

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

14-2000-25

На правах рукописи
УДК 539.2

СКОМОРОХОВ
Андрей Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНОН-МАКСОННОЙ ОБЛАСТИ
СПЕКТРА ВОЗБУЖДЕНИЙ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ
МЕТОДОМ РАССЕЯНИЯ МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ**

Специальность: 01.04.07 — физика твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2000

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации –
Физико-энергетический институт им. академика А.И. Лейпунского, г. Обнинск

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
А. В. ПУЧКОВ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Н. М. ПЛАКИДА
кандидат физико-математических наук,
Ю. В. ЛИСИЧКИН

Ведущая организация: Национальный научный центр –
Харьковский физико-технический институт, г. Харьков

Защита состоится “___” _____ 2000 г. в ___ час. ___ мин.
на заседании диссертационного совета Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной
физики им. И.М. Франка и Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова
Объединенного института ядерных исследований (141980, г. Дубна, Московская
область).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан “___” _____ 2000 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук



А. Г. Попеко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Жидкий ${}^4\text{He}$ уже в течение многих лет вызывает устойчивый интерес исследователей. Как известно гелий не затвердевает при его охлаждении вплоть до абсолютного нуля температур и является, таким образом, единственной бозе-жидкостью свойства которой при низких температурах в полной мере определяются квантовыми явлениями. Наиболее ярким проявлением этого являются: фазовый переход в сверхтекучее состояние при $T=2.17\text{ K}$, явление конденсации Бозе-Эйнштейна в импульсном пространстве и уникальный вид ФОНОН-МАКСОН-РОТОННОЙ дисперсионной кривой спектра возбуждений (т.н. кривая Ландау).

Большое количество экспериментальных исследований самых разнообразных уникальных макроскопических свойств и явлений в жидком нормальном и особенно в сверхтекучем гелии, теоретических феноменологических и полуфеноменологических теорий привели к достаточно адекватному описанию необычных свойств гелия на макроскопическом уровне [1, 2]. Вместе с тем связь на микроскопическом уровне между упомянутыми в самом начале явлениями сверхтекучести, бозе-конденсации и видом дисперсионной кривой энергетических возбуждений остается до настоящего времени не вполне ясной.

Определенные успехи в построении микроскопического описания жидкого ${}^4\text{He}$ связаны с развивающейся в последнее время квантово-полевой теорией, в рамках которой динамика жидкого гелия связывается с наличием в нем двух разных по своей природе, ветвей элементарных возбуждений [3-12]. Это возбуждения моды коллективных возбуждений плотности типа нулевого звука при малых импульсах (фононный участок дисперсионной кривой) и моды одночастичных возбуждений при больших импульсах (максон-ротонный участок). Мода одночастичных возбуждений связана с выходом атома ${}^4\text{He}$ из конденсатного состояния и может наблюдаться только в сверхтекучей фазе гелия, когда часть атомов занимает самое низкоэнергетическое состояние с импульсом равным нулю, образуя тем самым бозе-конденсат.

При таком подходе характер дисперсионной кривой непосредственно связывается с наличием в гелии бозе-конденсата и впервые ставится вопрос о гибридизации (взаимодействии) двух различных по своей природе ветвей спектра в диапазоне волновых векторов, где существуют оба типа возбуждений.

К настоящему времени эта теория сформулирована лишь в самых основных чертах. Первая полуколичественная модель Глайда-Гриффина в рамках этого подхода

лишь качественно воспроизводит экспериментальные данные [13, 14]. Трудности, которые возникают при попытках создать количественную модель, связаны в частности с недостатком систематических, надежных экспериментальных данных полученных в широком диапазоне изменения температуры, как внешнего параметра системы с точностью предельно достижимой в настоящее время.

Получить такие экспериментальные данные, восполнив тем самым этот пробел и обсудить их с точки зрения последних теоретических представлений, явилось основной целью и результатом настоящих исследований, что и определяет их актуальность.

