

1. "Закон сохранения информации" в квантовой механике. При слабых квантовых измерениях, когда квантовое состояние не разрушается, происходит перераспределение информации о квантовом состоянии (information trade-off). Информация сохраняется, разделяясь на извлечённую информацию, на информацию, соответствующую возмущению измеряемой системы, и на обратимую информацию, с помощью которой квантовое состояние может быть восстановлено. В ряде экспериментов исследовалась связь между парами указанных информационных каналов. В теоретической работе S.-W. Lee, J. Kim, и H. Nha в 2021 г. было выведено соотношение, связывающее сразу три канала. Это тройное соотношение впервые проверено в эксперименте S. Hong (Корейский институт науки и техники, Южная Корея) и соавторов [1]. Эксперимент проводился с фотонами лазерного излучения в квантово запутанных состояниях, проходящих через интерферометры с тремя оптическими путями и представляющих квантовые ячейки с тремя возможными состояниями ("кутрить"). Квантовая томография состояний подтвердила тройное соотношение, согласно которому квантовая информация сохраняется, перераспределяясь без потерь. Полученные результаты о "законе сохранения информации" важны как для проверки принципиальных положений квантовой механики, так и могут оказаться полезными в квантовых вычислениях и устройствах квантовой коммуникации.

2. Гравитационное красное смещение на субмиллиметровом расстоянии. Эффект гравитационного красного смещения (замедления времени в гравитационном поле), описываемый Общей теорией относительности, ранее был проверен как в наблюдениях спектров космических объектов, так и в лабораторных экспериментах вплоть до расстояния 30 см. В новом эксперименте T. Bothwell (Колорадский университет, США) и соавторов удалось измерить гравитационное красное смещение на расстоянии менее миллиметра [2]. Используемые в эксперименте атомные часы действовали на основе переходов в атомах ^{87}Sr . Спин-поляризованные атомы, охлаждённые до 100 нК, были захвачены в одномерную оптическую решётку, ориентированную вдоль направления гравитационного поля. Решётка находилась внутри резонатора, в котором волновые фронты обладали высокой однородностью, что позволило уменьшить требуемую плотность облачка атомов. В эксперименте удалось достичь рекордно длительного времени оптической когерентности атомов в 37 с. Облачко атомов, представляющих атомные часы, одновременно служило измеряемой системой. Оно разделялось по вертикали на две нескоррелированные части, расстояние между центрами которых составляло меньше одного мм. Удалось измерить разность частоты переходов в двух частях облачка с точностью $7,6 \times 10^{-21}$, что на порядок лучше,

чем в предшествующих экспериментах. Замедление хода времени в нижнем облачке по сравнению с верхним точно соответствовало разности гравитационных потенциалов на разных высотах. Ожидается, что точность данной методики измерений можно будет значительно повысить и применить её для исследования и других фундаментальных эффектов.

3. Нелинейный эффект Мейснера. Измерение длины проникновения магнитного поля в сверхпроводник λ важно для понимания процессов сверхпроводимости, так как λ связана с распределением квазичастиц и свойствами энергетической щели. В так называемых узловых сверхпроводниках λ является линейной функцией температуры T . Теоретически предсказывалось, что λ может зависеть также от величины магнитного поля H . Этот эффект, названный "нелинейным эффектом Мейснера", до сих пор надёжно не наблюдался. J. A. Wilcox (Бристольский университет, Великобритания) и соавторы выполнили новые исследования [3] и впервые с большой достоверностью зарегистрировали нелинейный эффект Мейснера в узловых сверхпроводниках CeCoIn_5 и LaFePO . Образцы помещались в медный соленоид, колебания в котором возбуждались генератором на основе туннельного диода, и измерялся электромагнитный отклик. Для CeCoIn_5 и LaFePO было получено, что с ростом H зависимость от λ от T становится слабее — в точном согласии с теоретическими предсказаниями. В эксперименте исследовался также сверхпроводник KFe_2As_2 , но для него наблюдалась обратная зависимость, что связано, вероятно, с неузловым состоянием KFe_2As_2 .

