

1. Гравитационное красное смещение в малых масштабах. Замедление хода времени в гравитационном поле, называемое гравитационным красным смещением, является одним из главных предсказаний Общей теории относительности (ОТО). Этот эффект измерялся не только для космических объектов, но и в лабораторных экспериментах. В частности, в 2022 г. с помощью спектроскопии Раби был измерен градиент хода времени на миллиметровых масштабах в ультрахолодном газе атомов ^{87}Sr , игравших роль высокоточных атомных часов. X. Zheng (Висконсинский университет в Мадисоне, США) и соавторы выполнили похожий эксперимент, но с использованием сразу пяти ансамблей атомов ^{87}Sr в вертикальной оптической решётке, расположенных через равные расстояния 2,5 м [1]. С помощью рамзеевской спектроскопии сравнивались атомные частоты одновременно во всех парах ансамблей. Для исключения погрешностей, связанных с ожидаемым исходом измерений, применялся "слепой" метод обработки данных. Измеренный в результате относительный градиент сдвига частоты $[-12,4 \pm 0,7(\text{стат.}) \pm \pm 2,5(\text{сист.})] \times 10^{-19} \text{ см}^{-1}$ совпадает с предсказанием ОТО. Релятивистская геодезия, использующая локальные измерения градиентов гравитационного поля, представляет новые возможности в поиске полезных ископаемых и для других практических применений.

2. Когерентность твердотельных кубитов. Квантовые кубиты на основе спиновых дефектов в кристаллической решётке могут применяться, например, в квантовых сенсорах, гироскопах и ячейках памяти. Как правило, считывание информации и управление спином ядра в решётке осуществляется с помощью спинов соседних локализованных электронов, взаимодействующих через уровни сверхтонкого расщепления. Однако это взаимодействие, а также квадрупольные и другие возмущения ограничивают время квантовой когерентности твердотельных кубитов на уровне ~ 150 мкс. Увеличение времени когерентности, являющееся одной из важнейших задач, достигается, в частности, с помощью спинового эха, воздействующего на ядерные спины и приводящего к самокомпенсации помех. G. Wang (Массачусетский технологический институт, США) и соавторы усовершенствовали данный метод, применяя несбалансированное спиновое эхо, влияющее на вспомогательные спины электронов, причём для компенсации использовались характеристики не одной, а разных шумовых помех [2]. В эксперименте с ансамблем из 10^{10} NV-центров в алмазе (азото-замещённых вакансий) с помощью нового метода удалось в 20 раз увеличить время когерентности при комнатной температуре. О современных квантовых технологиях см. [3 – 6].

3. Топологическая защита на основе нелинейных состояний дисклинации. Топологически защищённые состояния на гранях или в углах образцов представляют большой интерес ввиду своей устойчивости к различного рода воздействиям [7, 8]. Одной из возможностей является создание оптических топологических состояний на дисклинациях — деформациях в кристалле, нарушающих осевую симметрию. Ранее такие топологические состояния изучались только в режиме линейной оптики. Группой исследователей из Сианьского университета Цзяотун (Китай), Института спектроскопии РАН, Высшей школы экономики и МГУ впервые продемонстрированы топологические состояния на дисклинациях в нелинейном режиме, когда проходящее излучение существенно изменяет оптические свойства среды и за счёт этого испытывает обратное влияние [9]. Эксперимент выполнен в волноводных решётках с пятиугольными и семиугольными дисклинационными ядрами, создаваемыми фемтосекундным лазером в кварцевом стекле, где топологические состояния возникали на границе полого ядра дисклинации. Авторы работы полагают, что подобные нелинейные топологические состояния могут создаваться

также в бозе-эйнштейновских и поляритонных конденсатах, фотонных кристаллах и других системах.

