

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВОСТИ ФИЗИКИ В СЕТИ INTERNET
(по материалам электронных препринтов)

Ю.Н. Ерошенко

PACS number: 01.10.-m, 01.30.-y, 01.90.+g

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.12.039136>

1. Тетранейтрон. Т. Faestermann (Мюнхенский технический университет, Германия) и соавторы выполнили эксперимент [1], в котором, возможно, впервые наблюдалось связанное состояние четырёх нейтронов — тетранейтрон 4n . Его поиски (вместе с 2n и 3n) велись с 1960-х годов, и были получены некоторые указания на появление событий-кандидатов 4n , однако эти результаты оставались неоднозначными. В новом эксперименте пучок ионов ${}^7Li^-$, получаемый на ускорителе в Гархинге (Германия), направлялся на мишень из оксида 7Li_2O , напылённого на литиевую фольгу, и исследовались реакции ${}^7Li({}^7Li, {}^{10}C){}^4n$. С помощью проволочного пропорционального счётчика и массива кремниевых детекторов изучался энергетический спектр вылетающих под углами 6–9,5° ядер ${}^{10}C$. Со статистической значимостью 3σ был обнаружен пик, который можно интерпретировать как ядро ${}^{10}C$ в первом возбуждённом состоянии и 4n с энергией связи 0,42(16) МэВ и временем полураспада 450 с. Пока нельзя исключать и альтернативное объяснение, в котором четыре вылетающих нейтрана не связаны, однако авторы работы оценивают эту возможность как менее вероятную, поскольку наблюдаемый пик в спектре значительно выше, чем он должен быть в этом случае. Ранее реакция ${}^7Li({}^7Li, {}^{10}C){}^4n$ изучалась также в Курчатовском институте [2], но при больших энергиях, что не позволило выявить наличие связанного состояния 4n .

2. Квантовая спиновая жидкость в искусственном кристалле. Состояние квантовой спиновой жидкости (КСЖ), предсказанное теоретически Ф. Андерсоном в 1973 г., ранее уже наблюдалось в обычных веществах. G. Semeghini (Гарвардский университет, США) и соавторы создали искусственный двумерный кристалл из 219 атомов ${}^{87}Rb$, удерживаемых в оптической решётке, и продемонстрировали наличие в нём КСЖ [3]. Решётка состояла из комбинации треугольников и шестиугольников, а взаимодействием атомов можно было управлять с помощью эффекта ридберговской блокады. Тем самым, эта система представляла собой программируемый квантовый симулятор, различные варианты которых уже применялись для исследования квантовых эффектов. Методом флуоресцентной визуализации наблюдались цепочки, вдоль которых между соседними атомами происходили взаимодействия — возникали димерные связи. Состояние КСЖ появлялось, когда димеров становилось в четыре раза больше, чем мономеров. Этот эффект был предсказан в работе R. Verresen, M.D. Lukin и A. Vishwanath в 2020 г. [4]. КСЖ может оказаться полезной для создания топологических кубитов.

3. Исследование FeSe/SrTiO₃. Монослой FeSe толщиной в три атома на подложке SrTiO₃ обладает рядом интересных свойств: температура его сверхпроводящего перехода в пять раз выше, чем для объёмных образцов, и он имеет рекордную среди сверхпроводников на основе железа ширину сверхпроводящей щели [5]. Не объяснённой до конца особенностью спектра FeSe/SrTiO₃ являются также повторные пики (replica bands) в спектре фотоэмиссии, которые могут быть связаны со сверхпроводимостью. Были предложены две модели повторных пиков: рассеяние вперёд 3d-электронов железа на фононах в SrTiO₃ и потеря энергии фотоэлектронами при их взаимодействии с поверхностными фононами. С. Liu и соавторы выполнили новые исследова-

ния SrTiO₃ методом фотоэлектронной эмиссии с угловым разрешением и поляризованным пучком фотонов от синхротронного источника [6]. Выбор направления поляризации позволяет выделить и исследовать определённые участки электронных зон вещества и уменьшить влияние фона от других участков. Наблюдались повторные пики высших порядков и измерена их относительная амплитуда. Амплитуда имеет большую величину, чем считалось ранее, и зависит от орбитальных направлений. Две указанные модели по отдельности не могут полностью объяснить эти данные. Возможно, что повторные пики возникают в результате комбинации двух или большего числа механизмов.

