



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б 892

17-87-544

**БРУСОВ
Петр Никитович**

**КОЛЛЕКТИВНЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ
В СВЕРХТЕКУЧИХ ФАЗАХ He^3**

**Специальность: 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук**

Дубна 1987

Работа выполнена в отделе ядерной физики Научно-исследовательского института физики Ростовского государственного университета.

Официальные оппоненты :

доктор физико-математических наук

Г.Е. ВОЛОВИК

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент АН УССР

С.В. ПЕЛЕТМИНСКИЙ

доктор физико-математических наук

А.С. ШУМОВСКИЙ

Ведущее научно-исследовательское учреждение - Институт физики АН ГССР (Тбилиси).

Автореферат разослан " " _____ 1987 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1987 г.

на заседании специализированного Совета Д047.01.01

Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

В.И. Журавлев

Актуальность проблемы и цель работы

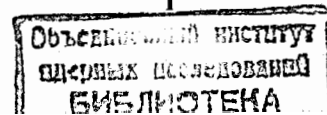
Сверхтекучие фазы He^3 с момента их открытия в 1972 году остаются наиболее интересным и интенсивно изучаемым объектом в физике конденсированного состояния. Более сложное спаривание атомов He^3 в триплетное состояние приводит к значительно более разнообразным и сложным свойствам He^3 ниже фазового перехода по сравнению со сверхпроводниками, где происходит спаривание электронов в синглетное состояние. В He^3 существует несколько сверхтекучих фаз (к настоящему времени экспериментально обнаружены три сверхтекучие фазы А-, А₁-, В-), обладающие кроме сверхтекучих свойств также свойствами магнетиков и жидких кристаллов.

Параметром порядка в He^3 является комплексная матрица $3 \times 3 A_{ij}$, большое число степеней свободы которой ($3 \times 3 \times 2 = 18$) приводит, в частности, к богатому спектру коллективных возбуждений, содержащему 18 ветвей в каждой фазе. Исследование коллективных мод дает важную информацию о внутренней структуре параметра порядка и динамике его степеней свободы.

Часть коллективных мод (нефононные моды) возбуждаются в ультразвуковых экспериментах, другая часть (спиновые волны) - в экспериментах по ядерному магнитному резонансу (ЯМР), поэтому изучение этих мод, описывающих одновременно два основных метода исследования сверхтекучего He^3 - ультразвуковые и ЯМР эксперименты, является важным и актуальным.

Различные возмущения, такие, как дипольное взаимодействие, электрическое и магнитное поля, сверхтекучий поток, эффекты вращения приводят к целому ряду изменений в спектре коллективных мод. Часть этих эффектов, таких, как продольный ЯМР в А- и В-фазах, сдвиг частоты поперечного ЯМР в А-фазе, гидродинамический сдвиг частоты продольного ЯМР в А- и В-фазах, линейный и нелинейный эффекты Зеемана для фононных мод, были получены ранее. Ряд новых эффектов, вызванных вышеупомянутыми возмущениями, таких, как расщепление фононных мод под действием возмущений, существование мод $E = 2\Delta(\rho v)$ - мод в качестве резонансов, пересечение ветвей коллективных мод при ненулевых импульсах и других, впервые получен автором.

В последнее время в связи с появлением экспериментов по изучению монокристаллов He^3 , адсорбированных на подложке, резко возрос интерес к физике тонких гелиевых пленок. Становится актуальным изучение возможных фазовых переходов в них, в частности, в сверхтекучее состояние, а также коллективных возбуждений, описывающих, как и в трехмерном случае, ультразвуковые и ЯМР эксперименты.



Растворы He^3 в сверхтекучем He^4 давно изучаются теоретически и экспериментально. В связи с этим естественно возникает вопрос о переходе и ферми-компоненты раствора $/He^3/$ также в сверхтекучее состояние. Хотя до сих пор нет экспериментальных доказательств такого перехода, теоретических работ, посвященных этой проблеме, достаточно много.

В ряде работ предполагалось, что образование куперовских пар в трехмерном растворе происходит в S -состоянии. Однако было показано, что в определенной области концентраций и давлений p -спаривание в He^3 будет предпочтительным. В диссертации впервые изучены коллективные свойства сверхтекучих растворов He^3-He^4 в случае p -спаривания в ферми-подсистеме.

Сложность параметра порядка сверхтекучих фаз He^3 , кроме разнообразия их свойств, ведет к значительным трудностям при теоретическом описании свойств сверхтекучих фаз. Это делает целесообразным использование для описания He^3 -моделей /аналогичных, например, модели БКШ для сверхпроводников/ с последующим учетом более сложных эффектов /например, дипольного взаимодействия, эффектов сильной связи в других/.

Существует два основных альтернативных теоретических метода изучения коллективных свойств сверхтекучего He^3 - более традиционный метод кинетического уравнения и метод функционального/континуального/ интегрирования, интенсивно развиваемый в последнее время. Последний метод, используемый в диссертации, оказывается весьма эффективным при исследовании коллективных возбуждений. Последовательное функциональное интегрирование по "быстрым" и "медленным" ферми-полям с переходом к вспомогательным бозе-полям, отвечающим куперовским парам квазифермионов, позволяет построить модели ферми-системы с p -спариванием, пленки He^3 , а также сверхтекучего раствора He^3-He^4 с p -спариванием в ферми-компоненте. В рамках этих моделей получены функционалы эффективного /"гидродинамического"/ действия, описывающие все физические свойства рассматриваемых систем и, в частности, спектр коллективных возбуждений.

Целью данной работы являлось построение последовательной микроскопической теории коллективных возбуждений в сверхтекучих фазах He^3 , исследование важнейших характеристик и свойств коллективных мод параметра порядка, таких, как частоты и затухание коллективных мод, устойчивость голдстоуновских мод g^d относительно распада, изучение влияния дипольного взаимодействия, магнитного и электрического полей, сверхтекучего потока и других возмущений на спектр коллективных мод. Целью работы было также исследование сверхтекучести и коллективных возбуждений в пленках He^3 , бозе-спектра сверхтекучих растворов He^3-He^4 в случае p -спаривания в ферми-подсистеме.