Цель работы состояла в получении прецизионных, систематических данных по динамике жидкого гелия методом неупругого рассеяния медленных нейтронов. Предполагалось, что анализ данных позволит дать ответ об эффективности квантово-полевого подхода в понимании природы спектра возбуждений в ${}^4\text{He}$. Это касается проверки основного предположения этой теории состоящего в том, что дисперсионная кривая спектра возбуждений в гелии состоит из моды коллективных возбуждений и моды одночастичных возбуждений, которая связана с существованием в ${}^4\text{He}$ макроскопической фракции бозе-конденсата (т.е. обусловлена его квантовой природой). Такой анализ является попыткой экспериментальной проверки существования корреляции между уникальным видом спектра возбуждений ${}^4\text{He}$, его сложной температурной зависимостью и существованием в сверхтекучей фазе ${}^4\text{He}$ макроскопической фракции бозе-конденсата. Для этого потребовалось:

1. Измерить дважды-дифференциальные сечения (ДДС) рассеяния медленных нейтронов жидким гелием в необходимой области передач энергии и углов рассеяния и широком диапазоне изменения температуры как внешнего параметра системы.

2. Преобразовать экспериментальные ДДС в фундаментальную характеристику вещества – динамический структурный фактор $S(Q,\omega)$ – и проследить его температурную зависимость.

3. Выделить из экспериментального $S(Q,\omega)$ его однофононную часть – $S_I(Q,\omega)$. Проанализировать температурную зависимость $S_I(Q,\omega)$ с использованием модели затухающего гармонического осциллятора [15] и модели Глайда-Гриффина [13, 14].

6. С помощью анализа температурной зависимости $S_I(Q,\omega)$ исследовать вопрос о возможной корреляции между уникальным видом спектра возбуждений сверхтекучего гелия и явлением бозе-конденсации.

Научная новизна работы.

1. Впервые экспериментально получены спектры $S(Q, \omega)$ жидкого гелия при волновых векторах $0.2 < Q < 1.2 \text{ \AA}^{-1}$ с подробной температурной зависимостью в диапазоне температур 0.4-2.22 К ($T=0.44, 0.5, 1.41, 1.45, 1.52, 1.53, 1.73, 1.81, 1.96, 2.05, 2.10, 2.21, 2.22$ К).
2. Из экспериментальных спектров $S(Q, \omega)$ жидкого гелия выделена его однофононная составляющая $S_I(Q, \omega)$. Впервые проведен комплексный анализ температурной зависимости однофононной составляющей $S(Q, \omega)$ жидкого гелия, который позволяет сделать следующие выводы:
 3. Обнаружены и четко определены три области с характерной температурной зависимостью $S_I(Q, \omega)$.
 - Однофононные возбуждения в области волновых векторов $0.2 < Q < 0.3 \text{ \AA}^{-1}$ практически не зависят от температуры, что характерно для моды коллективных возбуждений плотности типа нулевого звука.
 - При волновых векторах больше 0.73 \AA^{-1} однофононный пик существенно зависит от температуры, причем основные изменения $S_I(Q, \omega)$ происходят при T близких к T_λ . При $T > T_\lambda$ острый пик полностью исчезает, превращаясь в плохо определенный континуум. Такое поведение характерно для моды одночастичных возбуждений, которая наблюдается в $S(Q, \omega)$ только при наличии в ^4He макроскопической фракции бозе-конденсата.
 - Однофононный пик в области $0.3 < Q < 0.73 \text{ \AA}^{-1}$ проявляет температурную зависимость, отличающуюся от зависимости в области максона. Область волновых векторов $0.3 < Q < 0.73 \text{ \AA}^{-1}$ является переходной от одного типа возбуждений (моды коллективных возбуждений) к другому типу возбуждений (моды одночастичных возбуждений).
 4. Исследована температурная зависимость изменения формы однофононной составляющей $S(Q, \omega)$. При этом в области волновых векторов $0.3 < Q < 0.73 \text{ \AA}^{-1}$ впервые была обнаружена особенность, которая заключается в появлении дополнительной интенсивности в $S(Q, \omega)$ при энергии чуть большей энергии однофононного пика. Обнаруженная особенность является первым экспериментальным подтверждением теоретического предсказания Гриффина-

Свенссона о появлении интенсивности в $S(Q, \omega)$ вследствие гибридизации моды одночастичных возбуждений и моды нулевого звука [16, 17].

5. Проведен анализ температурной зависимости $S(Q, \omega)$ с использованием параметризованной модели Глайда-Гриффина [13, 14]. Анализ показал, что модель качественно воспроизводит, наблюдаемую в эксперименте и характерную для жидкого ${}^4\text{He}$ особенность: существование в $S(Q, \omega)$ острого пика при $Q > 0.73 \text{ \AA}^{-1}$ в сверхтекучей фазе и его исчезновение (превращение в плохо определенный континуум) в нормальной фазе жидкости.
6. В рамках развития методики исследования динамики жидкого гелия впервые изучено влияние сильной дисперсии на функцию разрешения спектрометра ДИН-2ПИ. В результате моделирования рассеяния нейтронов жидким ${}^4\text{He}$ методом Монте Карло установлено, что форма функции разрешения имеет несимметричный вид. Созданная программа расчета функции разрешения может использоваться при проведении исследований на спектрометре ДИН-2ПИ на других системах с произвольным законом рассеяния.

