отчасти описываются теорией ферми-жидкостей Ландау и теорией локализации Андерсона. В 1970 г. Андерсон предложил название "фермиевские стёкла" для неупорядоченных систем, способных адиабатически переводиться в состояние андерсоновского изолятора. Ф. Mahmood (Университет Джона Хопкинса, США) и соавторы методом 2D когерентной терагерцовой спектроскопии исследовали фермиевское стекло Si:P (кремний, допированный фосфором) в виде пластин толщиной 100 мкм вблизи фазового перехода металл – диэлектрик со стороны диэлектрического состояния [3]. Наблюдались оптические отклики на последовательность сильных электрических импульсов терагерцового диапазона, и были измерены времена релаксации и когерентности. Несмотря на неупорядоченность системы, в ней зарегистрированы когерентные возбуждения и сильное фотонное эхо. Вопреки ожиданиям, время релаксации по энергии увеличивалось с возрастанием температуры. Был сделан вывод, что эффект локализации Андерсона не имеет места для электронных волн в Si:P. Авторы работы предлагают называть новое состояние "пограничным фермиевским стеклом" (marginal Fermi glass). О сильнокоррелированных системах см. в [4].

**3. Ион в бозе-эйнштейновском конденсате.** Т. Dieterle (Штутгартский университет, Германия) и соавторы исследовали движение единичного иона в конденсате Бозе–Эйнштейна атомов  $^{87}\text{Rb}$  [5]. Для получения медленного иона один из атомов конденсата с помощью последовательности сфокусированных лазерных импульсов переводился в высоковозбуждённое ридберговское состояние. На конечном этапе производилась ионизация атома с помощью электрического импульса, за которым сразу следовал импульс той же формы, но противоположной полярности. Это позволило получить ион с малой начальной скоростью. С помощью электродов можно было создавать электрическое поле с точностью до  $300 \text{ мкВ см}^{-1}$ , приводящее ион в движение, отслеживаемое в течение

десятков мкс, пока ион не покидал газ. Ион взаимодействовал с окружающими атомами посредством заряд-дипольного потенциала, значительно превышающего по величине взаимодействие нейтральных атомов, в результате чего траектория иона случайным образом возмущалась с характерной частотой в десятки кГц. Для набора статистики данный эксперимент был повторён 50 раз с тем же самым ансамблем атомов. Измерения показали, что ион быстро выходил на режим диффузионного движения, и была измерена подвижность иона в конденсате. О бозе-эйнштейновских конденсатах см. [6, 7].

**4. Стабильность алмаза при сжатии.** А. Lazicki (Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса, США) и соавторы методом рентгеновской дифракции исследовали структуру алмаза при лазерном сжатии до давления в 20 млн атмосфер (2 ТПа) [8]. Применялась методика замедленного ударного сжатия при лазерном нагреве мишени, благодаря чему образец не подвергается резкому нагреву и плавлению. Лазерный импульс, вызывающий сжатие образца, одновременно испарял находящуюся рядом фольгу с генерацией яркого квазимонохроматического рентгеновского излучения. Это позволило с наносекундной точностью синхронизировать сжатие и дифракционные рентгеновские измерения. Теоретические расчёты предсказывали, что в области  $\sim 2$  ТПа обычный алмаз с кубической гранцентрированной решёткой должен трансформироваться в кубическую объёмноцентрированную или в две простые кубические модификации. Однако в описываемом эксперименте дифракционные пики, соответствующие этим модификациям, не наблюдались. Это означает, что обычный алмаз остаётся метастабильным при сжатии. Возможной причиной столь высокой стабильности является наличие большого числа сильных межатомных  $sp^3$ -связей углерода. О свойствах алмаза см. в [9–12]. Давление 2 ТПа более чем в пять раз превышает давление в центре Земли. Исследования свойств углерода при больших давлениях могут помочь в понимании внутренней структуры обнаруженных недавно богатых углеродом экзопланет [13].

**5. Модификация жидкого кристалла.** Н. Mandoor (Колорадский университет, США) и его коллеги исследовали модификацию жидкого кристалла (ЖК) при добавлении в него коллоидного раствора дискообразных частиц диаметром 1,2–2,2 мкм и толщиной 10 нм [14]. Исходный ЖК имел обычную структуру из стержнеобразных частиц. После добавления дисков у ЖК появилась возможность фазовых переходов в различные состояния, включая одноосное и моноклинное, свойствами которых можно управлять с помощью изменения температуры и магнитного поля. ЖК изучался по флуоресцентному излучению дисков методом 3D визуализации. При повышении температуры наблюдался необычный переход из менее упорядоченного состояния в более упорядоченное. Возможность управления свойствами ЖК может найти полезные технические применения. Похожее поведение модифицированного ЖК было воспроизведено с помощью математического моделирования. О ЖК с примесями см. в [15].