Научная новизна результатов

Следующие результаты получены в диссертации впервые:

1. Вычислены энергии всех коллективных мод в В-фазе He^3 при ненулевых импульсах возбуждений.
2. Вычислены энергии всех нефоновых мод в А-фазе He^3 с учетом затухания.
3. Исследована устойчивость голдстоуновских мод в А-, В-, 2Д- фазах.
4. Предсказано существование двух сверхтекучих фаз /а и б / в пленках He^3 , доказана устойчивость этих фаз относительно малых возмущений. Доказано существование сверхтекучести в пленках He^3 .
5. Полностью изучен спектр коллективных возбуждений в а- и б- фазах пленок He^3 . Вычислены частоты и затухание нефоновых мод, их дисперсия, скорость голдстоуновских мод, а также исследована устойчивость фононного спектра.
6. Развита метод учета дипольного взаимодействия и электрического поля в формализме континуального интеграла. Исследовано влияние дипольного взаимодействия и электрического поля на спектр коллективных мод.
7. Исследованы коллективные возбуждения в сверхтекучих растворах He^3-He^4 при p -спаривании в He^3 .
8. Изучено влияние деформации щели в ферми-спектре, вызванной дипольным взаимодействием, магнитным и электрическим полями, сверхтекучим потоком и эффектами вращений, на коллективные моды параметра порядка в В-фазе He^3 . Получен ряд новых эффектов, таких, как расщепление сквошинг- / sg -, действительной сквошинг- / rsq / мод и моды $2\Delta / pb /$ под действием возмущений, существование pb -мод в качестве резонансов, пересечение ветвей sg - и rsq - мод с различными J_2 при ненулевых импульсах и др.

Практическая ценность диссертации состоит в том, что в ней в рамках единого подхода - метода континуального интегрирования - построена микроскопическая теория коллективных возбуждений в сверхтекучих фазах He^3 , пленках He^3 и растворах He^3-He^4 , описывающая одновременно два основных метода экспериментального исследования сверхтекучего He^3 - ультразвуковые и ЯМР эксперименты.

При этом исследованы как голдстоуновские моды, являющиеся отражением свойств симметрии системы, так и нефоновые моды, связанные с различными колебаниями самосогласованного поля.

В диссертации предсказан целый ряд эффектов, допускающих экспериментальную проверку, таких, как расщепление коллективных мод под действием возмущений, пересечение ветвей коллективных мод при нену-

левых импульсах, сверхтекучий переход в пленках He^3 , устойчивость голдстоуновских мод и другие.

В частности, резонансное поглощение ультразвука в pv -моду, обнаруженное в магнитном поле, должно иметь место также в электрическом поле, при наличии сверхтекучего потока и в ряде других случаев.

Электрическое поле приводит к расщеплению мод с $J=2$, которое может наблюдаться в ультразвуковых экспериментах.

Ряд результатов, полученных в диссертации, подтвержден экспериментально (например, расщепление rsq -моды при ненулевых импульсах возбуждений, существование pv -мод в качестве резонансов, двумерная сверхтекучесть в пленках He^3).

Диссертация дает более глубокое понимание коллективных свойств сверхтекучих фаз He^3 , описывает важные особенности спектра коллективных мод.

Результаты, полученные в диссертации, стимулируют постановку оригинальных экспериментов, в частности ультразвуковых и ЯМР, по изучению свойств сверхтекучего He^3 , в том числе пленок He^3 .

На защиту выносятся следующие положения:

1. В А-фазе энергии всех нефоновых мод являются комплексными. Физически это связано с возможностью распада возбуждения на исходные фермионы. Все нефоновые моды затухают умеренно, поскольку мнимые части энергий составляют порядка 15% от вещественных, так что нефоновые моды могут наблюдаться как резонансы в экспериментах по поглощению ультразвука. Учет затухания приводит в силу дисперсионных соотношений к изменению частот нефоновых мод, которые отличаются от вычисленных всеми другими авторами на 2-4%. В приближении слабой связи в А-фазе появляются 4 дополнительные gd -моды, существование которых является следствием наличия скрытой симметрии. В области низких давлений, где эффекты сильной связи малы, эти моды должны наблюдаться экспериментально. Учет эффектов сильной связи уменьшает число gd -мод с 9 до 5, при этом 4 gd -моды переходят во "flapping"-моды. Включение магнитного поля уменьшает число gd -мод с 9 до 6 в приближении слабой связи и с 5 до 4 при учете эффектов сильной связи за счет появления щелей $\sim \mu H$ в спектре gd -мод.

В В-фазе нефоновые моды расщепляются с ростом волнового вектора. Моды с $J=2$ расщепляются в три группы ветвей каждая, что ведет к трехкратному расщеплению спектра поглощения нуль-звука в эти моды, экспериментально наблюдаемому для действительной сквоинг-моды rsq . Коэффициенты дисперсии для всех pv -мод оказываются комплексными, что физически связано с возможностью их распада на отдельные фермионы. Знание коэффициентов дисперсии позволяет более точно определять

из ультразвуковых экспериментов температурную зависимость щели в ферми-спектре.

2. В изотропной В-фазе все gd -моды устойчивы относительно распада на бозе-возбуждения.

В анизотропных фазах А и 2Д, где щель в ферми-спектре исчезает в выделенном направлении (ось орбитальной анизотропии в А-фазе и направление внешнего магнитного поля в 2Д-фазе), устойчивость gd -мод зависит от угла между импульсом коллективного возбуждения и выделенным направлением. Возбуждения оказываются устойчивыми, если их импульсы лежат внутри некоторых конусов, описанных около выделенного направления, вне конусов устойчивости энергии возбуждений становятся комплексными, что связано с возможностью распада куперовских пар.