Научная и практическая значимость работы. Полученные результаты носят фундаментальный характер и представляют значительный интерес для понимания и развития теории квантовых жидкостей на микроскопическом уровне.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XX Международной Конференции по Физике Низких Температур (Юджин, США, 1993), XXI Международной Конференции по Физике Низких Температур (Прага, Чехия, 1996), на III Конференции по жидкому состоянию (Норидж, Англия, 1996), на I Европейской конференции по рассеянию нейтронов (Интерлакен, Швейцария, 1996), на XXXI Совещании по физике низких температур (Москва, 1998), на II Европейской конференции по рассеянию нейтронов (Будапешт, Венгрия, 1999), на XVI Совещании по использованию рассеяния нейтронов в исследованиях конденсированного состояния (Обнинск, 1999).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 12 работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 117 страниц, 34 рисунков, 4 таблицы и список цитированной литературы из 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована постановка задачи и ее актуальность, приведены основные положения выносимые на защиту, дано краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе дается обзор современного состояния проблемы исследования жидкого ${}^4\text{He}$ в области малых Q . Рассмотрена возможная корреляция явления бозе-конденсации с проявляемыми динамическими свойствами ${}^4\text{He}$. Рассмотрено состояние проблемы начиная от первых работ начала шестидесятых годов и до настоящего времени. На основе уже имеющегося экспериментального материала и различных теоретических моделей обосновывается выбор метода исследования и параметров эксперимента.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной части работы: описывается методика эксперимента, характеристики спектрометра ДИН-2ПИ и условия проведения эксперимента. С учетом имеющихся задач и реальных характеристик спектрометра проводится оптимизация эксперимента: выбор начальной энергии нейтронов и параметров работы узлов спектрометра. Изложена методика первичной обработки данных, расчета и экспериментальной проверки функции разрешения.

Экспериментальная часть работы выполнена на спектрометре ДИН-2ПИ в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка ОИЯИ (г. Дубна). Измерения проводились при работе реактора ИБР-2 на средней мощности 2 МВт с частотой повторения импульсов мощности 5 Гц. Рассеяние медленных нейтронов жидким гелием измерялось в серии экспериментов: при температурах 0.44, 0.5, 1.41, 1.45, 1.52, 1.53, 1.73, 1.81, 1.96, 2.05, 2.10, 2.21, 2.22 К.

Для исследования ${}^4\text{He}$ при температурах 0.4–4.2 К использовался криостат разработанный в ХФТИ (г. Харьков, Украина) совместно с ФЭИ (г. Обнинск) (рис. 1). Криостат имел следующие характеристики: Объем образца - 4 л. Время непрерывного поддержания температуры – 72 часа. Точность поддержания температуры – 0.001 К. Образец представлял собой алюминиевый контейнер в форме цилиндра высотой 20 см и диаметром 15 см, наполненный высокочистым ${}^4\text{He}$. Внутрь контейнера для уменьшения многократного рассеяния была помещена сборка из тонких кадмиевых дисков, делящая объем контейнера на равные слои толщиной 2 см.

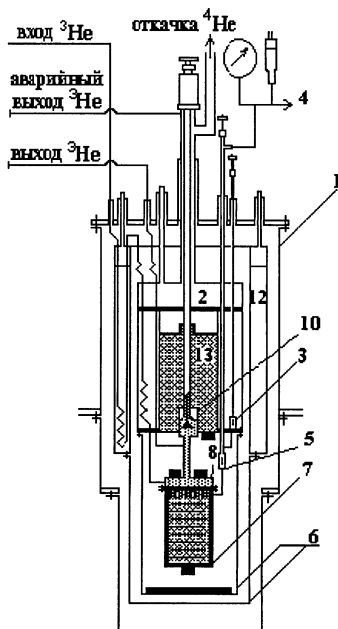


Рисунок 1. Схема криостата. 1- вакуумный корпус; 2-гелиевый бак; 3, 5 – вентили для наполнения контейнера образца; 4 – откачка гелия из основного бака; 6, 7 – теплозащитные экраны; 8 - ^3He ванна, 9- температурные датчики; 10 – вентиль откачки ^3He ; 12 – азотный бак; 13 – адсорбционный насос для откачки ^3He .

