

1. Поиск эффектов квантовой гравитации в наблюдениях нейтрино. Теория квантовой гравитации, призванная объединить гравитационное поле с другими фундаментальными взаимодействиями, пока полностью не построена [1, 2], но уже ведутся поиски её возможных экспериментальных проявлений. Одним из перспективных направлений является исследование космологических нейтрино, приходящих от далёких галактик. Флуктуации пространства-времени, описываемые квантовыми операторами различного порядка, могли бы за время пути вызывать заметные аномалии в нейтринных осцилляциях. Таким образом, нейтрино представляют собой гигантский интерферометр космологического масштаба. По набранной статистике наблюдений телескоп IceCube недавно впервые достиг области параметров, где можно заметить вклад операторов 6-го порядка в осцилляции космологических нейтрино [3]. IceCube содержит массив фотоумножителей на глубинах 1450–2450 м во льду Антарктиды, просматривающих объём 1 км^3 . Взаимодействия нейтрино разных ароматов (электронного, мюонного и тау-нейтрино) с атомами создают потоки вторичных частиц, по свойствам которых можно определить ароматы нейтрино. Зарегистрировано множество событий с энергиями нейтрино более 60 ТэВ с различными ароматами. Эти наблюдения сравнивались с результатами численного моделирования спектров нейтрино, образующихся в астрофизических источниках и испытавших осцилляции. К настоящему времени эффекты квантовой гравитации в осцилляциях нейтрино не выявлены, однако отрицательный результат позволил получить новые ограничения на параметры теории.

2. Тройные квантовые корреляции. Проверка принципиальных положений квантовой механики остаётся одной из актуальных тем исследований, особенно в связи с новыми направлениями в квантовых технологиях. В квантовой механике помимо запутанных квантовых состояний двух частиц возможны тройные или трёхсторонние (англ. tripartite-entangled states) квантовые корреляции сразу трёх частиц, не имеющие классических аналогов. Теоретический анализ показал, что тройные корреляции нельзя свести к нескольким двойным корреляциям. Н. Сао (Научно-технический университет Китая) и соавторы получили новую, более строгую, форму критерия для проверки этого утверждения [4]. Критерий, напоминающий неравенства Белла, применим к различным модификациям квантовой механики. Н. Сао и др. провели эксперимент, в котором указанная проверка успешно осуществлена. Эксперимент выполнялся с фотонами лазерного излучения в состояниях Гринбергера–Хорна–Цайлингера. На уровне достоверности $26,3\sigma$ показано, что тройные корреляции не сводятся к скрытым переменным или к комбинации так называемых "экзотических двойных корреляций", а являются фундаментальной формой квантовых корреляций. Лазерные технологии, аналогичные использованным в данном эксперименте, находят широкое применение в устройствах квантовой коммуникации и в квантовых вычислениях (см., например, [5–7]).

3. Электронная оптика в графене. Линейный вид дисперсионного соотношения электронов в монослое графена позволяет управлять движением электронов методами, похожими на методы классической оптики. В частности, ранее было продемонстрировано, что потоки электронов, проходящие через р–п-переход в графене, могут быть коллимированы с помощью эффекта туннелирования Клейна, а также могут испытывать преломление в процессе линзирования Веселаго в веществе с отрицатель-

ными диэлектрической и магнитной проницаемостями [8]. Однако эффективность коллимации и фокусировки оставалась низкой. Последнее, в частности, препятствовало реализации контролируемой квантовой интерференции электронов. Х. Zhang (Миннесотский университет, США) и соавторы разработали новую архитектуру биполярной графеновой микрополости, в которой удаётся решить указанные проблемы с помощью деформации графена и определённых электростатических потенциалов [9]. Комбинация этих воздействий создаёт несколько последовательных процессов линзирования Веселаго. Таким путём удалось локализовать электроны и повысить общую эффективности коллимации. Данная методика может оказаться полезной в создании новых электрооптических устройств, осуществляющих управляемую квантовую интерференцию. О графеновой электронике см. [10, 11].

5. Необычный кольцевой радиоисточник. Алгоритмы машинного обучения позволяют обнаруживать астрономические объекты с необычными свойствами, остававшиеся незамеченными в гигантских каталогах при их обычной обработке. В частности, набор алгоритмов Astronomaly хорошо зарекомендовал себя при поиске оптических транзитов и галактик с уникальной морфологией. М. Lochner (Университет Западно-Капской провинции и Южноафриканская астрономическая обсерватория) и соавторы применили Astronomaly для обработки обзора MeerKAT Galaxy Cluster Legacy Survey (MGCLS), включающего ~ 720000 радиоисточников [12]. Обзор был составлен в основном с помощью расположенного в ЮАР радиотелескопа MeerKAT — прототипа телескопов класса SKA площадью 1 км^2 . С помощью Astronomaly в скоплении галактик Abell 209 обнаружен уникальный кольцеобразный радиоисточник размером 75 кпк и светимостью $10^{25} \text{ Вт Гц}^{-1}$, сопоставимой со светимостью мощных радиогалактик. Источник расположен рядом с галактикой на красном смещении $z = 0,55$, окружённой диффузной оболочкой. Рядом с ней находятся структуры, похожие на радиоструи и радиолопасти. Кольцевой объект мог появиться в результате воздействия ударной волны после прекращения активного звездообразования в галактике. Он также мог быть образован выбросами вещества от мощной радиогалактики или от пары сливающихся сверхмассивных чёрных дыр. Однако существующие модели не могут пока полностью объяснить наблюдаемую структуру источника. Этот источник отдалённо напоминает радиокруги, обнаруженные недавно радиоинтерферометром ASKAP, происхождение которых пока тоже остаётся невыясненным.

Список литературы

1. Горелик Г Е *УФН* **175** 1093 (2005); Gorelik G E *Phys. Usp.* **48** 1039 (2005)
2. Казаков Д И *УФН* **189** 387 (2019); Kazakov D I *Phys. Usp.* **62** 364 (2019)
3. Abbasi R et al. (The IceCube Collab.) *Nat. Phys.* **18** 1287 (2022)
4. Cao H et al. *Phys. Rev. Lett.* **129** 150402 (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** (12) (2022) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2022.10.039270>
6. Сукачёв Д Д *УФН* **191** 1077 (2021); Sukachev D D *Phys. Usp.* **64** 1021 (2021)
7. Жёлтиков А М, Скалли М О *УФН* **190** 749 (2020); Zheltikov A M, Scully M O *Phys. Usp.* **63** 698 (2020)
8. Веселаго В Г *УФН* **92** 517 (1967); Veselago V G *Sov. Phys. Usp.* **10** 509 (1968)
9. Zhang X et al. *Nat. Commun.* **13** 6711 (2022)
10. Ратников П В, Силин А П *УФН* **188** 1249 (2018); Ratnikov P V, Silin A P *Phys. Usp.* **61** 1139 (2018)
11. Антонова И В *УФН* **192** 609 (2022); Antonova I V *Phys. Usp.* **65** 567 (2022)
12. Lochner M et al., arXiv:2211.02062, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02062>