3. В тонких пленках He^3 (моноатомных и двухатомных) при конечных температурах возможен фазовый переход в сверхтекучее состояние, связанный с появлением в системе дальних корреляций бозе-полей, убывающих ниже фазового перехода степенным образом. Энергетически наиболее выгодными являются две сверхтекучие фазы - а и б - с параметрами порядка $\frac{1}{2} \delta_{a1}(\delta_{i1} + i\delta_{i2})$ и $\frac{1}{2}(\delta_{a1}\delta_{i1} + \delta_{a2}\delta_{i2})$ соответственно, устойчивые относительно малых возмущений. Обе фазы изотропны, температура фазового перехода в сверхтекучее состояние определяется формулой $T_c = \frac{2k_F c_F}{\pi} \exp\left(C - \frac{\pi c_F}{2k_F |g_{el}|}\right)$. Спектр коллективных возбуждений в каждой фазе состоит из 12 мод, из них 3 моды в а-фазе и 4 моды в б-фазе являются голдстоуновскими, остальные моды - нефоновые. Все gd -моды устойчивы относительно распада, нефоновые моды (в отличие от трехмерного случая) остаются вырожденными при ненулевых импульсах.

4. Коллективный спектр сверхтекучих растворов He^3 - He^4 при р-спаривании в ферми-подсистеме содержит 19 ветвей в трехмерном случае и 13 - в двумерном. Взаимодействие между ферми- и бозе-подсистемами раствора ведет к "зацеплению" звуковых мод обеих подсистем и перенормировке их скоростей.

5. Короткодействующее дипольное взаимодействие (магнитное и индуцированное электрическое) точно учитывается в формализме континуального интеграла посредством введения дополнительных степеней свободы, связанных с магнитным (электрическим) полем, порожденным магнитными (электрическими) моментами квазичастиц. Построенные в этих случаях функционалы гидродинамического действия описывают явления ЯМР и систему во внешнем электрическом поле. Без учета деформации щели в ферми-спектре дипольное взаимодействие и электрическое поле ведут к перенормировке законов дисперсии gd -мод: дипольное взаимодействие перенормирует скорость спиновых волн в В-фазе, электрическое поле приводит к анизотропии скорости звука, убывающей в направлениях, отличных от направления

поля (в А- и В-фазах). Аналогичный эффект имеет место в сверхтекучих пленках He^3 .

6. Дипольное взаимодействие и внешние возмущения, такие, как электрическое и магнитное поля, градиенты температур, вращение, приводят к перестройке всего спектра коллективных возбуждений. При этом основным механизмом влияния возмущений на коллективный спектр являются ориентационные эффекты и деформация щели в ферми-спектре.

Дипольное взаимодействие вызывает появление щелей порядка величины продольного ЯМР в спектре спиновых волн, что означает возможность микроскопического описания явлений ЯМР на языке коллективных мод.

Дипольное взаимодействие и внешние возмущения приводят к расщеплению нефононных мод, которое можно наблюдать в ультразвуковых экспериментах, а также к пересечению ветвей мод с $J=2$ при ненулевых импульсах. Расщепление нефононных мод в электрическом поле можно наблюдать в полях порядка $5 \cdot 10^5 + 2,5 \cdot 10^6$ В/см.

Дипольное взаимодействие и внешние возмущения приводят к возможности существования ρ^b -мод в качестве резонансов, что ведет к появлению резонансных механизмов поглощения ультразвука на краю спектра поглощения наряду с механизмом распада куперовских пар. Резонансное поглощение ультразвука в ρ^b -моду, наблюдавшееся в магнитном поле, должно наблюдаться также в электрическом поле при наличии сверхтекучего потока и в ряде других случаев.

Эти положения составляют новое перспективное научное направление в физике конденсированного состояния: исследование и применение коллективных мод параметра порядка в сверхтекучих квантовых жидкостях.

Личный вклад автора.

Диссертация обобщает результаты, полученные лично автором, а также в соавторстве с В.Н. Поповым.

В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит выбор направления исследований, постановка задач, развитие метода исследований применительно к поставленным задачам, основной объем вычислительной работы, а также физическая интерпретация результатов и их обобщение.

Автору принадлежит построение модели пленки He^3 , модели сверхтекучего раствора He^3-He^4 , а также обобщение модели трехмерного He^3 для случая учета дипольного взаимодействия и электрического поля.

Апробация работ

Результаты диссертации докладывались на сессии ОНФ АН СССР (Москва, 1980), Всесоюзных совещаниях по физике низких температур НТ-21 (Харьков, 1980) и НТ-22 (Киев, 1982), 4-й общей конференции отделения конденсированной материи Европейского физического общества (Гаага,

Голландия, 1984), 17-й Международной конференции по физике низких температур ЛТ-17 (Карлсруэ, ФРГ, 1984), на научных семинарах в ЛОМИ им. В.А. Стеклова АН СССР, ОИЯИ, ЛПИ им. М.И. Калинина, ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР, НИИ физики РГУ, на Школе по сверхтекучести и избранным вопросам сверхпроводимости (Бакуриани, 1985, 1986), в лаборатории низких температур Хельсинкского технического университета (Финляндия, 1984), в университетах г. Турку, Тампере, Оулу, Квяскюла (Финляндия, 1984).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы работы [1-17].

Объем и структура. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы, включающего 103 наименования. Работа изложена на 208 страницах машинописного текста и содержит 8 рисунков и 1 таблицу.

Содержание работы

Во введении дана постановка задачи, краткая характеристика основного метода исследования - метода континуального интегрирования и содержание диссертации по главам.

В первой главе приведен краткий обзор основных свойств сверхтекучего He^3 и дано теоретическое описание сверхтекучих фаз в рамках модели He^3 , построенной методом функционального интегрирования. Модель описывается функционалом гидродинамического действия (ФГД)

$$\mathcal{S}_h = g^{-1} \sum_{p, i, a} c_{ia}^+(p) c_{ia}(p) + \frac{1}{2} \ln \det \frac{\hat{M}(c, c^+)}{\hat{M}(0, 0)}, \quad (I)$$

определяющим все физические свойства модельной системы.