В эксперименте использовались нейтроны с начальной энергией $E_0 = 2$ мэВ. Выбор начальной энергии нейтронов определялся компромиссом между достижением трех условий:

1. обеспечение необходимого динамического диапазона измерения.
2. обеспечение максимальной интенсивности падающих нейтронов.
3. достижение необходимого разрешения.

Увеличение начальной энергии нейтронов приводит к увеличению интенсивности налетающих нейтронов и расширению динамического диапазона измерения. В то же время, уменьшение начальной энергии нейтронов ведет к улучшению разрешения. Использование нейтронов с начальной энергией $E_0 = 2$ мэВ, обеспечило разрешение спектрометра по начальной энергии $\Delta E_0 = 0,10-0,05$ мэВ (5-2.5 %), что несколько лучше разрешения реализованного в исследовании жидкого ^4He проведенного на спектрометре *IN-6* Андерсоном, Стирлингом и др. [18, 19]. Время экспозиции

измерения ${}^4\text{He}$ при одной температуре в экспериментах составляло около 48 часов, что обеспечивало высокую статистическую точность полученных данных. Динамическая область измерения включала в себя передачи энергии характерные для однофононного и низкоэнергетичной части многофононного рассеяния в фонон-максонных участках дисперсионной кривой.

Экспериментальные спектры рассеянных нейтронов после внесения поправок на фоновое рассеяние, ослабление потока нейтронов в образце, рассеяние от контейнера и эффективность детекторов преобразованы в спектры $S(Q, \omega)$ при постоянной передаче волнового вектора.

Для корректного учета влияния функции разрешения на форму экспериментальных спектров рассеянных нейтронов, был проведен расчет функции разрешения методом Монте Карло. Расчет показал, что форма функции разрешения при рассеянии нейтронов гелием имеет несимметричный вид (рис. 2).

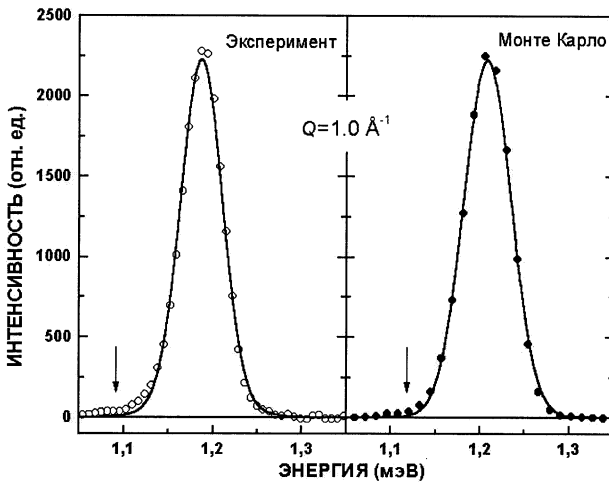


Рисунок 2. Сравнение расчетной функции разрешения и экспериментальных гелиевых пиков при $Q=1.0 \text{ \AA}^{-1}$ и $T=0.44 \text{ К}$. Стрелочками на рисунке помечены затянутое низкоэнергетическое крыло экспериментальной функции разрешения и то, как воспроизводит эту особенность расчет.

Форма смоделированной функции разрешения качественно совпала с формой пика рассеянных нейтронов жидким ${}^4\text{He}$ при самой низкой температуре – 0.44 К. Сравнение расчетной функции разрешения и экспериментальных спектров рассеянных нейтронов при $T=0.44$ К показало, что асимметрия в форме функции разрешения обусловлена сильной дисперсией спектра возбуждений жидкого ${}^4\text{He}$, отклонением дисперсионной зависимости от линейного вида.

В третьей главе представлены экспериментальные данные и проводится их анализ. Для анализа температурной зависимости однофононной части из экспериментальных спектров $S(Q,\omega)$ сначала была извлечена его многофононная составляющая $S_M(Q,\omega)$. Для этого использовалась модель простого вычитания многофононной части [20], которая заключается в следующем. Многофононная часть определяется при $T < 1$ К, когда однофононный пик и многофононная часть хорошо отделены друг от друга по энергии. Затем $S_M(Q,\omega)$ вычиталась из экспериментальных спектров $S(Q,\omega)$ при всех остальных, более высоких температурах. Температурная зависимость параметров однофононной части $S(Q,\omega)$ интенсивности - $Z(Q,T)$, положения - $\omega(Q,T)$, полуширины - $\Gamma(Q,T)$, были получены путем аппроксимации экспериментального однофононного пика сверткой *функции затухающего гармонического осциллятора* (ЗГО-функции) – описывающей гелиевый пик и функции разрешения. Параметры функции разрешения были получены предварительно из данных по рассеянию нейтронов жидким гелием при $T=0.44$ К и фиксировались, при определении параметров ЗГО-функции. По характеру температурной зависимости $S(Q,\omega)$ были выделены три характерные области температурной зависимости его однофононной части.

