

Группа нанобио спектроскопии
и Европейский центр теоретической спектроскопии
Департамент физики материалов Университета Страны Басков (UPV/EHU)

Доктор Илья Токатлы,
профессор Баскского научного фонда
Тел.: +34-943 018596; факс: +34-943 018390; Email: ilya.tokatly@ehu.es

Сан-Себастьян-Доностия,
26 июня 2026 года

Отзыв на магистерскую диссертацию Даниила Карузина
«Плазмоны и их затухание в неупорядоченных сверхпроводящих плёнках»

В этой магистерской диссертации Даниил Карузин представляет подробный анализ плазменных коллективных возбуждений в двумерных (2D) неупорядоченных сверхпроводниках. Постановка решённой в работе задачи выглядит почти классической, и потому удивительно, что соответствующая интересная и нетривиальная физика до сих пор оставалась практически неисследованной. Как известно, плазмоны играют особую роль в физике конденсированного состояния. С технической точки зрения они проявляются как полюса функции отклика плотности, а в длинноволновом пределе доминируют в спектральной плотности флуктуаций заряда. Более того, при асимптотически больших длинах волн единственный плазмонный полюс в точности исчерпывает правило f -сумм, тогда как плазменная частота в чистой электронной жидкости принимает универсальное значение, не зависящее от электрон-электронных корреляций. При наличии рассеяния на примесях плазмоны приобретают конечное затухание. Кроме того, в двумерных системах при достаточно малых волновых векторах действительная часть плазменной частоты обращается в нуль, и плазмоны становятся сильно затухающими. Именно влияние сверхпроводимости на плазменные возбуждения в режиме сильного затухания исследуется в данной диссертации. Ещё на раннем этапе развития теории сверхпроводимости было установлено, что в заряженных сверхтекучих системах звуковая мода Боголюбова-Голдстоуна сдвигается вверх до плазменной частоты. Поскольку в трёх измерениях плазменная частота обычно значительно превышает сверхпроводящую энергетическую шкалу, сами возникающие плазменные колебания остаются практически неизменными. Однако в двумерном случае ситуация становится менее тривиальной: при малых волновых векторах плазменная частота уменьшается и в некоторый момент становится меньше сверхпроводящей щели. Здесь следует ожидать существенного влияния сверхпроводимости на плазменные колебания. В частности, в режиме сильного затухания при низких температурах ожидается повторное появление узкого плазмонного резонанса, формируемого сверхтекучей компонентой. По-видимому, спектральный вес этого резонанса определяется сверхтекучей плотностью, которая в грязном пределе значительно меньше полной

плотности, необходимой для выполнения правила сумм f . Куда исчезает остальная часть спектрального веса и каким образом она перераспределяется? Какова зависимость плазменной частоты сверхтекучей компоненты от волнового вектора? Как эта мода затухает при повышении температуры? Что происходит с плазмоном, когда его частота достигает порога возбуждения квазичастиц? Многие из этих вопросов тщательно исследованы и получили ответы в настоящей диссертации. В течение долгого времени физика плазмонов в двумерных сверхпроводниках оставалась практически неизученной. В последние годы интерес к этой проблеме был вызван прогрессом экспериментальной физики двумерных материалов, включающим как синтез монослойных сверхпроводников, так и контролируемое выращивание наноразмерных тонких неупорядоченных плёнок. Благодаря этому представленная работа представляет не только фундаментальный интерес, но также является своевременной и экспериментально значимой.

Решение сформулированной физической задачи потребовало широкого применения различных методов. В ходе работы Даниил Карузин продемонстрировал владение разнообразными методами современной теоретической физики, включая нелинейную сигма-модель Келдыша, технику квазиклассических функций Грина, асимптотический анализ интегралов и методы аналитического продолжения. В частности, сигма-модель используется для вывода нелинейного спектрального уравнения для коллективных мод. В длинноволновом пределе это уравнение определяет плазменные возбуждения и выражается через проводимость Маттиса-Бардина неупорядоченного сверхпроводника. Одним из главных технических достижений работы является аналитическое продолжение проводимости Маттиса-Бардина в нижнюю полуплоскость комплексной частоты с корректным сохранением причинности входящих в выражения функций Грина. Конечные физические результаты работы произвели на меня большое впечатление. Они весьма интересны, достаточно неожиданны и побуждают к дальнейшим размышлениям. Наиболее удивительным результатом для меня является существование точки обрыва плазмонного спектра. Внезапное полное исчезновение хорошо определённого коллективного возбуждения выглядит весьма загадочно. Я практически уверен в технической корректности этого результата и полагаю, что он стимулирует дальнейшие исследования, направленные на более глубокое понимание физики данного явления.

В заключение отмечу, что считаю эту работу интересным, своевременным и значимым вкладом в теорию низкоразмерных неупорядоченных сверхпроводников. Она, безусловно, соответствует самым высоким требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, а её автор заслуживает оценки «отлично».

26.06.2026

Перевод верен

И.О. Ученого секретаря

ИТФ им. Л. Д. Ландау

док. физ.-мат. наук С