4. Топологические краевые солитоны. Топологическими изоляторами называют системы, которые благодаря наличию топологически защищённых краевых состояний являются диэлектриками в своём объёме, но проводниками на поверхности. Фотонные топологические изоляторы, в которых свет распространяется только по краям образца, могут показывать сильнонелинейный отклик. Одним из интересных проявлений нелинейности является образование краевых солитонов, наследующих топологическую защиту краевых состояний. Эти солитоны имеют вид нелинейных возбуждений, распространяющихся без искажения вдоль границы изолятора. Краевые солитоны ранее уже наблюдались в экспериментах, но лишь в условиях слабой нелинейности и только для единичных солитонных мод. В новом эксперименте, выполненном Я.В. Карташовым (Институт спектроскопии РАН и Барселонский институт науки и техники, Испания) и его соавторами из МГУ, ВШЭ и из Испании, наблюдалось сосуществование в топологическом изоляторе краевых солитонов двух различных типов [4]. Изучался одномерный массив из нескольких тройных (параллельных) волноводов, созданных лазерной гравировкой в кварцевом стекле. Эта система имела краевые топологические состояния с различной структурой и две топологические щели. При воздействии лазерных импульсов за счёт нелинейностей происходило возбуждение солитонов, причём впервые наблюдались топологические соли-

тоны в нелинейной системе с более чем одной топологической щелью. В топологическом изоляторе можно было возбуждать преимущественно фазированные или нефазированные топологические солитоны либо одновременно оба типа солитонов.

5. Детектор частиц тёмной материи. Хотя тёмной материи (ТМ) во Вселенной в несколько раз больше, чем обычного барионного вещества, природа ТМ пока не выяснена. Согласно одной из наиболее популярных гипотез, ТМ состоит из элементарных частиц нового типа. Однако попытки зарегистрировать эти частицы пока не привели к успеху (результаты эксперимента DAMA, в которых наблюдается годовая модуляция сигнала, не получили независимого подтверждения). Если частицы ТМ имеют очень слабое негравитационное взаимодействие с обычным веществом, ниже порога чувствительности существующих детекторов, то для их регистрации, возможно, потребуются детекторы нового вида. В работающих сейчас детекторах ищется взаимодействие частиц ТМ с единичными ядрами или электронами в атомах. Исследователи из Йельского университета и Берклиевской национальной лаборатории G. Afek, D. Carney и D.C. Moore выполнили новые расчёты и представили теоретическое обоснование работы детектора, в котором предлагается искать импульсы отдачи макроскопических, но достаточно малых объектов при рассеянии на них частиц ТМ [5]. В общем виде эта идея была предложена в работе В.Ф. Шварцмана, В.Б. Брагинского, С.С. Герштейна, Я.Б. Зельдовича и М.Ю. Хлопова в 1982 г. для регистрации массивных нейтрино [6]. В [5] рассмотрен вариант такого детектора, допускающий реализацию на основе имеющихся сейчас технологий. Предлагается использовать массив диэлектрических сфер (например, из оксида кремния) нанометрового масштаба, подвешенных (левитирующих) в оптическом поле. Для регистрации сигналов потребуется проводить мониторинг движения центров масс сфер. Расчёт показал, что ожидаемый сигнал может превышать уровень фоновых событий. При массах сфер порядка фемтограммов этот детектор позволит приблизиться к стандартному квантовому пределу измерений и зарегистрировать частицы ТМ с массами от 10 кэВ — в области масс, недоступной для имеющихся детекторов. А для сфер с массами в аттограммы можно ожидать даже более сильного когерентного рассеяния, т.е. квантового взаимодействия частиц ТМ сразу со всей сферой, а не с отдельными составляющими её атомами. По направлению импульса отдачи можно будет определять направление прилёта частицы ТМ, и одним из свидетельств взаимодействия с ТМ могут стать суточные модуляции направления импульса отдачи.

