

1. Гибридизация майорановских состояний. Майорановскими фермионами называют частицы, являющиеся своими собственными античастицами. Квазичастицы со свойствами майорановских фермионов в виде майорановских нулевых мод (МНМ) наблюдались в экспериментах с квантовыми проволоками и вихрями в топологических сверхпроводниках [1]. Однако МНМ были пространственно удалены друг от друга — по одной МНМ в сверхпроводящем вихре. Представляет интерес получение множественных МНМ внутри одного вихря, но ранее этого достичь не удавалось из-за технических сложностей. Т. Liu (Шанхайский университет Цзяотун, Китай) и соавторы в своём эксперименте впервые получили убедительные свидетельства наличия нескольких МНМ в пределах одного вихря в сверхпроводящей кристаллической плёнке, изготовленной из топологического изолятора SnTe [2]. С помощью сканирующего туннельного микроскопа исследовалась реакция магнитного поля на удерживаемые вихрем майорановские состояния в гетероструктуре SnTe/Pb. Сравнение спектроскопических данных и результатов теоретического моделирования выявило гибридизацию нескольких МНМ в едином вихре. Топологические квантовые системы могут найти полезные практические применения, например в создании стабильных кубитов, благодаря своей устойчивости относительно возмущений.

2. Квантовый аналог эффекта Аррениуса. Квантовое туннелирование через барьер в двойной потенциальной яме исследовалось в различных системах, но ранее удавалось наблюдать лишь расщепление уровней энергии или динамику основного и первого возбуждённого состояния, хотя более высокие возбуждённые состояния представляют интерес для ряда молекулярных и ядерных процессов. Сложность их изучения обусловлена проблемой контроля параметров систем с двойными ямами. N.E. Frattini (Иельский университет, США) и соавторы создали полностью управляемую двойную яму в сверхпроводящей цепи и впервые проверили предсказания квантово-механических расчётов для данного случая [3]. Изучался сверхпроводящий кубит Керра–Ката с микроволновой накачкой. В нём достигалось рекордное время релаксации в 1 мс. Спектроскопия квантовых уровней показала парное сближение уровней, соответствующее экспоненциальному уменьшению туннельного расщепления в возбуждённых состояниях по мере их погружения под потенциальный барьер. Был исследован квантовый аналог закона Аррениуса, известного в химической кинетике, где он описывает тепловую активацию реакций, разделённых энергетическим барьером. В квантовой версии закона Аррениуса, где переходы осуществляются между двумя потенциальными ямами, скорость перехода в зависимости от высоты барьера изменяется не плавно, а по ступенчатой схеме. Это объясняется наличием в ямах дискретных квантовых состояний. Результаты указанных исследований могут найти применение в квантовых вычислениях.

3. Коллапс волновой функции. Измерение в квантовой механике часто интерпретируется как коллапс волновой функции, когда система переходит из суперпозиции состояний в одно собственное состояние (см. [4]). Были предложены различные модели коллапса, приводящие, в принципе, к разным наблюдательным следствиям. Обычно в этих моделях в уравнение Шрёдингера добавляются нелинейные стохастические члены, отвечающие за коллапс. Они должны вызывать диффузионное движение квантовых систем и ускорение их частей, которое может сопровождаться излучением фотонов. Однако заметить в эксперименте соответствующие очень слабые эффекты спонтанного излучения пока не удаётся. К. Piscicchia (Исследовательский центр Э. Ферми и Национальная лаборатория Фраскати, INFN, Италия) и соавторы выполнили новые расчёты спектра спонтанного излучения, сопровождающего коллапсы волновой функции, в двух моделях коллапса: в модели Диоси–Пенроуза, где коллапс определяется гравитационным взаимодействием, и в модели Гирарди–Грасси–Римини с непрерывной спонтанной локализацией [5]. В частности, исследовано влияние немарковской эволюции систем. Расчёты показали, что при малой энергии указанные две модели коллапса дают разные спектры излучения. Кроме того, результат нового детального расчёта имеет отличия от предсказаний прежних

упрощённых моделей. Ранее в экспериментах уже проводился поиск излучения от коллапсов волновых функций при больших энергиях в гамма-диапазоне, но были получены лишь некоторые ограничения на параметры моделей. В дальнейшем необходимы измерения при меньших энергиях в рентгеновской области.