- Однофононные возбуждения в области волновых векторов $0.2 < Q < 0.3 \text{ \AA}^{-1}$ не проявляют видимой температурной зависимости, не реагируют на переход T_λ и являются модой коллективных возбуждений, характерной для всех простых жидкостей (рис.3, 4, 5). Превышение групповой скорости возбуждений скорости распространения первого звука в этой области волновых векторов (явление аномальной дисперсии), линейная зависимость полуширин возбуждений от Q (не характерная для моды первого звука) (рис. 6, 7), указывают на то, что эти возбуждения являются бестолкновительной модой нулевого звука [21, 22].
- При волновых векторах больше 0.73 \AA^{-1} однофононный пик существенно зависит от температуры (рис.3, 4, 5). Основные изменения $S(Q,\omega)$ происходят при T близких к

T_λ . При этой температуре острый пик полностью исчезает из $S(Q, \omega)$, превращаясь в плохо определенный континуум при $T > T_\lambda$. Это дает основания трактовать его при этих значениях Q как моду одночастичных возбуждений, наблюдаемую в $S(Q, \omega)$ только при наличии в сверхтекучей фазе жидкого ^4He макроскопической фракции бозе-конденсата.

- В области волновых векторов $0.3 < Q < 0.73 \text{ \AA}^{-1}$ начинает проявляться температурная зависимость однофононного пика, характерная для моды одночастичных возбуждений (рис.3, 4, 5). Эта область является переходной от одного типа возбуждений (моды коллективных возбуждений) к другому (моды одночастичных возбуждений).

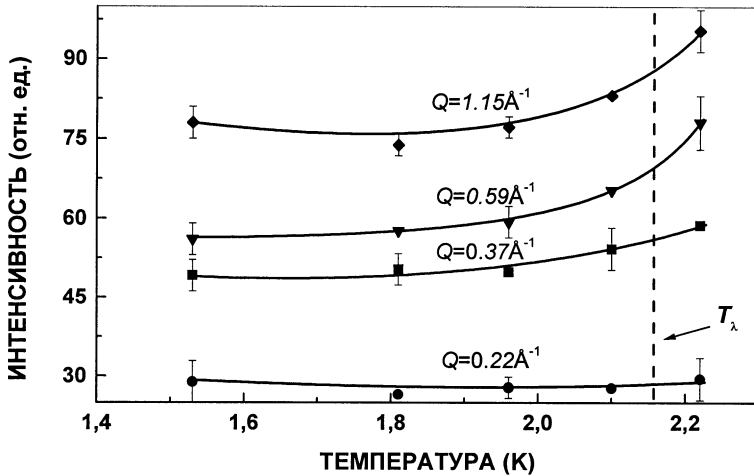


Рисунок 3. Зависимость от температуры интенсивности однофононного пика при разных значениях волнового вектора. Пунктирная линия соответствует температуре сверхтекучего перехода ^4He .

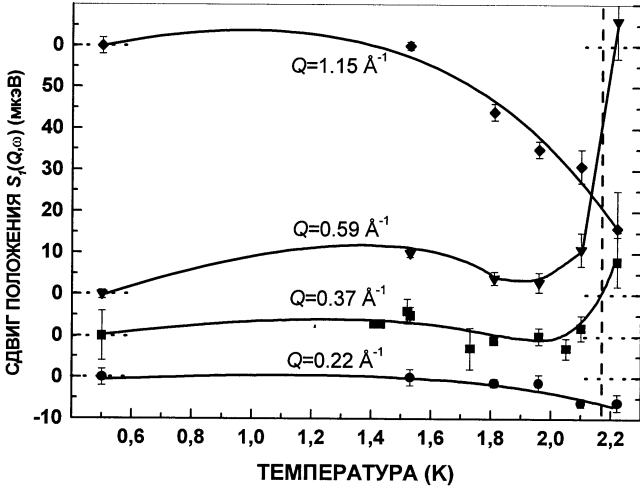


Рисунок 4. Изменение с температурой положения однофононного пика при разных значениях волнового вектора. Линии, соединяющие точки проведены на глаз. Пунктирная линия соответствует температуре сверхтекучего перехода ^4He .