Здесь $c_{ia}(p)$ - фурье-компоненты бозе-полей $c_{ia}(\vec{x}, \tau)$, описывающих куперовские пары квазифермионов у поверхности Ферми, g - пропорционально амплитуде парного рассеяния квазичастиц, \hat{M} - оператор, зависящий от бозе-полей и параметров квазифермионов. Сверхтекучие фазы получаются как нетривиальные решения условия экстремальности действия $\delta \mathcal{S}_h = 0$. Три из них отождествляются с экспериментально открытыми фазами A , A_1 , B .

Исследование второй вариации действия $\delta^2 \mathcal{S}_h$ для этих фаз позволяет определить число голдстоуновских мод в них. В А-фазе их оказывается 9 (звуковые и орбитальные волны), в В-фазе - 4 (звуковые и спиновые волны), в 2Д-фазе - 6 (звуковые и орбитальные волны).

Во второй главе проведено вычисление полного спектра коллективных мод χ' в А-фазе при нулевом импульсе возбуждений и в В-фазе - при ненулевом импульсе.

х/ Отметим, что в диссертации рассматриваются бесстолкновительные моды, для которых выполняется условие $\omega \tau \gg 1$, где ω - частота коллективной моды, τ - время столкновений квазичастиц.

В-фаза изотропна и закон дисперсии коллективных мод в ней имеет вид

$$E^2(\vec{k}) = \Omega^2 + \lambda k^2 \quad (2)$$

Четыре моды из 18 являются голдстоуновскими, для них $\Omega = 0$. Их существование связано с инвариантностью действия S_k относительно преобразования волновой функции конденсата

$$c_{ia} \rightarrow U e^{i\varphi} c_{ia},$$

зависящего от четырех параметров. Остальные 14 мод являются нефоновыми — имеют щель при $\vec{k} = 0$. Частоты этих мод были вычислены в работах Вдовина, Нагаи, Вольфле и др. $\Omega = \sqrt{8/5} \Delta - rsg$; $\Omega = \sqrt{12/5} \Delta - sq$; $\Omega = 2\Delta - pb$ -моды/. Однако экспериментально возбуждения генерируются ультразвуком с ненулевым импульсом. Это означает, что для описания экспериментальной ситуации необходимо кроме частот нефоновых мод знать еще и коэффициенты дисперсии λ .

Случай ненулевых \vec{k} был рассмотрен в работах Вдовина и Вольфле методом кинетического уравнения и в работе Нагаи с использованием уравнения Бете-Солпитера. Однако pb -моды, а в работе Вольфле также 5 ветвей rsg - и sq -мод, с точностью до k^2 исследованы не были.

В данной главе исследованы все 18 коллективных мод в В-фаза при малых импульсах. Вычислены скорости gd -мод, частоты Ω и коэффициенты дисперсии λ нефоновых мод.

Для вычисления коллективного спектра в области температур $T_c - T \sim T_c$ необходимо разложить $\ln \det$ в (1) по флуктуациям бозе-полей $c_{ia}(p)$ над конденсатными значениями $c_{ia}^{(0)}$, различными для различных фаз.

Сделав в функционале S_k сдвиг $c_{ia}(p) \rightarrow c_{ia}^{(0)}(p) + c_{ia}(p)$, выделим квадратичную форму

$$\sum_p c_{ia}^+(p) c_{jb}(p) A_{ijab}(p) + \frac{1}{2} \sum_p (c_{ia}(p) c_{jb}(-p) + c_{ia}^+(p) c_{jb}^+(-p)) B_{ijab}(p), \quad (3)$$

определяющую в первом приближении бозе-спектр, который находится из уравнения

$$\det Q = 0. \quad (4)$$

Здесь Q — матрица квадратичной формы, определяемая коэффициентами тензорами $A_{ijab}(p)$, $B_{ijab}(p)$. Эти величины пропорциональны интегралам от произведений гриновских функций фермионов. При вычислении этих интегралов весьма эффективным оказывается прием Фейнмана, обычный в релятивистской квантовой теории. С его помощью легко берутся интегралы по параметрам квазифермионов. Разлагая затем полученные выражения по малым импульсам бозе-возбуждений \vec{k} и решая уравнение (4), получим искомые законы дисперсии для gd -, sq -, rsg -мод. pb -моды потребовали специального исследования, поскольку для

них разложение по малым импульсам неприменимо: коэффициенты такого разложения имеют сингулярность при $\omega^2 = -4\Delta^2$. Коэффициенты дисперсии для всех pb -мод оказываются комплексными, что связано с возможностью распада возбуждений на отдельные фермионы.

sq - и rsg -моды, вырожденные при нулевом импульсе, расщепляются в три группы ветвей каждая (при этом вырождение ветвей с $\pm J_z$ остается). Можно наблюдать три пика в спектре поглощения нуль-звука в каждую из мод с $J=2$. Для rsg -мод это расщепление наблюдалось экспериментально Шиварамом и др. в 1982 году.

Уравнения для определения спектра нефоновых мод в А-фаза имеет вид

$$\int_0^1 dx (1-x^2) \frac{\omega^2 + 4(1-x^2)}{\omega \sqrt{\omega^2 + 4(1-x^2)}} \ln \frac{\sqrt{\omega^2 + 4(1-x^2)} + \omega}{\sqrt{\omega^2 + 4(1-x^2)} - \omega} = 0, \\ \int_0^1 dx (1-x^2) \frac{\omega^2 + 2(1-x^2)}{\omega \sqrt{\omega^2 + 4(1-x^2)}} \ln \frac{\sqrt{\omega^2 + 4(1-x^2)} + \omega}{\sqrt{\omega^2 + 4(1-x^2)} - \omega} = 0, \quad (5)$$

причем ветвь, соответствующая последнему уравнению, двукратно вырождена.

