

ОТЗЫВ

на выпускную квалификационную (бакалаврскую) работу В. А. Полякова
“Сверхпроводящий отклик в сверхпроводниках со спин-орбитальным взаимодействием”

Бакалаврская работа В. А. Полякова посвящена изучению свойств неоднородного сверхпроводящего состояния типа FFLO (Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov), возникающего в двумерных сверхпроводниках со спин-орбитальным взаимодействием типа Рашбы в параллельном магнитном поле. Такое состояние было изучено ранее в работе O. V. Dimitrova and M. V. Feigel'man, PRB **76**, 014522 (2007). В настоящей работе предпринята попытка уточнить полученные ранее результаты и, в частности, вычислить сверхтекучую плотность в неоднородном состоянии с учетом более высоких порядков разложения по степеням малого волнового вектора и слабого магнитного поля. Также выполнено вычисление функции отклика вблизи критической температуры на основе функционала Гинзбурга-Ландау, из работы N. F. Q. Yuan and Liang Fu, PNAS **119** (15) e2119548119 (2022). Результат этого вычисления сравнивается с функцией отклика из микроскопической теории.

Основной результат работы, на мой взгляд, состоит в том, что отклик сверхпроводника становится неизотропным при приближении температуры к критической. Анизотропия пропорциональна квадрату приложенного магнитного поля. Также интересна явно продемонстрированная несостоятельность результатов недавних статей Yuan и Fu.

Работа оставила у меня смешанные впечатления. Большую часть текста занимает пересказ предшествующей работы Димитровой и Фейгельмана и некоторых материалов из учебника по сверхпроводимости. Кроме того, само изложение проделанных вычислений довольно небрежное, содержит множество опечаток и неточностей, из-за которых иногда трудно судить об обоснованности полученных результатов. Также довольно сложно оценить сделанные в работе приближения. Несмотря на то, что один из вводных разделов посвящен описанию иерархии малых параметров модели, остается неясным какие из малых параметров важнее, а дальнейшие вычисления почти никогда не ссылаются на эту иерархию. В большинстве случаев остается не понятным, чем именно пренебрегается при переходе от одной формулы к другой.

Ниже приводятся некоторые более конкретные замечания к работе. Они могут свидетельствовать как об ошибках в вычислениях, так и просто о недостаточно аккуратном изложении материала.

1. Уравнение (3.3), и более общее (4.5), для плотности тока написаны неверно. Они не обладают должной калибровочной симметрией. В случае однородного в пространстве векторного потенциала это не приводит к проблемам. Однако в работе изучается неоднородное сверхпроводящее состояние и приводятся выражения (по крайней мере промежуточные) для функции отклика на конечном импульсе. Скорее всего это не приводит к ошибке в ответе, но хотелось бы, чтобы промежуточные формулы также не содержали ошибок.
2. В формуле (4.5) приведено выражение для оператора тока в киральном базисе — базисе собственных состояний гамильтониана. Это выражение получено дифференцированием по импульсу собственного значения $\xi(\mathbf{p})$, поэтому оно также получается диагональным. На самом деле оператор тока не может быть диагональным ни в каком базисе. Из-за спин-орбитального взаимодействия разные компоненты вектора тока не коммутируют ни друг

с другом, ни с гамильтонианом. Чтобы получить правильное выражение для тока, нужно было также дифференцировать матрицы η , которые описывают переход к киральному базису. Может случиться так, что недиагональной частью операторов тока можно пренебречь в силу малости параметра α , но это требует отдельного пояснения, особенно учитывая следующее замечание.

3. В формулах раздела 8.4 удерживаются малые поправки по магнитному полю, а также еще меньшие члены, содержащие помимо магнитного поля силу спин-орбитального взаимодействия. Кажется странным, что эти члены разных порядков малости всюду входят лишь в одной комбинации. Во-первых, не ясно, нужно ли выполнять вычисление с такой высокой точностью, во-вторых, возникает подозрение, что какие-то вклады из более высокого порядка разложения были упущены.
4. Также есть множество мелких неточностей и погрешностей в тексте, которые вряд ли влияют на окончательный результат, но сильно затрудняют понимание работы. Например в формуле (8.1.2) внезапно возникает никогда ранее не определенный угол θ . По-видимому, он как-то связан с углом φ из формулы (4.2), но как именно — можно только догадываться.

Несмотря на указанные недостатки, очевидно, что В. А. Поляков проделал большой объем самостоятельной работы и получил потенциально интересные результаты. Однако качество представленного текста все еще далеко от стандартов для научных публикаций. Потребуется дополнительная работа над ошибками, прежде чем его можно будет представить для публикации в журнале или доклада на конференции. Однако представленная работа удовлетворяет всем требованиям к выпускной квалификационной работе для бакалавра, и В. А. Поляков заслуживает присуждения степени бакалавра с оценкой хорошо (7).

Островский Павел Михайлович,
доктор физ.-мат. наук,
научный сотрудник
Института теории конденсированного состояния
Технологического института Карлсруэ, Германия
12 июня 2023 г.

