

и получены аналитические выражения для краевого тока. Также рассмотрено влияние постоянного магнитного поля на величину и поляризационную зависимость тока, в том числе показано, что при приложении магнитного поля возникает циклотронный резонанс в краевом фототоке. С увеличением магнитного поля на краю двумерного электронного газа формируются киральные краевые состояния, ответственные за возникновение квантового эффекта Холла, и краевой фототок возникает вследствие поглощения терагерцового излучения в проводящих краевых каналах [5]. Терагерцовая спектроскопия киральных электронов в этом случае позволяет определить их важные параметры, в том числе время релаксации.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19-72-00029.

#### Литература

1. J. Karch et al., Phys. Rev. Lett., **107**, 276601, **2011**
2. K.-M. Dantscher et al., Phys. Rev. B, **95**, 201103 (R), **2017**
3. S. Candussio et al., arXiv: 2005.01407, **2020**
4. M.V. Durnev, S. A. Tarasenko, Ann. Phys., 1800418, **2019**
5. H. Plank et al., 2D Materials, **6**, 011002, **2019**

## **СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ С НЕТРИВИАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ, ИНДУЦИРОВАННОЙ СПИН-ОРБИТАЛЬНОЙ СВЯЗЬЮ И ГЕЛИКОИДАЛЬНЫМ СПИНОВЫМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ, ПРИ УЧЕТЕ КУЛОНОВСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Злотников А. О., Аксенов С. В., Шустин М. С.

*Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения  
Российской академии наук, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск  
zlotn@iph.krasn.ru*

В работе рассмотрены твердотельные структуры, в которых может реализовываться топологическая сверхпроводимость с возбуждениями особого рода – майорановскими модами. К таким системам относятся: гибридные структуры [1], содержащие полупроводниковые материалы с сильным спин-орбитальным взаимодействием и обычные (нетопологические) сверхпроводники,

такие как нанопроволоки InAs или InSb, в контакте с нитридом ниобия-титана или алюминием [2, 3]. Представлены результаты рассмотрения сверхпроводящих систем с неколлинеарным, или геликоидальным магнитным упорядочением, включающие цепочку магнитных наночастиц, или атомов на сверхпроводящей подложке [4], а также магнитные сверхпроводники [5].

Одним из важнейших вопросов для систем с нетривиальной топологией является вопрос о влиянии кулоновского взаимодействия на топологическую классификацию и майорановские моды. Это направление исследований представляется актуальным, поскольку в ряде топологических сверхпроводящих системах реализуется режим сильных электронных корреляций [6].

При малой концентрации носителей заряда процессами квазичастичного затухания можно пренебречь даже в режиме сильных корреляций. Поэтому в этом случае формирование майорановских мод описывается аналитически на основе атомного представления. Такая ситуация характерна при реализации фазы сосуществования киральной сверхпроводимости и 120-градусного магнитного порядка (фаза СП+120) в системах с треугольной решеткой, таких как кобальтаты натрия [7]. При этом оказалось, что поправки от спин-зарядовых флуктуаций качественно меняют зависимость намагниченности от контрольного параметра.

Спин-зарядовые флуктуации имеют важное значение в сверхпроводящих нанопроволоках со спин-орбитальным взаимодействием [8]. В этом случае необходимо использовать методы, обеспечивающие выход за рамки беспетлевого приближения, либо методы, использующие компьютерное моделирование.

Нами в отмеченных направлениях были получены перечисленные ниже результаты, которые будут отражены в докладе:

1. Показана реализация майорановских мод в фазе СП+120 на треугольной решетке в режиме сильных электронных корреляций [7].
2. Определены условия реализации квантовых топологических переходов в фазе СП+120, проявляющиеся в изменении топологического инварианта, в изменении свойств краевых состояний, а также в появлении изломов в зависимости намагниченности от контрольного параметра.
3. Методом ренорм-группы для матрицы плотности проанализирован режим сильных электронных корреляций в сверхпроводящих нанопроволоках. Показано, что области

реализации одиночных и двойных майорановских мод на топологической фазовой диаграмме существенно уменьшаются по сравнению со случаем невзаимодействующих электронов [8].

4. Показан переход к тривиальной топологии сверхпроводящего состояния в нанопроволоке в пределе бесконечной величины кулоновского отталкивания.

Результаты получены при поддержке РФФИ, в рамках проектов № 19-02-00348, 19-42-240011, 20-32-70059. Один из авторов (С.В.А.) благодарит за поддержку Совет по грантам Президента РФ (проект МК-1641.2020.2).

#### Литература

1. J.D. Sau, R.M. Lutchyn et al., Phys. Rev. Lett., **104**, 040502, **2010**
2. V. Mourik, K. Zuo et al., Science, **336**, 1003, **2012**
3. H. Zhang, C.-X. Liu et al., Nature, **556**, 74, **2018**
4. T.-P. Choy, J. M. Edge et al., Phys. Rev. B, **84**, 195442, **2011**
5. I. Martin and A.F. Morpurgo, Phys. Rev. B, **85**, 144505, **2012**
6. Y. Sato, S. Matsuo et al., Phys. Rev. B, **99**, 155304, **2019**
7. В.В. Вальков, А.О. Злотников, Письма в ЖЭТФ **109**, 769, **2019**
8. S.V. Aksenov, A.O. Zlotnikov, M.S. Shustin, Phys. Rev. B, **101**, 125431, **2020**

## КВАНТОВЫЕ ТОЧКИ КАК ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ДЛЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Капуткина Н. Е.<sup>1</sup>, Алтайский М. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва  
kaputkina@mail.ru, altaisky@rssi.ru

Системы искусственного интеллекта могут использовать как алгоритмические, так и неалгоритмические методы машинного обучения. Быстродействие этих устройств ограничено как скоростью выполнения операций булевой алгебры (для классических устройств), так и минимальным размером логических элементов. Использование унитарной квантовой эволюции квантовых регистров вместо необратимых операций булевой алгебры является естественным