

1. Присутствие частицы в плечах интерферометра. Следствием корпускулярно-волнового дуализма в квантовой механике является то, что частица проходит сразу через оба плеча интерферометра. Н. Lemmel (Венский технический университет, Австрия, и Институт Лауэ – Ланжевена, Франция) и соавторы выполнили новый эксперимент с целью прояснить физический смысл данного утверждения на уровне отдельных частиц (без статистического усреднения) [1]. Применялся интерферометр Маха – Цендера, через который пропускались спин-поляризованные нейтроны от реактора в Институте Лауэ – Ланжевена (Гренобль, Франция). В одном из плечей интерферометра был установлен соленоид, вызывающий поворот спина нейтрона (вносящий дополнительную фазу в его волновую функцию). Пути нейтрона сходились в сплиттере, а на выходе перед одним из двух детекторов помещался второй соленоид, способный компенсировать сдвиг фазы. По величине требуемой компенсации можно судить о прохождении нейтрона через плечо интерферометра, содержащее соленоид. Тем самым спин нейтрона играл роль пробного кубита, с помощью которого можно было выполнять слабые квантовые измерения, характеризующие прохождение нейтрона через конкретное плечо с сохранением интерференционной картины. Результаты измерений описывались в терминах величины "присутствия" нейтрона в плече. Понятие присутствия основывается на работах М. Ozawa (2003) и М. J. W. Hall (2004), посвящённых точности квантовых измерений (близкие идеи были высказаны В.Б. Брагинским и Ф. Я. Халили в 1992 г. [2], см. также [3]), а указанный метод компенсации фазы был предложен Н.Ф. Hofmann (2021). При разных величинах вращения спина и разных углах компенсации фазы были измерены величины присутствия нейтронов в плечах, которые различались из-за несимметричности сплиттера. Основным выводом данного эксперимента, полностью укладывающимся в стандартную интерпретацию квантовой механики, является факт присутствия нейтрона как индивидуального объекта сразу в обоих плечах интерферометра даже в том случае, когда метод компенсации показывал, что на нейтрон было оказано частичное воздействие в одном конкретном плече — в том, где установлен соленоид. Иначе можно сказать, что имеет место частичное прохождение целого нейтрона через каждое плечо в соответствии с величиной присутствия нейтрона в этом плече.

2. Квантовые вычисления на массиве нейтральных атомов. В настоящее время развивается сразу несколько подходов к созданию квантовых компьютеров, основанных на квантовых логических ячейках (кубитах) различного типа. В одном из перспективных направлений кубитами служат электронные состояния нейтральных атомов. М. D. Lukin (Гарвардский университет, США) и его коллеги продемонстрировали квантовые операции на массиве нейтральных атомов, причём атомы в их эксперименте могли перемещаться в пространстве для установления новых когерентных связей между кубитами [4]. Атомы ^{87}Rb были захвачены в двумерную оптическую решётку, а квантовая информация кодировалась в уровнях сверхтонкого расщепления. Для осуществления той или иной операции часть массива атомов с помощью "оптического пинцета" передвигалась в новые положения, где атомы взаимодействовали с другими атомами. Этот квантовый процессор позволил создать состояние кластера и состояние кода Стаина на 7 кубитах. Были реализованы состояния поверхностного кода с 13 кубитами данных и 6 вспомогательными (ancilla) кубитами и состояния кода на торе с 16 и 8 кубитами. Также были проведены измерения энтропии квантовой запутанности. Эксперимент с массивом нейтральных атомов в оптической решётке был выполнен также Т.М. Graham (Висконсинский университет в Мадисоне, США) с соавторами [5]. Ими были получены состояния Гринбергера – Хорна – Цайлингера на основе 2–6 кубитов и продемонстрирован алгоритм оценки фазы.

3. Гибридная система механического резонатора и кубита. В ряде экспериментов уже были продемонстрированы квантовые свойства макроскопических механических объектов. Вызывает большой интерес использование механических степеней свободы в сочетании с кубитами в квантовых вычислениях. Сложность практической реализации таких гибридных систем (механический резонатор + кубит) заключается в поддержании достаточно большого времени когерентности кубитов и механических резонаторов при объединении их в единое устройство. Y. Chu (Швейцарская высшая техническая школа Цюриха) и соавторы продемонстрировали новую гибридную систему из резонатора объёмной акустической волны, помещённого поверх сверхпроводящего трансмонного кубита на чипе [6]. Акустические колебания возбуждались с помощью пьезоэлектрического преобразователя. Наблюдались вакуумные осцилляции Раби между кубитом и фоновыми модами. Система обладает значительно большим временем когерентности по сравнению с предыдущими устройствами, что позволило достичь режима сильной дисперсии, когда

имеется заметный сдвиг частоты резонатора и кубита. Это дало возможность переводить систему в требуемые фоковские состояния с определённым числом фононов. Одним из главных достижений стало измерение чётности числа фононов с помощью всего лишь одного измерения без необходимости определять распределение фононов. Это важно, в частности, для исправления ошибок квантовых вычислений, так как скачок чётности является простым индикатором наличия ошибки. О квантовых чётностях см. [7].