6. Рекордная радиогалактика. Длина релятивистских струй (джетов), выбрасываемых из ядер радиогалактик, может на два порядка превосходить размер самих галактик. На концах джетов часто имеются радиолопасти — гигантские области излучающего газа, возникающие при торможении джетов в межгалактическом газе. Вероятным механизмом образования джетов являются магнитогидродинамические процессы вблизи сверхмассивных чёрных дыр. Радиогалактики, полный размер которых со струями и лопастями превышает 0,7–1 Мпк, называются гигантскими радиогалактиками. В наблюдениях, проведённых с помощью интерферометрической сети радиотелескопов LOFAR, обнаружена и исследована уникальная гигантская радиогалактика, названная Алкионом (Alcyoneus) [7]. Её общий размер с джетами и радиолопастями составляет 5 Мпк — это рекордно большая из известных структур, созданных единичной галактикой. В то же время размер

самой галактики, её низкочастотная светимость, масса звёздной компоненты и масса центральной чёрной дыры $((4 \pm 2) \times 10^8 M_{\odot})$ являются типичными для всех радиогалактик или даже несколько меньшими средних величин. Это указывает на то, что для формирования длинных джетов важны внешние факторы — вероятнее всего, состояние межгалактической среды. Джет достигает большой длины, если он слабо тормозится в газе с низкой плотностью. Галактика Алкионой, действительно, не входит в скопления галактик, а находится в нити (филаменте) крупномасштабной структуры с малой плотностью.

7. Новые ограничения на чёрные дыры из наблюдений микролинзирования. Эффект гравитационного линзирования основан на отклонении лучей света, проходящих вблизи массивного объекта. В наблюдениях "микролинзирования" ведётся поиск изменения наблюдаемой яркости звёзд, свет которых испытал гравитационное линзирование на компактных объектах, таких как чёрные дыры, находящихся на луче зрения. В последние десятилетия выполнялось несколько программ по поиску микролинзирования. Т. Blaineau (Университет Париж-Сакле, Франция) и соавторы, анализируя совместно данные проектов EROS-2 и MACHO, полученные за 10,6 лет, получили новые ограничения на количество объектов-линз в диапазоне масс 10–1000 масс Солнца в гало нашей Галактики [8]. Этими объектами могли бы быть в том числе первичные чёрные дыры, образовавшиеся в ранние догалактические эпохи. Проводился мониторинг светимости 14,1 млн звёзд Большого Магелланова Облака. Большие массы объектов-линз соответствуют кривым блеска звёзд с более медленным изменением яркости. Вариации яркости могли быть следствием переменности звёзд или статистических погрешностей, поэтому в большинстве случаев нельзя достоверно сказать, что произошло микролинзирование. После применения критериев отбора осталось только два события-кандидата на гравитационное микролинзирование. Путём сравнения с ожидаемым числом событий получено, что тёмные объекты с массами 10–100 M_{\odot} , которые могли бы служить линзами, составляют не более 15 % массы гало Галактики, а объекты с массой $\sim 1000 M_{\odot}$ составляют не более 50 %. Эти результаты практически исключают возможность того, что вся тёмная материя состоит из первичных чёрных дыр звёздных масс. Тем не менее если бы первичные чёрные дыры составляли всего 0,1–1 % массы тёмной материи в гало, то темп их слияний в парах находился бы на уровне, достаточном для объяснения всплесков гравитационных волн, наблюдавшихся интерферометрами LIGO/Virgo (кроме всплесков с участием нейтронных звёзд).

Список литературы

1. Hong S et al. *Phys. Rev. Lett.* **128** 050401 (2022); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.050401>
2. Bothwell T et al. *Nature* **602** 420 (2022); <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04349-7>
3. Wilcox J A et al. *Nat. Commun.* **13** 1201 (2022); <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28790-y>
4. Kartashov Y V et al. *Phys. Rev. Lett.* **128** 093901 (2022); <https://arxiv.org/abs/2203.04576>
5. Afek G, Carney D, and Moore D C *Phys. Rev. Lett.* **128** 101301 (2022); <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.101301>
6. Шварцман В Ф и др., *Письма в ЖЭТФ* **36** 224 (1982); Shvartsman V et al. *JETP Lett.* **36** 277 (1982); <http://jetpletters.ru/ps/1334/article.20164.shtml>
7. Oei M S S L et al., <https://arxiv.org/abs/2202.05427>
8. Blaineau T et al., <https://arxiv.org/abs/2202.13819>