Вычисление дает следующие результаты:

$$E_1(0) = \Delta_0 (1,96 - i 0,31); \quad E_2(0) = \Delta_0 (1,17 - i 0,13). \quad (6)$$

Поскольку спектр коллективных мод в А-фаза трехкратно вырожден, получаем, что нефоновый спектр в А-фаза состоит из трех ветвей E_1 и шести — E_2 . Трехкратное вырождение спектра в А-фаза связано с использованием приближения слабой связи, которое хорошо выполняется при малых давлениях. 4 дополнительные gd -моды, существующие в приближении слабой связи, связанные с наличием дополнительного случайного вырождения, также могут наблюдаться при малых давлениях.

Сравнение полученных в диссертации энергий коллективных мод (6) с результатами Вольфле и Тэвордта и др. показывает, что вещественная часть $Re E_1(0)$ на 2% отличается от моды $2\Delta_0$, полученной Вольфле методом кинетического уравнения, а $Re E_2(0)$ на 4% от энергии "clapping" моды $E = 1,22\Delta_0$. Отличие связано с тем, что во всех других работах энергии мод вычислены без учета затухания, что в силу дисперсионных соотношений привело к ошибке и в вычислении действительных частей энергий. Учет в диссертации затухания коллективных возбуждений позволил более точно вычислить и их частоты. Полученная в других работах "flapping" — мода $E = 1,56\Delta_0$ в рассматриваемой модели А-фаза не возникает. Однако ширина этой моды $\Gamma_{fl} \approx \pi \omega_{fl}$ столь велика (на порядок больше, чем у полученной в модели "clapping" — моды $\Gamma_{cl} \approx \frac{\pi}{13} \omega_{cl}$), что "flapping" мода является плохо определен-

ной и потому не столь интересной с точки зрения эксперимента, как хорошо определенная "clapping" - мода. Число мод $1,96 \Delta$ (три) и "clapping" - мод (шесть), полученных в диссертации и в работе Вольфле, совпадает. Отличие связано с появлением в модели четырех дополнительных gd - мод, о которых упоминалось выше, существование которых (связанное с приближением слабой связи) можно считать эффектом малых давлений.

Что касается мнимых частей энергий нефононных мод, то они вычислялись лишь в одной работе Тэвордта и др., где для затухания "clapping" - моды получена величина $0,4 \Delta$, что больше полученного нами значения $0,13 \Delta$. Ветви же $E=1,96 \Delta$ Тэвордтом и др. вообще не получены, так что здесь их затухание вычислено впервые.

Мнимые части энергий $E_1(0)$ и $E_2(0)$ оказываются порядка 15% от вещественных, поэтому затухание мод можно считать умеренным, а сами возбуждения наблюдать как резонансы.

В этой же главе рассмотрено влияние эффектов сильной связи и магнитного поля на структуру коллективного спектра в А-фазе. Показано, что учет эффектов сильной связи уменьшает число gd - мод с 9 до 5 (4 моды переходят во "flapping" - моды). Включение магнитного поля уменьшает число gd - мод с 9 до 6 в приближении слабой связи и с 5 до 4 при учете эффектов сильной связи.

В третьей главе исследована устойчивость gd - мод по отношению к распадам одного возбуждения на несколько других в А-, В-, 2Д-фазах He^3 .

В изотропной В-фазе распад фонона на отдельные фермионы запрещен из-за существования пороговой энергии - энергии связи фермионов в куперовской паре 2Δ . Распад возбуждения на два или несколько возбуждений того же типа кинематически запрещен, если $d^2E/dk^2 < 0$ и кривая $E(k)$ загибается вниз от касательной uK . Это эквивалентно положительности коэффициента дисперсии γ в законе дисперсии

$$E(\vec{k}) = uK(1 - \gamma K^2) \quad (7)$$

при малых K . Поэтому вопрос об устойчивости gd - мод сводится к вычислению поправок к линейному закону дисперсии. Вычисление показывает устойчивость всех gd - мод в В-фазе.

В анизотропных фазах (А, 2Д) энергетическая щель в ферми-спектре зависит от направления в импульсном пространстве и исчезает в выделенном направлении. Поэтому здесь энергетически возможен распад фонона на отдельные фермионы. Вопрос же об устойчивости gd - мод по отношению к распаду на несколько бозе-возбуждений, как и в В-фазе, сводится к нахождению поправок к линейному закону дисперсии. Вычисление показывает, что возбуждение устойчиво, если его импульс лежит

внутри некоторых конусов, описанных около выделенного направления. Вне областей устойчивости энергии возбуждений становятся комплексными, что физически связано с возможностью распада возбуждений на исходные фермионы, импульсы которых близки к выделенному направлению.

Вычисление поправок к линейному закону дисперсии в В-фазе проводится с помощью разложения коэффициентных тензоров $A_{ijab}(\rho)$, $B_{ijab}(\rho)$ до членов $\sim \omega^4, k^4, \omega^2 k^2$ (для gd - мод ω мало, как и k). Для А- и 2Д-фаз коэффициенты при ω^2, k^2 , вообще говоря, логарифмически зависят от $q^2 = \omega^2 + c_F^2 k^2$. Поэтому для этих фаз поправки к линейному закону дисперсии можно получить, аккуратно вычисляя только члены $\sim \rho^2 \ln q^2$.

Экспериментальные исследования тонких пленок He^3 , а также монослоев He^3 , адсорбированных на подложке, показывают, что поведение пленки становится "трехмерным" при толщинах в три и более слоя и остается "двухмерным" для монослоя и двухатомного слоя. Такой вывод следует, в частности, из измерения теплоемкости. Как и для трехмерного He^3 важными методами исследования пленки He^3 должны стать ультразвуковые и ЯМР эксперименты, микроскопическое описание которых основывается на теории коллективных возбуждений в пленках He^3 .