4. Движение экситонов в тонких слоях полупроводника. Слои полупроводников толщиной в несколько атомов важны для применений в наноэлектронике [7]. Их оптоэлектронные свойства в значительной мере определяются поведением экситонов — связанных систем электронов и дырок. Но экситоны электрически нейтральны, поэтому ими сложно управлять с помощью электрического поля. Недавно начал развиваться метод управления движением экситонов путём создания в веществе механически деформированных областей. Обычно изменение энергии экситонов при деформации приводит к тому, что они перемещаются из областей с низкой механической напряжённостью в области с большой напряжённостью. R. Rosati (Марбургский университет, Германия) и соавторы исследовали экситоны в монослоях WS₂ и WSe₂ путём наблюдения фотолюминесценции с пространственным и временным разрешением [8]. Неожиданно оказалось, что наблюдаемые в WS₂ и WSe₂ экситоны движутся в противоположном направлении по сравнению с ожидаемым, причём их скорость достигала рекордной величины 1 мкм за 0,8 нс. Авторы выполнили детальное теоретическое исследование и пришли к выводу, что это связано с наличием в монослоях противоположного потока "тёмных экситонов", которые напрямую не наблюдаются, но влияют на свойства светлых экситонов. Взаимодействие светлых экситонов с тёмными приводит к сдвигу их энергии в механически напряжённом полупроводнике в обратном направлении, что изменяет направление движения. Контрольный эксперимент с MoSe₂ подтверждает данное объяснение: в MoSe₂ светлые экситоны движутся в "правильную" сторону, так как уровни энергии тёмных экситонов в MoSe₂ расположены выше уровней светлых и взаимодействие слабое.

5. Негауссова оптомеханика. Прогресс в экспериментальной технике позволил в последние годы исследовать квантовые свойства оптомеханических систем на уровне отдельных фотонов и фононов. В новом эксперименте с оптомеханическим микрорезонатором G. Enzian (Имперский колледж Лондона, Оксфордский университет и Копенгагенский университет) и соавторы наблюдали негауссовые неклассические распределения в фазовом пространстве резонатора, возникающие при изменении чисел заполнения на один или несколько фононов [9]. Резонатор представлял собой кристалл BaF₂, у которого резонансная механическая частота равнялась разности двух соседних оптических частот. С помощью лазера накачки резонатор возбуждался на нижней оптической частоте при комнатной температуре, и затем в антистоксовом процессе возбуждение передавалось на более высокие частоты и в звуковые волны. С помощью гетеродинного детектирования были охарактеризованы конечные квантовые состояния системы. Было обнаружено, что при изменении чисел заполнения фононов тепловое

распределение становится негауссовым. Процессы негауссности в оптомеханике важны для функционирования сверхчувствительных сенсоров. О квантовой оптомеханике см. [10].

6. Объективные теории коллапса волновой функции. В квантовой механике существует проблема измерения — вопрос о том, как детерминированное уравнение Шрёдингера соглашается со случайным результатом измерения квантового состояния (см., например, [11–13]). В борновской и некоторых других интерпретациях квантовой механики квантовая случайность при измерении полагается как один из фундаментальных постулатов. Однако продолжаются попытки построения альтернативных теорий, в которых исход квантового измерения объясняется некоторыми динамическими процессами. Эти теории называются "объективными теориями коллапса" волновой функции (objective collapse theories). Подобные механизмы обычно требуют введения поправок к уравнению Шрёдингера, что даёт принципиальную возможность проверки этих теорий. Группой исследователей из Амстердамского университета (Нидерланды) и Института теоретической физики твёрдого тела (Дрезден, Германия) исследованы свойства теорий объективного коллапса и сделан вывод, что допускаемая ими эволюция квантовой системы должна быть обязательно нелинейной [14]. L. Mertens и соавторы продемонстрировали этот результат на примере двухуровневой квантовой системы. В частности, они сформулировали минимальную нелинейную теорию, которая воспроизводит правила Борна для амплитуд квантовых вероятностей. О некоторых принципиальных положениях квантовой механики см. [15, 16].

