

Рецензия на выпускную квалификационную работу (диплом бакалавра)

Слободского Андрея Сергеевича

«Квазичастичные состояния в сверхпроводящем вихре в гетероструктуре сверхпроводник - киральный ферромагнетик в том числе в присутствии скирмиона»

Выпускная квалификационная работа (диплом бакалавра) Слободского Андрея Сергеевича посвящена теоретическому исследованию электронной структуры вихревого состояния сверхпроводящих гибридных систем, которые включают ферромагнитные пленки с неоднородной намагниченностью (скирмионные конфигурации) и спин-орбитальное взаимодействие типа Рашба на интерфейсе сверхпроводник – ферромагнетик. При решении соответствующих уравнений Боголюбова- де Жена применяется комбинация аналитических и численных методов. В результате решения студент нашел условия возникновения и волновые функции так называемых майорановских состояний в коре изолированного вихря (специальный тип состояний квазичастиц с нулевой энергией). Задача решена как для однородного распределения магнитного момента в ферромагнетике, так и для случая скирмионного распределения. Далее найден также спектр подщелевых состояний квазичастиц как функция углового момента. Решенная задача интересная и полезная для возможных экспериментальных постановок. Тематика вполне актуальна, работы на данную тему постоянно появляются в ведущих физических журналах. Аналитические квазиклассические подходы использованы элегантно и обоснованно. Результаты выглядят вполне надежно. Действительно, в топологически нетривиальном пределе задача по сути сводится к задаче о вихре в сверхпроводнике с р-типом спаривания и появление нулевой моды в коре вихря представляется вполне естественным для эффективного параметра порядка типа $p_x \pm ip_y$. Результаты со скирмионом также не вызывают сомнений: представляется, что скирмион должен приводить к появлению в центре системы дополнительного эффективного параметра порядка типа $p_x + ip_y$ на фоне сверхпроводящего параметра порядка $p_x - ip_y$ (выбор знаков здесь зависит от направления z-компоненты магнитного момента), что не должно привести к разрушению состояния с нулевой энергией.

В то же время, к работе можно сформулировать некоторые вопросы и замечания.

1. Было бы интересно видеть в работе более подробное обсуждение применимости приближения изолированного вихря в тонкопленочной структуре сверхпроводник – ферромагнетик. Казалось бы ферромагнетик с перпендикулярным плоскости пленки магнитным моментом должен создавать концентрацию вихрей пропорциональную этому магнитному моменту. Учитывая необходимость достаточно сильного обменного поля для реализации майорановского состояния, концентрация вихрей также может быть достаточно высока. Насколько это условие согласовано с приближением изолированного вихря, использованным в работе? Другими словами, при каких параметрах можно реализовать майорановские состояния с радиусом локализации существенно меньшим расстояния между вихрями, сгенерированными магнитным моментом ферромагнитной пленки.
2. В разделе 3.2.2 указано, что “вероятность майорановского состояния выжить после того, как скирмион был разрушен, мала”. Это утверждение тоже требует, на мой взгляд, пояснений, поскольку нулевая мода квазичастиц существует в вихре и в отсутствие скирмиона (поскольку она есть в коре вихря в $p_x \pm ip_y$ сверхпроводнике).

Эти замечания, однако, не являются критичными и не ставят под сомнение основные результаты работы. В целом, считаю, что автор продемонстрировал уверенное владение современными методами теории сверхпроводимости, а представленная работа выполнена на высоком уровне и соответствует всем требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам (бакалаврским дипломам). Рекомендую присвоить Слободскому Андрею Сергеевичу квалификацию бакалавра с оценкой отлично (10).

Рецензент:

Мельников Александр Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, лаб. спиновых явлений в сверхпроводящих наноструктурах и устройствах МФТИ

20 июня 2025 г.