В четвертой главе диссертации построена модель пленки He^3 . В ее рамках исследованы возможные сверхтекучие фазы в пленках He^3 . Две из них, обозначаемые ниже а и б, энергетически наиболее выгодны и устойчивы относительно малых возмущений. Полностью изучены коллективные моды параметра порядка в обеих фазах, как gd , так и нефононные.

Модель пленки описывается ФГД, совпадающим по форме с функционалом (I), но в отличие от трехмерного случая параметром порядка в пленках He^3 является комплексная матрица $2 \times 3 A_{ij}$ (векторный индекс пробегает два значения 1, 2; изотопический индекс j - три значения 1, 2, 3).

Известно, что в двумерных системах при конечных температурах не может быть бозе-конденсата. Однако, как показано, в частности, в работах Березинского и Попова, возможна сверхтекучесть и без бозе-конденсата, связанная с дальними корреляциями, убывающими ниже фазового перехода не экспоненциально, а более медленно. Более того, ряд результатов, полученных при "наивном" предположении о существовании конденсата, остается в силе и при более точном рассмотрении, учитывающем, что бозе-конденсат на самом деле "размывается" длинными волновыми флуктуациями. Это относится, в частности, к температуре фазового перехода, которую можно найти из условия появления нетривиальных решений уравнения $\delta S_k = 0$. Получаем для T_c

$$T_c = \frac{2\kappa_F c_F}{\pi} \exp\left(C - \frac{\pi c_F}{2^2 \kappa_F |g_0|}\right) \quad (8)$$

Здесь C - постоянная Эйлера.

Возможные сверхтекучие фазы исследуются сначала в области Гинзбург-Ландау $|T - T_c| \ll T_c$. Они появляются как нетривиальные решения уравнения $\delta^2 S_H = 0$, имеющего вид

$$-A + \nu A P + 2(\text{tr} A^* A) A + 2A A^* A + 2A^* A^* A - 2A A^* A^* - A^* \text{tr} A A^* = 0. \quad (9)$$

Энергетически наиболее выгодны две изотропные фазы с параметрами порядка

$$a = \frac{1}{2} \delta_{j_1} (\delta_{i_1} + i \delta_{i_2}), \quad b = \frac{1}{2} (\delta_{j_1} \delta_{i_1} + \delta_{j_2} \delta_{i_2}).$$

Вычисление второй вариации действия $\delta^2 S_H$ показывает устойчивость обеих фаз (a и b) относительно малых возмущений в произвольном магнитном поле, позволяет определить фононные переменные (нулевые собственные элементы квадратичной формы $\delta^2 S_H$) и выяснить вопрос об изменении числа gd -мод при включении магнитного поля.

В a -фазе при $H=0$ существуют три gd -моды, а остальные девять мод являются нефононными. При включении магнитного поля одна gd -мода приобретает щель порядка μH и становится нефононной.

В b -фазе из четырех gd -мод (при $H=0$) две становятся нефононными при включении магнитного поля.

Отметим существование в обеих фазах двумерного звука Боголюбова-Андерсона $E = C_F K / \sqrt{2}$, а также устойчивость всех gd -мод в обеих фазах относительно распада.

Здесь же вычислены законы дисперсии всех нефононных мод в a - и b -фазах.

Предсказание сверхтекучих фаз в пленках He^3 стимулировало их дальнейшее теоретическое исследование, а также экспериментальный поиск сверхтекучего перехода, который был в 1985г. обнаружен Сахраджей и др.

В этой же главе рассмотрено поведение корреляторов бозе-полей $\langle C_{i\alpha}(\vec{x}, \tau) C_{j\beta}(\vec{y}, \tau) \rangle$ при $r = |\vec{x} - \vec{y}| \rightarrow \infty$, определяющих наличие сверхтекучих свойств в системе. Как отмечалось выше, для существования сверхтекучести в двумерной системе этот коррелятор должен убывать на больших расстояниях не экспоненциально, а более медленно. В этой главе показано, что коррелятор бозе-полей убывает степенным образом для системы во внешнем поле, что доказывает существование сверхтекучести в пленках He^3 в магнитном поле. В общем случае показано, что теория двумерных сверхтекучих систем типа He^3 при ненулевых температурах связана с задачей об асимптотике корреляторов \tilde{Y} -поля двумерной евклидовой теории.

Растворы He^3 в сверхтекучем He^4 давно изучаются теоретически и экспериментально. В связи с этим естественно возникает вопрос о переходе ферми-компоненты раствора (He^3) также в сверхтекучее состояние. Хофбергер показал, что S -спаривание предпочтительно при низких концентрациях He^3 (до 6,6%), в то время как при концентрациях He^3 более 6,6% и давлении 20 атм p -спаривание будет предпочтительным с температурой фазового перехода от 10^{-4} К до 10^{-2} К (в зависимости от концентрации). S -спаривание было изучено в ряде работ.

В пятой главе изучены коллективные свойства сверхтекучих растворов $He^3 - He^4$ при p -спаривании в He^3 . Исследованы коллективные моды как трехмерных, так и двумерных растворов. Спектр коллективных возбуждений в трехмерном случае состоит из 19 мод, в двумерном - из 13. Одна из 19 (13) мод представляет собой звуковую моду бозе-подсистемы, остальные 18 (12) соответствуют различным коллективным возбуждениям ферми-подсистемы.

В этой главе построен ФД раствора, исследование которого показало, что взаимодействие бозевской и фермиевской подсистем приводит в первом приближении к зацеплению звуковых мод ферми- и бозе-подсистем, для скоростей которых получено биквадратное уравнение^{x/}

$$u^4 - u^2 \left(\frac{C_F^2}{3} + \frac{\rho_0^2}{m} t_{BF} \right) + \frac{C_F^2 \rho_0^2}{3m} \left(t_B - \frac{Z^2 t_{BF}^2 K_F^2}{\pi^2 C_F} \right) = 0. \quad (10)$$

Здесь $\rho_0^2 = \rho_0$ - плотность бозе-конденсата He^4 , t_B - амплитуда парного взаимодействия в бозе-подсистеме.