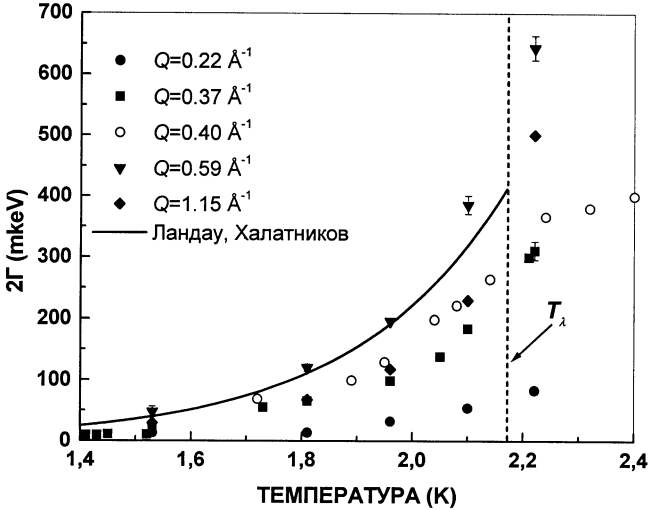


Рисунок 5. Изменение с температурой полуширины однофононного пика при разных значениях волнового вектора. Сплошная кривая расчетное значение полуширины однофононного пика в области ротона. Пунктирная линия соответствует температуре сверхтекучего перехода ^4He .

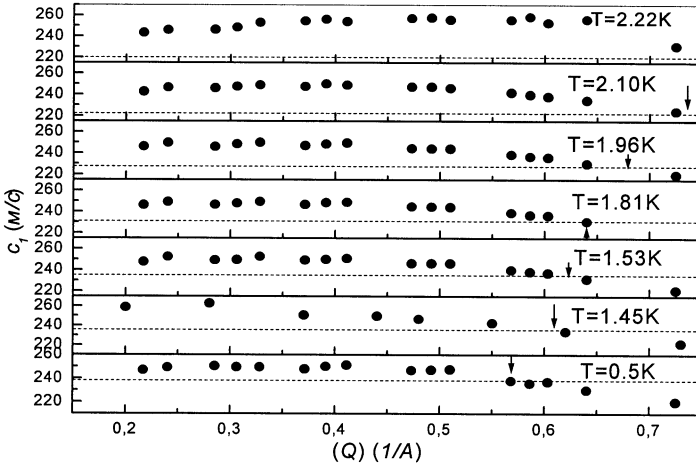


Рисунок 6. Групповая скорость возбуждений для различных температур при $0.2 < Q < 0.73 \text{ \AA}^{-1}$. Пунктирной линией обозначена скорость первого звука в ^4He для соответствующей температуры, стрелочками отмечена область окончания области аномальной дисперсии.

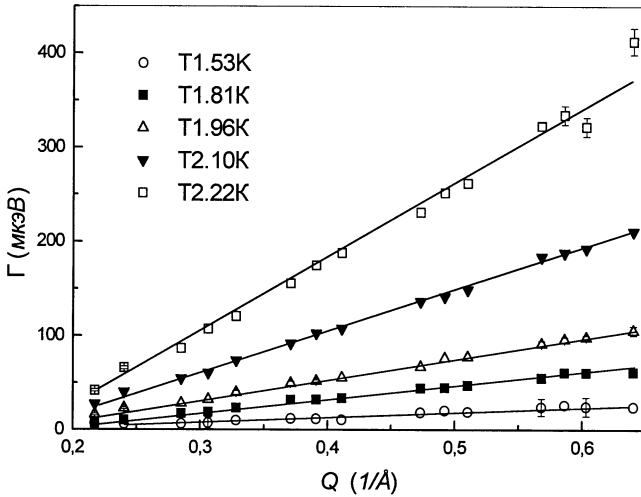


Рисунок 7. Зависимость полуширины однофононного пика от волнового вектора в области аномальной дисперсии для различных температур. Прямые, соединяющие экспериментальные точки, проведены на глаз.