4. Кольца Алисы в конденсате Бозе–Эйнштейна. В теориях Великого объединения предсказывается существование одномерных структур, названных нитями Алисы, при обходе вокруг которых элементарные частицы должны превращаться в античастицы (для неподвижного наблюдателя). Подобные нити могли возникать в ранней Вселенной при фазовых переходах. Аналоги нитей Алисы наблюдались в сверхтекучих жидкостях и в жидких кристаллах. А. Blinova (Амхерст-колледж и Массачусетский университет в Амхерсте, США) и соавторы впервые наблюдали замкнутые нити Алисы в виде колец в бозе–эйнштейновском конденсате атомов ^{87}Rb в оптической ловушке [10]. Магнитное поле, создаваемое с помощью катушек Гельмгольца, приводило к образованию сингулярных вихревых точек (монополей), несущих топологические заряды и превращающихся в кольца Алисы. После выключения потенциала ловушки облачко конденсата расширялось в магнитном поле и наблюдалось абсорбционным методом, позволившем выявить кольца Алисы. Предполагается, что в конденсатах Бозе–Эйнштейна можно будет наблюдать также превращение топологических монополей в антимонполи.

5. Реионизация Вселенной. Когда наша Вселенная имела возраст в несколько сотен млн лет, в ней появились источники излучения, вызвавшего реионизацию нейтрального водорода. Источниками могли быть первые галактики (излучение их звёзд) или чёрные дыры в активных ядрах галактик, но точный вывод о природе источников сделать не удавалось. Н. Atek (Парижский институт астрофизики, Франция) и соавторы выполнили исследование, которое проливает свет на данный вопрос и подтверждает гипотезу о ранних галактиках как причине реионизации Вселенной [11]. Изучалось сильное гравитационное линзирование галактик скоплением Abell 2744, находящимся на луче зрения. Путём комбинации данных телескопа им. Дж. Уэбба и телескопа им. Хаббла обнаружены сразу восемь галактик со спектроскопическим подтверждением на красном смещении $z \sim 7$. Они имеют молодое звёздное население, производящее мощное УФ-излучение — как раз такое, какое требуется для завершения реионизации Вселенной к $z \sim 6$. При этом впервые было выполнено прямое спектроскопическое измерение эффективности излучения ионизирующих фотонов, оказавшейся в четыре раза больше, чем предполагалось ранее.

Список литературы

1. Zheng X et al. *Nat. Commun.* **14** 4886 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40629-8>
2. Wang G et al. *Phys. Rev. Lett.* **131** 043602 (2023) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.043602>
3. Сукачёв Д Д *УФН* **191** 1077 (2021); Sukachev D D *Phys. Usp.* **64** 1021 (2021)
4. Вожаков В А и др. *УФН* **192** 457 (2022); Vozhakov V A et al. *Phys. Usp.* **65** 421 (2022)
5. Хабарова К Ю, Заливако И В, Колачевский Н Н *УФН* **192** 1305 (2022); Khabarova K Yu, Zalivako I V, Kolachevsky N N *Phys. Usp.* **65** 1217 (2022)
6. Фёдоров А К, Киктенко Е О, Хабарова К Ю, Колачевский Н Н "Квантовая запутанность, телепортация и случайность: Нобелевская премия по физике 2022 года" *УФН* **193** (11) (2023) <https://doi.org/10.3367/UfNr.2023.06.039412>; Fedorov A K, Kiktenko E O, Khabarova K Yu, Kolachevsky N N "Quantum entanglement, teleportation and randomness: Nobel prize in physics of 2022" *Phys. Usp.* **66** (11) (2023) <https://doi.org/10.3367/UfNe.2023.06.039412>
7. Тарасенко С А *УФН* **188** 1129 (2018); Tarasenko S A *Phys. Usp.* **61** 1026 (2018)
8. Квон З Д и др. *УФН* **190** 673 (2020); Kwon Z D et al. *Phys. Usp.* **63** 629 (2020)
9. Ren B et al. *Light Sci. Appl.* **12** 194 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01235-x>
10. Blinova A et al. *Nat. Commun.* **14** 5100 (2023) <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40710-2>
11. Atek H et al., arXiv:2308.08540, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.08540>