4. Что играет роль динамо-машины в процессе Блэндфорда–Знаека? Как показали Р. Блэндфорд и Р. Знаек ещё в конце 1970-х годов, вращающаяся чёрная дыра (ЧД), обладающая плазменной оболочкой во внешнем магнитном поле, может играть роль униполярного индуктора (см. [6]). При этом потери энергии связаны с электромагнитным потоком вектора Умова–Пойнтинга. Справедливость данного вывода подтверждена многими результатами численного моделирования как в рамках магнитогидродинамических расчётов, так и методом частиц в ячейках. Для расчётов обычно использовалась метрика Керра–Шильда, позволяющая описывать течения как за пределами, так и внутри горизонта событий. С другой стороны, ещё в начале 1980-х годов в попытке объяснить указанный процесс в рамках метрики Бойера–Линдквиста (она может быть использована лишь до горизонта событий и ею как раз и пользовались Блэндфорд и Знаек) К. Торн и Д. Макдональд предложили, как им казалось, физически понятную модель. Они ввели формальную мембрану, находящуюся над самой поверхностью горизонта. Поверхностный электрический ток, текущий по такой мембране (т.е. член $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$ в уравнении баланса энергии), и должен был стать источником потока электромагнитной энергии. Но здесь возникает следующая проблема. Численные расчёты, проведённые С. Комиссаровым [7], показали, что в физически разумной постановке задачи (изначально существует вращающаяся ЧД в вакууме с внешним магнитным полем, а лишь затем магнитосфера заполняется плазмой) область, где уже сформировался поток энергии от ЧД к бесконечности, ограничивается двумя "волнами включения", одна из которых распространяется наружу, тогда как вторая — по направлению к ЧД. Внутренняя волна включения в этой метрике будет бесконечно долго достигать горизонта событий. А важнейший вывод здесь состоял в том, что поверхностные токи в волнах включения не генерируются (такой вывод для плоской метрики был также сделан К. Цыганосом и С. Боговаловым [8]), и поэтому такая мембрана не могла играть роль униполярного индуктора. Источник вектора Умова–Пойнтинга, таким образом, оставался непонятным. Как было показано в новой красивой работе [9], все вопросы могут быть сняты, если учесть, что волна включения существенно нестационарна. В результате волна включения, приближаясь к горизонту, заполняет всё больший и больший объём электромагнитным полем, энергия которого в метрике Бойера–Линдквиста, как известно, отрицательна. В данной области будет накапливаться и момент количества движения поля, противоположный моменту количества движения ЧД. При этом сама ЧД, строго говоря, не будет терять энергию и угловой момент, а поток наружу объясняется тем, что аналогичные потоки с противоположными знаками (отрицательная энергия и угловой момент) накапливаются в области за падающей мембраной. Иными словами, в уравнении баланса энергии в такой нестационарной мембране поток энергии будет создаваться изменением во времени плотности энергии электромагнитного поля ($\partial\rho/\partial t$). Возможно, в описываемой работе [9] сделан последний шаг в понимании физического механизма процесса Блэндфорда–Знаека.

Список литературы

1. Вальков В В и др. *УФН* **192** 3 (2022); Val'kov V V et al. *Phys. Usp.* **65** 2 (2022)
2. Liu T et al. *Nature* **633** 71 (2024) <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07857-4>
3. Frattini N E et al. *Phys. Rev. X* **14** 031040 (2024) <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.14.031040>
4. Кадомцев Б Б, Кадомцев М Б *УФН* **166** 651 (1996); Kadomtsev B B, Kadomtsev M B *Phys. Usp.* **39** 609 (1996)
5. Piscicchia K et al. *Phys. Rev. Lett.* **132** 250203 (2024) <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.250203>
6. Бескин В С *УФН* **180** 1241 (2010); Beskin V S *Phys. Usp.* **53** 1199 (2010)
7. Komissarov S S *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **350** 1431 (2004)
8. Bogovalov S, Tsiganos K *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **305** 211 (1999)
9. Toma K, Takahara F, Nakamura M, arXiv:2408.09993, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.09993>