

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию А.А. Солдатова

“Полярная фаза ^3He в нематическом аэрогеле”,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности

01.04.09 – физика низких температур.

Сверхтекучий ^3He является прекрасным модельным объектом для изучения особенностей сверхтекучести и сверхпроводимости в системах со сложным параметром порядка (p-волновым, спин-триплетным), которым обладает, в частности, ряд новых сверхпроводников с нетривиальным спариванием. Особый интерес связан с исследованием влияния неоднородностей и примесей, тем более, что искусственные протяженные примеси - аэрогели, представляющие собой пористый жесткий каркас из тонких нитей, можно контролируемо вводить в исходно идеально чистый ^3He . Анизотропия аэрогеля оказывает ориентирующее влияние на параметры порядка сверхтекучих фаз и может даже приводить к образованию новых фаз. Диссертация А.А. Солдатова посвящена экспериментальным исследованиям особенностей нормального и сверхтекучего ^3He в новом сильно-анизотропном нематическом аэрогеле. Тема диссертации, несомненно, актуальна, как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения, она основана на 3 публикациях в ведущих научных журналах, включенных в перечень ВАК, и многочисленных трудах конференций. Во Введении определены фундаментальные проблемы исследований ^3He в аэрогеле, их актуальность, представлены цель диссертационной работы и использованные методы исследований, а также новизна полученных результатов и их научная значимость, приведено краткое содержание диссертации по главам. Первая глава диссертации посвящена обзору представлений о сверхтекучем ^3He , параметрах порядка его фаз, спиновой динамике и т.д., сформировавшихся к началу работы над диссертацией. Подробно обсуждаются исследуемые в диссертации А-фазы в нематическом аэрогеле и, в частности, впервые экспериментально реализованная в настоящей работе полярная фаза, энергетическая щель в которой зануляется вдоль линии «экватора». Обсуждается также использование

метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) для изучения ^3He . В конце первой главы обосновываются критерии обнаружения «чистой» полярной фазы в ЯМР-эксперименте.

В Главе 2 представлено экспериментальное оборудование и использованные в диссертации методы исследований. Поскольку сверхтекучие фазы ^3He существуют только ниже температур 2-2.5 мК, в эксперименте необходимо было использовать уникальную (единственную в России) установку ядерного размагничивания ИФП РАН, которая подробно описана в диссертации. Степень ядерного размагничивания обеспечивает рабочую температуру до 1 мК. Измерительная ЯМР схема включает два соленоида, задающих магнитные поля во взаимно-перпендикулярных направлениях, что позволяет поворачивать приложенное поле. Эксперименты проводились методами поперечного непрерывного и импульсного ЯМР при сверхнизких температурах 1–60 мК, при давлениях ^3He 0–29.3 бар, в магнитных полях 20–370 Э, соответствующих частотам ЯМР от 80 кГц до 1.2 МГц. В диссертации описаны схемы спектрометров непрерывного и импульсного ЯМР, обсуждаются принципы их работы. Эксперименты проводились как с чистым ^3He , так и с небольшими добавками ^4He в ^3He . В первом случае рассеяние квазичастиц ^3He на поверхностях всех объектов, граничащих с ^3He , оказывается полностью диффузным и не сохраняет спин из-за процессов быстрого обмена между спинами жидкого ^3He и твердого ^3He , образующегося на этих поверхностях. В случае добавления ^4He именно он покрывает поверхности и граничные условия изменяются. В этом случае спин при рассеянии сохраняется, причем рассеяние может быть как зеркальным, так и диффузным в зависимости от давления. В диссертационной работе исследования были выполнены в пяти образцах различных нематических аэрогелей, отличающихся по плотности. Основная часть результатов была получена с использованием образцов нового сильно-анизотропного нематического аэрогеля – нафена. Исследования микроструктуры образцов аэрогеля с помощью сканирующего электронного микроскопа показали что нити «обнинского» аэрогеля имеют длину около 100 мкм, тогда как в новом нематическом аэрогеле нафене они достигают длины 1 см. Структура и свойства исследованных «нематически упорядоченных» аэрогелей представлена в диссертации в виде отдельной таблицы.

Третья глава диссертации посвящена измерениям тензора спиновой диффузии для ^3He в образцах нафена методом спинового эха при температурах 1.4–60 мК. Для определения коэффициента спиновой диффузии $D(0)$ при нулевой температуре полученные зависимости $D(T)$ аппроксимировались соотношением, которое учитывало

как температурно-зависимую диффузию в объемном ^3He , определяемую только столкновениями между квазичастицами, так и независимый от температуры вклад, вносимый нитями аэрогеля. При достаточно низких температурах (< 10 мК) именно нити аэрогеля начинают ограничивать свободный пробег квазичастиц и спиновую диффузию. Эксперименты показали, что нафен обеспечивает большую анизотропию по сравнению с обнинским аэрогелем. Величина анизотропии тензора спиновой диффузии $k \equiv D^{\parallel}/D^{\perp}$ достигает в нем 8, тогда как в системе с обнинским аэрогелем она менее 2. Расчеты показывают, что в случае диффузного характера отражения квазичастиц от аэрогеля анизотропия $k \approx 3.23$, что означает, что в выполненных экспериментах отражение квазичастиц ^3He от нитей аэрогеля в нафене-243, покрытых монослоями ^4He , близко к зеркальному.