Из (10) следует, что взаимодействие подсистем, определяемое амплитудой t_{BF} , не меняет сумму квадратов скоростей звуков $u_1^2 + u_2^2$, но уменьшает произведение $u_1^2 u_2^2$ по сравнению с теми же величинами для не взаимодействующих друг с другом подсистем.

Дипольное взаимодействие, несмотря на свою малость ($E_D \sim 10^{-7} \text{ К}$), приводит к ряду важных следствий. Такие явления, как сдвиг поперечного ЯМР в A -фазе, продольный ЯМР в A - и B -фазах, силы осцилляторов для sg -мод связаны с дипольным взаимодействием. Электрическое поле может приводить к ориентационным эффектам в A -фазе - выстраивать орбитальные моменты куперовских пар \vec{L} перпендикулярно \vec{E} .

Поэтому представляется важным и интересным учет дипольного взаимодействия (ДВ) и электрического поля (ЭП) и изучение их влияния на спектр коллективных мод.

В шестой главе развит метод учета ДВ и ЭП. При этом параметр порядка (III) считается невозмущенным (вызываемая ДВ и ЭП деформация III

x/ Уравнение приведено для трехмерного случая.

рассмотрена в следующей главе). С помощью развитого метода изучено влияние ДВ и ЭП на коллективные моды III.

Для точного учета взаимодействия (парного) в формализме континуального интеграла необходимо все члены 4-го порядка по полям, описывающие взаимодействие, каким-либо образом свести к квадратичным для получения гауссовых функциональных интегралов, которые вычисляются точно.

В случае ДВ процедура перехода к гауссовым интегралам осуществляется переходом от стандартного описания ДВ к описанию его с помощью магнитного поля (МП) $\vec{H}(\vec{x}, \tau)$, порождаемого магнитными моментами квазичастиц, для чего под знак интеграла по "медленным" ферми-полям вводится гауссов интеграл по полю $\vec{H}(\vec{x}, \tau)$. Сделав затем в новой переменной сдвиг на квадратичную форму по медленным ферми-полям, уничтожающий член ДВ, получим гауссов интеграл по медленным ферми-полям и полю $\vec{H}(\vec{x}, \tau)$ (перейдя при этом к бозе-полям $c_{ia}(\rho)$). Взяв гауссов интеграл, получим ФГД, описывающий все свойства системы с учетом ДВ, в частности, явления ЯМР.

Аналогичная идея используется и с целью учета ЭП, поляризующего атомы He^3 , между которыми возникает электрическое дипольное взаимодействие. В этом случае все сводится к введению электрического поля $\vec{E}(\vec{x}, \tau)$, порождаемого индуцированными дипольными моментами атомов He^3 $\alpha_i \vec{E}$ (α_i - поляризуемость атома He^3 , \vec{E} - внешнее ЭП).

При вычислении влияния ДВ и ЭП на коллективные моды III показано, что в первом приближении оба возмущения влияют лишь на gd -моды. Так, ДВ в В-фазе лишь перенормирует скорость спиновых волн, а ЭП приводит к анизотропии скорости звука, которая убывает в направлениях, отличных от направления поля. Аналогичный эффект имеет место и в пленках He^3 .

В этой же главе изучено влияние внешнего магнитного поля на коллективные моды в А- и В-фазах с помощью исследования второй вариации действия $\delta^2 S_h$. Рассмотрен вопрос о появлении членов, зависящих от поля, в спектре нефоновых мод.

Мы изучили влияние ДВ и ЭП с помощью учета дополнительных членов в свободной энергии, связанных с этими возмущениями. Ясно, однако, что ДВ, как и любое внешнее возмущение, например, ЭП, МП, сверхтекучий поток (СП), различные эффекты вращения, влияют на структуру III, вызывая его деформацию. Причем, как будет показано в главе УП, это влияние весьма существенно. В А-фазе внешние возмущения фиксируют направления \vec{l} - и \vec{d} -векторов, что ведет к образованию \vec{l} - и \vec{d} -текстур соответственно, а также приводят к деформации щели в ферми-спектре (ДШ).

В В-фазе ДВ и внешние возмущения фиксируют направление \vec{n} -вектора (и угол θ), что ведет к образованию \vec{n} -текстур, интенсивно изучаемых как ЯМР, так и ультразвуковыми методами. Кроме того, ДВ и внешние возмущения приводят к ДШ порядка отношения энергии возмущения к конденсатной энергии. Несмотря на свою малость, ДШ приводит к целому ряду важных следствий. Помимо вышеупомянутых явлений ЯМР, связанных с ДШ, индуцированной ДВ, ДШ вызывает такие эффекты, как гидродинамический сдвиг продольного ЯМР в А- и В-фазах He^3 , связанный с ДШ, обусловленной СП, нелинейный эффект Зеемана для rsq -моды, вызванный ДШ магнитным полем и другие.

В седьмой главе исследовано влияние ДШ, вызванной ДВ, СП, ЭП, МП эффектами вращения (вихрями и гиромагнетизмом) на коллективные моды в В-фазе. Показано, что ДВ приводит к появлению щелей порядка величины продольного ЯМР в спектре продольных спиновых волн, что означает возможность микроскопического описания продольного ЯМР на языке коллективных мод. ДВ ведет к существованию $\rho\delta$ -мод в качестве резонансов, приводя к появлению резонансных механизмов поглощения ультразвука на краю поглощения наряду с механизмом распада куперовских пар, а также к появлению по крайней мере одного пика в ЯМР экспериментах около $E \approx 2\Delta$. ДВ вызывает также расщепление sq - и rsq -мод, относительная величина которого $1,3 \cdot 10^{-5}$. Поскольку точность ультразвуковых экспериментов в настоящее время достигла 10^{-4} и непрерывно растет, можно ожидать, что это расщепление можно будет наблюдать в экспериментах с нуль-звуком в ближайшем будущем. Это расщепление приводит дополнительно к пересечению ветвей sq - и rsq -мод с различными J_z при ненулевых импульсах возбуждений.