4. Кроссовер Келдыша в изоляторе Мотта. Изоляторы Мотта представляют собой вещества, в которых электроны в частично заполненной зоне находятся в состоянии коллективной локализации за счёт сильного кулоновского отталкивания, что создаёт энергетическую щель и делает эти вещества диэлектриками. В переменном электрическом поле в изоляторах Мотта наблюдались переходы металл – изолятор, нелинейная генерация гармоник и другие интересные явления. При увеличении параметра Келдыша выше единичности механизма рождения пар квазичастиц дублон – холон должен изменяться от туннелирования к мультифотонному поглощению. Расчёты методом Ландау – Дыхне [8] показали, что этот переход должен иметь вид кроссовера, однако ранее кроссовер не наблюдался из-за экспериментальных сложностей. В эксперименте X. Li (Калифорнийский технологический институт, США) и соавторов проблемы были преодолены и впервые был зарегистрирован кроссовер Келдыша [9]. Методом ультрабыстрой широкополосной оптической спектроскопии исследовался многозонный изолятор Мотта Ca_2RuO_4 , в котором возможно рождение пар даже при слабом поле 100 В см^{-1} . Под воздействием лазерного импульса длительностью менее 100 фс происходило резкое уменьшение отражательной способности, которая затем восстанавливалась по экспоненциальному закону. В случае энергии фотонов в импульсе 0,3 эВ при повышении напряжённости поля сверх $0,07 \text{ В А}^{-1}$ имел место переход от степенной зависимости темпа рождения пар дублон – холон к зависимости порогового типа, что с высокой точностью соответствует теории кроссовера Келдыша.

5. Изображение чёрной дыры Sgr A*. В 2019 г. с помощью Телескопа горизонта событий, представляющего собой глобальную сеть из восьми радиотелескопов, было впервые получено изображение сверхмассивной чёрной дыры (ЧД) в галактике M87, называемое также тенью ЧД [10]. Коллаборация Телескопа горизонта событий 12 мая 2022 г. представила новый результат — первое изображение ЧД Sgr A*, находящейся в центре нашей Галактики [11]. Sgr A* в 2000 раз ближе, чем ЧД в M87, но в 1500 раз менее массивная, поэтому угловые размеры этих ЧД примерно одинаковы. Однако наблюдать изображение ЧД в нашей Галактике значительно сложнее из-за быстрых вариаций радиоизлучения, связанных с малым радиусом ЧД. Кроме того, на луче зрения по направлению Sgr A* в Галактике имеется турбулентная плазма, размывающая изображение на больших длинах волн. В связи с этим для получения изображения Sgr A* потребовалось больше времени и вычислительных ресурсов. Тень ЧД возникает благодаря эффекту гравитационного линзирования — отклонения лучей света в гравитационном поле ЧД. Источником света в наблюдавшихся двух случаях служили яркие области аккреционных дисков. Из-за разного наклона дисков изображение Sgr A* выглядит несколько иначе, чем у M87, — наряду со светящимся кольцом, окружающим область тени, имеются три ярких пятна. Наблюдение тени ЧД Sgr A* позволило выполнить проверку и ограничить параметры ряда альтернативных теорий гравитации [12]. Было показано, что характеристики тени ЧД Sgr A* полностью соответствуют предсказаниям Общей теории относительности Эйнштейна.

Список литературы

- Lemmel H et al. *Phys. Rev. Research* **4** 023075 (2022); arXiv:2202.00272
- Braginsky V B, Khalili F Ya *Quantum Measurement* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992)
- Халили Ф Я *УФН* **186** 1059 (2016); Khalili F Ya *Phys. Usp.* **59** 968 (2016)
- Bluvstein D et al. *Nature* **604** 451 (2022)
- Graham T M et al. *Nature* **604** 457 (2022)
- von Lipke U et al. *Nat. Phys.* (2022) <https://doi.org/10.1038/s41567-022-01591-2>
- Сукачев Д Д *УФН* **191** 1077 (2021); Sukachev D D *Phys. Usp.* **64** 1021 (2021)
- Карнаков Б М, Мур В Д, Попруженко С В, Попов В С *УФН* **185** 3 (2015); Karnakov B M, Mur V D, Popruzenko S V, Popov V S *Phys. Usp.* **58** 3 (2015)
- Li X et al. *Phys. Rev. Lett.* **128** 187402 (2022)
- Докучаев В И, Назарова Н О *УФН* **190** 627 (2020); Dokuchaev V I, Nazarova N O *Phys. Usp.* **63** 583 (2020)
- Bower G C (Project Scientist) for the Event Horizon Telescope Collab. (May 2022), https://iopscience.iop.org/journal/2041-8205/page/Focus_on_First_Sgr_A_Results
- Vagnozzi S et al., arXiv:2205.07787