Наиболее важной частью диссертации, на мой взгляд, является Глава 4, в которой реализована и охарактеризована новая (полярная) сверхтекучая фаза ^3He . Способы идентификации «чистой» полярной фазы по сдвигу частоты ЯМР от ларморовского значения подробно обсуждались в первой главе. Сдвиг возникает вследствие дипольного взаимодействия спинов в сверхтекучем конденсате и зависит от вида параметра порядка и его пространственного распределения. В полярной фазе орбитальный вектор параметра порядка фиксируется вдоль нитей аэрогеля, поэтому энергетическая сверхтекучая щель максимальна в направлении нитей и обращается в нуль на окружности, перпендикулярной нитям, в отличие от фазы А и полярноискаженной А-фазы, где она обращается в 0 только в двух точках. Важной характеристикой модели, описывающей сдвиг, является коэффициент К, который связывает две амплитуды, а и b, параметра порядка в орбитальном пространстве. В случае чистой полярной фазы амплитуда $b=0$ и коэффициент $K=4/3$, который можно извлечь из сдвига частоты ЯМР в случае, когда внешнее поле приложено вдоль нитей аэрогеля. В то же время, сдвиг для поля перпендикулярного нитям должен быть равен нулю; наличие отрицательного сдвига в поперечном поле указывает на то, что наблюдаемая сверхтекучая фаза ^3He – не чисто полярная. Ранее при использовании обнинского нематического аэрогеля была получена полярноискаженная А-фаза с величиной коэффициента $K=1.06-1.07$, меньшей $4/3$. В ходе выполнения настоящей диссертационной работы для случая обнинского аэрогеля в поперечном поле наблюдался также отрицательный сдвиг частоты, что доказывает, что чисто полярная фаза не реализуется в этом аэрогеле. Однако, для ^3He в нафене было показано, что

полярная фаза существует в широкой области температур и давлений. Эксперименты по импульсному ЯМР продемонстрировали, что в обоих образцах нафена при низких давлениях, когда выполняется приближение слабой связи, коэффициенты K почти совпадают и близки к $4/3$, несмотря на то, что исследованные образцы ^3He в аэрогелях сильно различались по плотности и анизотропии спиновой диффузии. Более того, в обоих образцах отсутствовал сдвиг частоты ЯМР в поперечном поле. Было показано, что в нафене-243 с анизотропией ~ 8 полярная фаза существует вплоть до самых низких температур, которые могли быть получены в эксперименте, в то время как для случая нафена-90 с меньшей анизотропией (~ 3) полярная фаза существует только до температуры T_p , ниже которой происходит фазовый переход второго рода в полярноискаженную А-фазу и величина K падает.

Последняя глава диссертации связана с детальными экспериментальными исследованиями влияния граничных условий на характеристики сверхтекучего ^3He в нафене. Приведены результаты экспериментов для случая чистого ^3He и при покрытии нитей аэрогеля «2.5-атомными» слоями ^4He . Построены фазовые диаграммы ^3He в различных образцах нафена, отличающихся по плотности. Показано, что граничные условия для рассеяния квазичастиц ^3He играют важную роль для реализации полярной фазы в нафене. Как это отмечалось в первых главах диссертации в случае использования чистого ^3He без добавок ^4He рассеяние квазичастиц ^3He на поверхностях всех объектов, граничащих с ^3He , оказывается полностью диффузным и не сохраняет спин из-за процессов быстрого обмена между спинами жидкого ^3He и твердого ^3He , образующегося на этих поверхностях. Таким образом, в этом случае присутствует магнитный канал рассеяния, который часто не учитывается в теоретических моделях. Полученные результаты показывают, что этот канал важно учитывать в случае анизотропной среды, обуславливающей анизотропное рассеяние. Во втором разделе главы описаны методы идентификации сверхтекучих фаз, а в третьем разделе - методы обработки сигналов в присутствии парамагнитного ^3He . В зависимости от условий эксперимента наблюдались полярная, полярноискаженная А-фаза, «чистая» А-фаза, полярноискаженная В- и В фазы сверхтекучего ^3He в образцах нафена. Присутствие парамагнитного ^3He на нитях нафена кардинально меняет сверхтекучую фазовую диаграмму ^3He в нафене: при охлаждении из нормальной фазы сверхтекучий переход происходит либо в А-фазу, либо в полярноискаженную А-фазу, в то время как в отсутствие твердого ^3He наблюдается переход в полярную фазу, как это было описано в