7. Квантовая стрела времени. Большинство фундаментальных законов физики остаются неизменными при замене направления времени на противоположное. В связи с этим возникает вопрос о том, как природа выбирает конкретное направление физической эволюции [17]. Одним из популярных подходов является термодинамическая стрела времени, в котором направление времени определяется направлением роста энтропии (увеличением беспорядочности). Однако для малых систем, имеющих квантовые свойства, возможна суперпозиция состояний с ростом и уменьшением энтропии, что размывает понятие термодинамической стрелы времени. G. Rubino, G. Manzano и C. Brukner показали [18], что, несмотря на указанную суперпозицию, можно ввести понятие о термодинамической стреле времени на квантовом уровне, если дополнительно измерять диссипативную работу $W_{\text{diss}} = W - \Delta F$ (обычная работа минус разность свободных энергий), связанную с суммарным производством энтропии. В зависимости от соотношения этой величины и температуры T выбирается то или иное направление, соответствующее классическому понятию о стреле времени. При $W_{\text{diss}}/(k_B T) \gg 1$ выбирается одно направление, а при $W_{\text{diss}}/(k_B T) \ll -1$ — другое. Однако если $W_{\text{diss}}/(k_B T) \sim 1$, то два направления интерферируют. В этом случае для флуктуаций W нет классического (не квантового) аналога.

8. Квантовая теорема о несогласии. В 1976 г. Р. Ауманн в рамках классической теории вероятностей доказал теорему (теорема Ауманна о несогласии), утверждающую, что два субъекта при определённых условиях не смогут договориться о том, чтобы не соглашаться друг с другом. P. Contreras-Tejada (Институт математических наук, Испания) и соавторы обобщили эту теорему на случай квантовых событий и доказали её справедливость в двух видах: в формулировке, напоминающей формулировку классической теоремы, и через задание последовательности оценок субъектами взаимных убеждённостей [19]. Таким образом, теорема Ауманна о несогласии может считаться общим физическим принципом, справедливым и в классическом, и в квантовом случае. Данный принцип важен, в частности, тем, что он помогает быстро исключать некоторые теории, призванные обобщить квантовую механику.

9. Галактика без тёмной материи. Ультрадиффузными галактиками называют относительно большие галактики с низкой поверхностной яркостью. Наблюдения показали, что по крайней мере некоторые из них могут иметь малое содержание тёмной материи — значительно меньше, чем

обычные галактики с той же суммарной массой звёзд. P.E. Mancera Piña (Гронингенский университет и Нидерландский институт радиоастрономии) и соавторы с помощью Сверхбольшой антенной решётки (VLA) радиотелескопов им. К. Янского изучили кинематику ещё одной подобной галактики AGC 114905 [20] с в $\sim 2,5$ раза лучшим пространственным разрешением, чем в предшествующих наблюдениях. Установлено, что характер движения газового диска в галактике можно описать гравитационным полем только обычной барионной материи без необходимости наличия в гало тёмной материи. Происхождение галактик с малым количеством или отсутствием тёмной материи пока остаётся загадкой. Возможно, имело место столкновение галактик и приливное гравитационное обдиранье внешних слоёв [21]. В выжившей при обдирании центральной части галактики может преобладать барионная материя. Также рассматривался приливный нагрев, ведущий к расширению звёздных орбит.