**6. Автономное исправление квантовых ошибок.** Исправление ошибок квантовых операций имеет принципиальное значение для создания квантовых компьютеров. J.M. Gertler (Массачусетский университет в Амхерсте, США) и соавторы продемонстрировали в эксперименте новую методику коррекции, названную "автономным исправлением квантовых ошибок" [16]. В основе этой методики лежит слежение за чётностью числа заполнения квантовых состояний. Если в результате ошибки будет потеряна одна частица, то нечётный набор станет чётным и наоборот. Специальный квантовый оператор (оператор синдрома ошибки) отслеживает чётность и при её изменении добавляет потерянную частицу к набору. Эта методика

была реализована на многофотонном состоянии кота Шрёдингера в сверхпроводящем резонаторе в системе двух частотных гребёнок. Резонатор находился в контакте со вспомогательным трансмонным кубитом, применяемым для пассивного мониторинга состояния, основанного на диссипации. В отличие от активных методов исправления квантовых ошибок, требующих периодического мониторинга системы, новый способ позволяет исправлять ошибки по мере их появления. Было показано, что применение этого метода увеличивает время когерентности кубита в два раза.

**7. Суперпозиция квантовых коммуникационных каналов.** Одной из главных проблем коммуникационных каналов, через которые происходит обмен квантовой информацией, является декогеренция квантовых состояний из-за шумов. Решить данную проблему помогает использование нескольких, как минимум двух, каналов, между которыми возможна квантовая суперпозиция. Ранее эффективность такой методики уже была продемонстрирована в экспериментах. G. Rubino (Европейская лаборатория Фудзицу, Великобритания) и соавторы выполнили новый эксперимент. Ими проведено сравнение различных способов суперпозиции квантовых траекторий при различных типах шумов [17]. Эксперимент с поляризацией фотонов выполнялся в интерферометре Маха – Цендера, а шумы вносились с помощью жидкокристаллических волновых пластин. Было установлено, что оптимальной схемой для передачи информации с минимальными потерями и максимальной защитой является та, где имеется суперпозиция квантовых траекторий в связке с квантово-контролируемыми операциями в каналах. Метод суперпозиции траекторий требует для своей работы значительно меньшей затраты ресурсов, чем существующие методы коррекции квантовых ошибок в коммуникационных каналах. О квантовых технологиях см. в [18, 19].

**8. Голубые джеты в стратосфере.** Голубыми джедами называются редкие электрические разряды в форме голубых струй, уходящие с верхней части грозовых облаков вверх, в стратосферу. Многие характеристики этого явления оставались неизвестными из-за сложности их наблюдения с поверхности Земли. С борта Международной космической станции выполнены исследования пяти голубых вспышек над Тихим океаном длительностью примерно 10 мкс [20]. Одна из голубых вспышек сопровождалась пульсирующим голубым джетом, достигавшим стратосферы — границы между стратосферой и ионосферой на высоте 50–55 км. Вместе со вспышками наблюдались "эльфы" — светящиеся расширяющиеся кольца в ионосфере. В формировании голубых джетов главную роль играют лидеры — проводящие каналы, которые возникают в момент электрического пробоя в воздухе между заряженными слоями. Спектрометром на МКС был измерен спектр лидеров в красной области. Собственное излучение лидеров достаточно слабое, но они инициируют вспышки и голубые джеты, создаваемые локализованными стримерными волнами ионизации в стратосфере. Об исследовании молний см. в [21–25].

**9. Центральный объект в шаровом скоплении NGC 6397.** На основе наблюдений движения звёзд в шаровом звёздном скоплении NGC 6397 ранее делался вывод о том, что в его центре находится чёрная дыра промежуточной массы ( $600 \pm 200$ )  $M_{\odot}$ . (О чёрных дырах промежуточной массы см. [26]). Однако E. Vitral и G.A. Mamon, выполнив новое исследование [27], показали, что в центре NGC 6397, скорее всего, находится не одна чёрная дыра, а скопление компактных объектов (белых карликов, нейтронных звёзд и чёрных дыр звёздных масс) с общей массой (1000–2000)  $M_{\odot}$  и радиусом в несколько процентов от радиуса всего скопления. Этот вывод был сделан на основе динамических моделей и изучения движения звёзд в NGC 6397 с помощью космического телескопа Хаббла, спектрографа MUSE на телескопе комплекса VLT и данных космической обсерватории Gaia. Вероятно, в процессе релаксации наиболее массивные чёрные дыры осели к центру скопления, образовав динамически обособленную подсистему. Столкновения компактных объектов в подобных шаровых скоплениях могут давать вклад в гравитационно-волновые события, отмечаемые интерферометрами LIGO/Virgo [28].

**10. Время жизни квазара.** Наличие в центрах большинства современных галактик сверхмассивных чёрных дыр [29–31] свидетельствует о том, что галактики на ранней стадии своей эволюции могли проходить через стадию квазара, когда центральная чёрная дыра интенсивно поглощала газ и в аккреционном диске высвечивалась большая энергия. Однако детали этих процессов до конца не ясны. Предполагается, что началом квазарной стадии могли быть слияния

галактик, сопровождаемые приливными гравитационными силами, направляющими потоки газа на чёрные дыры. Также интересен вопрос о том, как долго длилась квазарная стадия эволюции галактик. I.S. Khrykin (Токийский университет, Япония) и соавторы определили распределение квазаров по их временам активности [32]. С помощью телескопа Хаббла у 24 квазаров на красных смещениях  $2,7 \leq z \leq 3,9$  измерялись радиусы областей, в которых газ был заметно ионизован излучением квазаров. Используя эти данные, путём численного моделирования и решения уравнений переноса ионизирующего излучения можно оценить время активной фазы квазара. Получено, что распределение квазаров по временам их жизни имеет лог-нормальный вид, а среднее время активности квазара составляет 1–3 млн лет. Исследование квазаров важно для выяснения механизмов образования сверхмассивных чёрных дыр. Излучение квазаров могло также влиять на ионизацию и тепловую историю межгалактического газа.