четвертой главе. Твердый ^3He на нитях также существенно уменьшает температуру сверхтекучего перехода, особенно в образцах нафена низкой пористости, где анизотропия рассеяния квазичастиц ^3He выше. Наблюдаемые явления не могут быть объяснены изменением зеркальности рассеяния, и в диссертации предполагается, что ключевую роль здесь играет магнитный канал рассеяния, который становится важен в анизотропной среде.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые свидетельствуют о том, что методом ЯМР выполнено подробное экспериментальное исследование нормального и сверхтекучего ^3He в нематически упорядоченных аэрогелях, обнаружена топологически новая сверхтекучая фаза ^3He – полярная фаза. Успешное выполнение задач диссертационной работы было бы невозможно без использования уникальной установки ядерного размагничивания ИФП РАН, а также прецизионного проведения ЯМР-экспериментов при сверхнизких температурах.

В качестве замечаний можно отметить следующие моменты.

1. Довольно неконкретно сформулированы цели исследований, как в целом, так и по главам. После прочтения диссертации становится совершенно понятно, что сильно анизотропный нематический аэрогель был впервые использован в этой работе, прежде всего, для наблюдения «чистой» полярной фазы. В начале Главы 4 ясно написано, что «перед началом работы над диссертацией было известно, что в обнинском аэрогеле большую часть фазовой диаграммы занимает полярноискаженная А фаза. Стало понятно, что для достижения большей величины полярного искажения А фазы и стабилизации полярной фазы необходим более анизотропный нематический аэрогель». Тем не менее, и в диссертации, и в автореферате цель работы сформулирована «по экспериментальному» просто: «Целью данной работы является экспериментальное исследование жидкого нормального и сверхтекучего ^3He в новом наноматериале, который производит фирма ANF Technology Ltd. (Таллин, Эстония), – нафене.». Такая вот, по-сути, прикладная цель по проверке эстонского наноматериала...

2. Вводные первая и вторая главы заметно превышают по суммарному объему оригинальные главы, хотя в оригинальных главах часто не хватает более подробных обсуждений. Например, часто при сравнении величины, отличающиеся в два и более раз, считаются близкими:

- так, на стр. 40 написано, что «измеренные площади поверхности образцов аэрогеля оказались близкими к расчетным», несмотря на то, что, например, для аэрогеля нафен-243 измеренное значение вдвое меньше расчетного, заметные отличия имеются и для аэрогеля Обнинск-8 и нафена-90;

- никак не обсуждается заметное расхождение между измеренными в диссертационной работе длинами свободного пробега $\lambda^{\perp}$ (Табл.3.1) и значениями расстояний между нитями l , приведенными в Табл.2.1, что противоречит постановке задачи, сформулированной на стр.46: «...определить эффективную длину свободного пробега для главных направлений тензора D^{lm} , чтобы сравнивать с реальными масштабами длин внутри аэрогеля...»

3. В целом диссертация написана хорошим научным языком. Можно отметить лишь небольшое количество опечаток и стилистических недостатков. Например, на стр. 15 (ур.1.15) введено сразу несколько обозначений для частот продольной и поперечной мод колебаний, часть из которых не используется в тексте диссертации в дальнейшем.

Сделанные замечания относятся, в основном, к форме представления материала и не снижают общей высокой оценки работы.

В целом диссертация выполнена и изложена на самом высоком экспериментальном уровне, она является цельным и законченным исследованием. Диссертация вносит существенный вклад в изучение сверхтекучих фаз ^3He . Новизна и достоверность результатов не вызывают сомнений. Практическая значимость работы связана с возможностью использования реализованного нового объекта для моделирования характеристик сверхтекучих и сверхпроводящих систем со сложным параметром порядка. Результаты могут быть использованы и развиты в ИФТТ РАН г.Черноголовка, ИРЭ РАН г.Москва, МГУ г. Москва, ФИ РАН г.Москва, ФТИ РАН г. Санкт-Петербург. Автореферат и опубликованные работы подробно и правильно отражают содержание диссертации. Представленные результаты докладывались на престижных международных семинарах и конференциях.

По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов диссертационная работа А.А. Солдатова удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на

соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.09 – физика низких температур, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой степени.

Дата 10.06.19

Зав. лаб. сверхпроводимости
ИФТТ РАН, д. ф.-м. н., проф.



В.В. Рязанов

Контактные данные

Почта: 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д.2,
ИФТТ РАН

Тел.: +7 (903) 127-95-38

E-mail: ryazanov@issp.ac.ru

Подпись В.В. Рязанова удостоверено

Ученый секретарь ИФТТ РАН

к.ф.м.н.



А.Н. Терещенко