10. Чёрная дыра в карликовой галактике. M.J. Bustamante-Rosell (Техасский университет в Остине, США) и её коллеги измерили массу чёрной дыры (ЧД) в карликовой сфероидальной галактике Лев I, находящейся в Местной группе галактик на расстоянии 820 тыс. св. лет от Солнца [22]. Использовались как ранее полученные данные, так и результаты новых наблюдений с помощью спектрографа VIRUS-W на 2,7-метровом телескопе Обсерватории Мак-Доналд. Дисперсия скоростей звёзд в пределах углового расстояния $75''$ от центра составляет $11,76 \pm 0,66 \text{ km s}^{-1}$. Это свидетельствует о наличии в центре галактики ЧД большой массы $(3,3 \pm 2) \times 10^6 M_\odot$, а гипотеза об отсутствии ЧД исключена на уровне достоверности 95 %. Масса ЧД примерно на два порядка превышает ту, что ожидается для подобной галактики из экстраполяции эмпирического соотношения для масс ЧД и галактик. Пока неясно, почему в карликовой галактике находится столь массивная ЧД. О сверхмассивных чёрных дырах см. [23].

Список литературы

1. Faestermann T et al. *Phys. Lett. B* **824** 136799 (2022)
2. Александров Д В и др. *Письма в ЖЭТФ* **81** 49 (2005); Aleksandrov D V et al. *JETP Lett.* **81** 43 (2005)
3. Semeghini G et al. *Science* **374** 1242 (2021)
4. Verresen R, Lukin M D, Vishwanath A *Phys. Rev. X* **11** 031005 (2021)
5. Садовский М В *УФН* **186** 1035 (2016); Sadovskii M V *Phys. Usp.* **59** 947 (2016)
6. Liu C et al. *Nat. Commun.* **12** 4573 (2021)
7. Ратников П В, Силин А П *УФН* **188** 1249 (2018); Ratnikov P V, Siliin A P *Phys. Usp.* **61** 1139 (2018)
8. Rosati R et al. *Nat. Commun.* **12** 7221 (2021)
9. Enzian G et al. *Phys. Rev. Lett.* **127** 243601 (2021)
10. Сукачёв Д Д *УФН* **191** 1077 (2021); Sukachev D D *Phys. Usp.* **64** 1021 (2021)
11. Кадомцев Б Б *УФН* **164** 449 (1994); Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **37** 425 (1994)
12. Кадомцев Б Б, Кадомцев М Б *УФН* **166** 651 (1996); Kadomtsev B V, Kadomtsev M B *Phys. Usp.* **39** 609 (1996)
13. Кадомцев Б Б *УФН* **173** 1221 (2003); Kadomtsev B B *Phys. Usp.* **46** 1183 (2003)
14. Mertens L et al. *Phys. Rev. A* **104** 052224 (2021)
15. Белинский А В *УФН* **190** 1335 (2020); Belinsky A V *Phys. Usp.* **63** 1256 (2020)
16. Барли К и др. *УФН* **192** 100 (2022); Barley K et al. *Phys. Usp.* **65** 95 (2022)
17. Менский М Б *УФН* **177** 415 (2007); Menskii M B *Phys. Usp.* **50** 397 (2007)
18. Rubino G, Manzano G, Brukner Č *Commun. Phys.* **4** 251 (2021)
19. Contreras-Tejada P et al. *Nat. Commun.* **12** 7021 (2021)
20. Mancera Piña P E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc. stab3491* (2021) <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3491>; arXiv:2112.00017
21. Oguya G, van den Bosch F C, Burkert A *Mon. Not. R. Astron. Soc. stab3658* (2021) <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3658>; arXiv:2111.12104
22. Bustamante-Rosell M J et al. *Astrophys. J.* **921** 107 (2021)
23. Черепашук А М *УФН* **186** 778 (2016); Cherepashchuk A M *Phys. Usp.* **59** 702 (2016)