В области $0.3 < Q < 0.73 \text{ \AA}^{-1}$ нами впервые была обнаружена особенность, которая заключается в появлении дополнительного, широкого пика при энергии чуть большей энергии однофононного пика (рис. 8, 9, 10). Интенсивность этой особенности растет с температурой вплоть до T_λ . При $T > T_\lambda$ особенность не наблюдается. Для адекватного описания $S_I(Q, \omega)$ в сверхтекучей фазе гелия при $T = 2.05, 2.10 \text{ K}$ и $0.37 \text{ \AA}^{-1} < Q < 1.0 \text{ \AA}^{-1}$ нами была применена двухкомпонентная модель, которая заключалась в суперпозиции двух ЗГО-функций, свернутых с функцией разрешения (результаты двухкомпонентного описания показаны на рис. 11). Интенсивность первой компоненты (основной однофононный пик) возрастает с ростом волнового вектора, интенсивность второй (более высокоэнергетичной) компоненты имеет максимум при $Q = 0.55 - 0.62 \text{ \AA}^{-1}$, а при $Q = 0.37$ и 1.0 \AA^{-1} ее интенсивность исчезающе мала. Результаты двухкомпонентного описания $S_I(Q, \omega)$ качественно совпали с результатами теоретической работы Гриффина-Свенссона [16, 17], в которой предсказывается появление интенсивности в этом диапазоне $Q - \omega$ $S(Q, \omega)$ вследствие проявления гибридизации моды нулевого звука и моды одночастичных возбуждений. Теория на ее современном этапе развития предсказывает появление интенсивности в указанной области $Q - \omega$, вследствие гибридизации моды коллективных возбуждений и моды одночастичных возбуждений, хотя детали самого механизма гибридизации пока не разработаны [13-17]. Наблюдение этой особенности в области $0.3 < Q < 0.73 \text{ \AA}^{-1}$ и ее температурная зависимость подтверждают вывод о том, что эта область является областью одновременного существования моды одночастичных возбуждений и моды нулевого звука.