## Список литературы

1. Акимов Д Ю и др. *УФН* **189** 173 (2019); Akimov D Yu et al. *Phys. Usp.* **62** 166 (2019)
2. Akimov D et al. *Phys. Rev. Lett.* **126** 012002 (2021); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.012002>
3. Mahmood F et al. *Nature Physics*, онлайн-публикация от 12 января 2021 г.; <https://doi.org/10.1038/s41567-020-01149-0>
4. Кучинский Э З, Некрасов И А, Садовский М В *УФН* **182** 345 (2012); Kuchinskii E Z, Nekrasov I A, Sadovskii M V *Phys. Usp.* **55** 325 (2012)
5. Dieterle T et al. *Phys. Rev. Lett.* **126** 033401 (2021); <https://arxiv.org/abs/2007.00309>
6. Пятаевский Л П *УФН* **176** 345 (2006); Pitaevskii L P *Phys. Usp.* **49** 333 (2006)
7. Каган М Ю, Турлапов А В *УФН* **189** 225 (2019); Kagan M Yu, Turlapov A V *Phys. Usp.* **62** 215 (2019)
8. Lazicki A et al. *Nature* **589** 532 (2021); <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03140-4>
9. Савватимский А И, Онуфриев С В *УФН* **190** 1085 (2020); Savvatimskii A I, Onufriev S V *Phys. Usp.* **63** 1015 (2020)
10. Бражкин В В *УФН* **190** 561 (2020); Brazhkin V V *Phys. Usp.* **63** 523 (2020)
11. Филоненко В П и др. *УФН* **189** 217 (2019); Filonenko V P et al. *Phys. Usp.* **62** 207 (2019)
12. Екимов Е А, Кондрин М В *УФН* **189** 208 (2019); Ekimov E A, Kondrin M V *Phys. Usp.* **62** 199 (2019)
13. Маров М Я, Шевченко И И *УФН* **190** 897 (2020); Marov M Ya, Shevchenko I I *Phys. Usp.* **63** 837 (2020)
14. Munday H et al. *Nature* **590** 268 (2021); <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03249-0>
15. Арансон И С *УФН* **189** 955 (2019); Aranson I S *Phys. Usp.* **62** 892 (2019)
16. Gertler J M et al. *Nature* **590** 243 (2021); <https://arxiv.org/abs/2004.09322>
17. Rubino G et al. *Phys. Rev. Research* **3** 013093 (2021); <https://arxiv.org/abs/2007.05005>
18. Трушечкин А С и др. *УФН* **191** 93 (2021); Trushechkin A S et al. *Phys. Usp.* **64** (1) (2021)
19. Молотков С Н *УФН* **176** 777 (2006); Molotkov S N *Phys. Usp.* **49** 750 (2006)
20. Neubert T et al. *Nature* **589** 371 (2021); <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03122-6>
21. Иудин Д И и др. *УФН* **188** 850 (2018); Iudin D I et al. *Phys. Usp.* **61** 766 (2018)
22. Гуревич А В, Зыбин К П *УФН* **171** 1177 (2001); Gurevich A V, Zybin K P *Phys. Usp.* **44** 1119 (2001)
23. Соснин Э А и др. *УФН* **191** 199 (2021); Sosnin E A et al. *Phys. Usp.* **64** (2) (2021)
24. Бабич Л П *УФН* **190** 1261 (2020); Babich L P *Phys. Usp.* **63** 1188 (2020)
25. Бабич Л П *УФН* **189** 1044 (2019); Babich L P *Phys. Usp.* **62** 976 (2019)
26. Фабрика С Н и др. *УФН* **176** 339 (2006); Fabrika S N et al. *Phys. Usp.* **49** 324 (2006)
27. Vitral E, Mamon G A *Astron. Astrophys.* **646** A63 (2021); <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039650>
28. Райтге Д *УФН* **187** 884 (2017); Reitze D H *Phys. Usp.* **60** 823 (2017)
29. Долгов А Д *УФН* **188** 121 (2018); Dolgov A D *Phys. Usp.* **61** 115 (2018)
30. Иванов П Б и др. *УФН* **189** 449 (2019); Ivanov P B et al. *Phys. Usp.* **62** 423 (2019)
31. Черепашук А М *УФН* **186** 778 (2016); Cherepashchuk A M *Phys. Usp.* **59** 702 (2016)
32. Khrykin I S et al., <https://arxiv.org/abs/2102.04477>