ДШ за счет МП приводит к поправкам в спектре коллективных мод $\sim H^2$. Она вызывает расщепление rsq - и sq -мод, обуславливающее как нелинейный эффект Зеемана, ведущий к пересечению ветвей $J=2$ мод с различными J_z в сильных магнитных полях (порядка $1,5 \text{ кГс}$), так и пересечение этих ветвей при ненулевых импульсах возбуждений.

ЭП вызывает аналогичные изменения в спектре коллективных мод. Для наблюдения расщепления rsq - и sq -мод в ЭП в ультразвуковых экспериментах необходимы поля от $5 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ (при $P=0$ и на кривой плавления). Отметим, что величина пробойного поля в He^3 равна $2,7 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{см}}$, так что эффекты ЭП наблюдаемы в ультразвуковых экспериментах в части фазовой диаграммы (при низких давлениях).

СП ведет к расщеплению каждой из нефоновых мод на три группы ветвей. Расщепление sq - и rsq -мод может наблюдаться в ультразвуковых экспериментах как три пика в поглощении нуль-звука в каждой

моду, поскольку относительное расщепление этих мод в области температур $\sim (0,3 \div 0,5) T_c$ при $v_s \approx 1 \text{ мм/с}$ (критические скорости в В-фазе) порядка 10^{-2} (для квадратов частот). ρv -мода также дает один дополнительный пик в поглощении ультразвука и два пика в ЯМР экспериментах. В случае $\gamma=2$ мод расщепление приводит к пересечению ветвей этих мод при ненулевых импульсах. Отметим, что влияние СИ растет с ростом температуры.

Исследование влияния ДШ, вызванной вихрями и гиромагнетизмом, показывает, что вклад вихрей за счет деформации цели мал. Однако он может возрасти и быть более заметным в области $T \rightarrow 0$ и низких давлений.

Недавно обнаружено резонансное поглощение нуль-звука в ρv -моду в магнитном поле. Результаты, полученные в этой главе, показывают, что не только магнитное поле, но и электрическое поле, сверхтекучий поток также приводят к существованию этой моды в качестве резонанса и появлению на краю поглощения резонансных механизмов поглощения нуль-звука наряду с механизмом распада куперовских пар.

В заключение отметим, что продемонстрированная в диссертации чувствительность спектра коллективных мод к различным возмущениям используется сейчас и будет еще шире применяться в дальнейшем для изучения разнообразных свойств сверхтекучих фаз He^3 как в ультразвуковых, так и в ЯМР экспериментах.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бруссов П.Н., Попов В.Н. Об устойчивости бозе-спектра сверхтекучих систем типа He^3 . Ж.эксперим. и теор.физ., 1980, т.78, с.234-245.
2. Бруссов П.Н., Попов В.Н. Нефононные ветви бозе-спектра в В-фазе систем типа He^3 . Ж.эксперим. и теор.физ., 1980, т.78, с.2419-2430.
3. Бруссов П.Н., Попов В.Н. Нефононные ветви бозе-спектра в А-фазе систем типа He^3 . Ж.эксперим. и теор.физ., 1980, т.79, с.1871-1879.
4. Бруссов П.Н. Влияние спин-спинового взаимодействия и магнитного поля на коллективные возбуждения в сверхтекучих фазах He^3 . В кн.: "Вопросы квантовой теории поля и статистической физики", Зап.научн.семинаров ДОМИ АН СССР, 1981, т.101, с.28-45.
5. Бруссов П.Н., Попов В.Н. Сверхтекучесть и бозе-возбуждение в пленках He^3 . Ж.эксперим.и теор.физ., 1981, т.80, с.1565-1576.
6. Brusov P.N., Popov V.N. Superfluidity and bose-excitations of He^3 - films.- Phys.Lett., 1982, v.87A, p.472-474.

7. Бруссов П.Н., Попов В.Н. Бозе-спектр сверхтекучих систем типа He^3 - He^4 . Теор.и матем.физ., 1982, т.53, с.444-455.
8. Бруссов П.Н., Попов В.Н. Коллективные возбуждения в сверхтекучих А- и В-фазах He^3 в электрическом поле. Теор.и матем.физ., 1983, т.57, с.249-256.
9. Бруссов П.Н. Бозе-спектр сверхтекучих пленок He^3 в электрическом поле. Физ. низких температур, 1983, т.9, с.925-932.
10. Brusov P.N., Popov V.N. Bose-spectrum of superfluid solutions He^3 - He^4 .- Phys.Lett., v.101 A, p.154-157.
11. Brusov P.N., Popov V.N. Coupling of the acoustic modes in the superfluid mixtures of He^3 -and He^4 .-Europhysics conference abstracts., 1984, v.8A, p.PI-PO44.
12. Brusov P.N., Popov V.N., Gap distortion and collective modes in He^3 -B.-In Proc.of ITP-17, 1984, North-Holland, Amsterdam, p.781-782.
13. Brusov P.N., Popov V.N., Shivaram B.S.et.al. Dispersion induced splitting of order parameter collective modes in He^3 -B.-In Proc.of ITP-17, 1984, Karlsruhe, North-Holland, Amsterdam, 1984, p.779-780.
14. Brusov P.N., Popov V.N. Effect of gap distortion on collective modes in He^3 -B.-Phys.Rev., 1984, v. 30 B, p.4060-4062.
15. Бруссов П.Н. Деформация цели и коллективные возбуждения в В-фазе He^3 . Ж.эксперим.и теор.физ., 1985, т.86, с.1197-1206.
16. Brusov P.N. The influence of superflow on collective excitations in He^3 -B.- J.low temp.phys., 1985, v.58, p.276-281.
17. Бруссов П.Н., Попов В.Н. Коллективные возбуждения в сверхтекучих квантовых жидкостях. Изд-во Ростовского ун-та, Ростов, 1984, с.200.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 июля 1987 года.