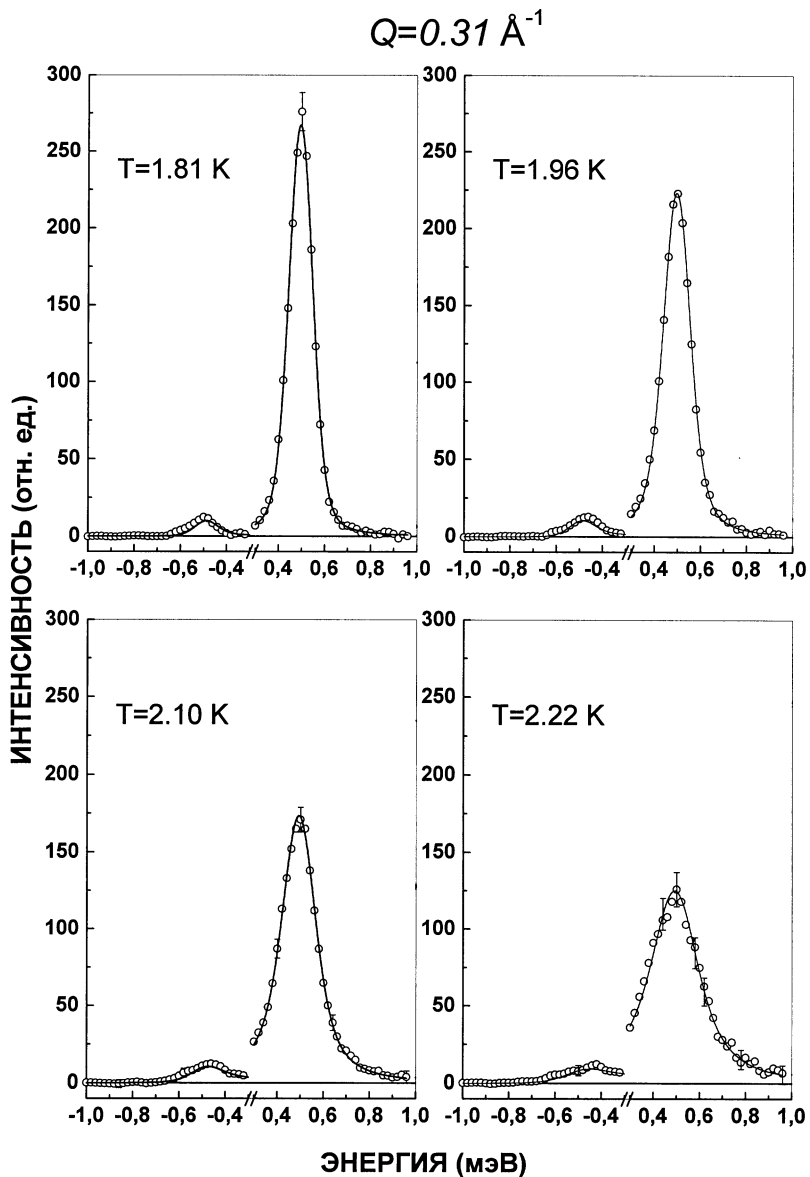


Рисунок 8. Изменение с температурой однофононной части $S(Q, \omega)$ жидкого ^4He при $Q=0.31 \text{ \AA}^{-1}$. Сплошная кривая соответствует подгоночной кривой, в виде свертки одной ЗГО-функции и функции разрешения. Экспериментальная ошибка в точке обозначена усами.

$$Q=0.59 \text{ \AA}^{-1}$$

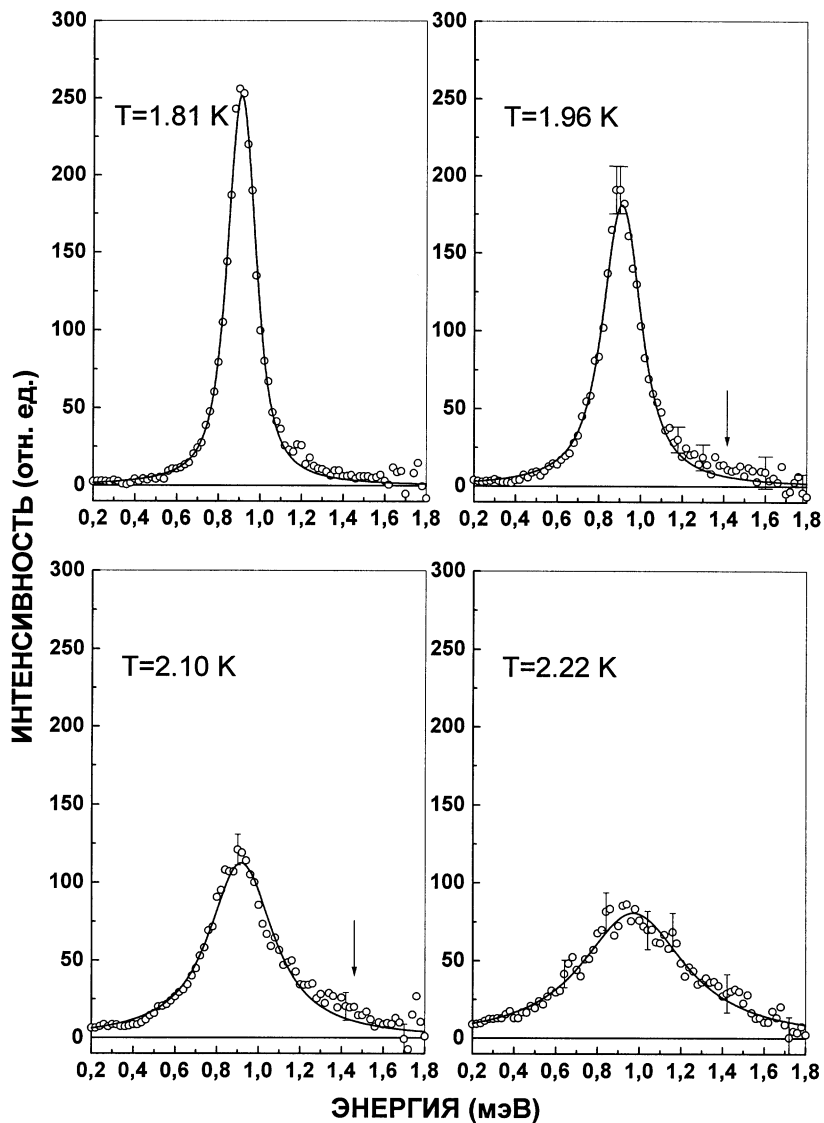


Рисунок 9. Изменение с температурой однофононной части $S(Q, \omega)$ жидкого ^4He при $Q=0.59 \text{ \AA}^{-1}$. Обозначения такие же, как и на рис. 8. Стрелочками помечена область наблюдаемой особенности, которая наиболее сильно проявляется при $T=2.10 \text{ K}$.

$$Q=1.15 \text{ \AA}^{-1}$$

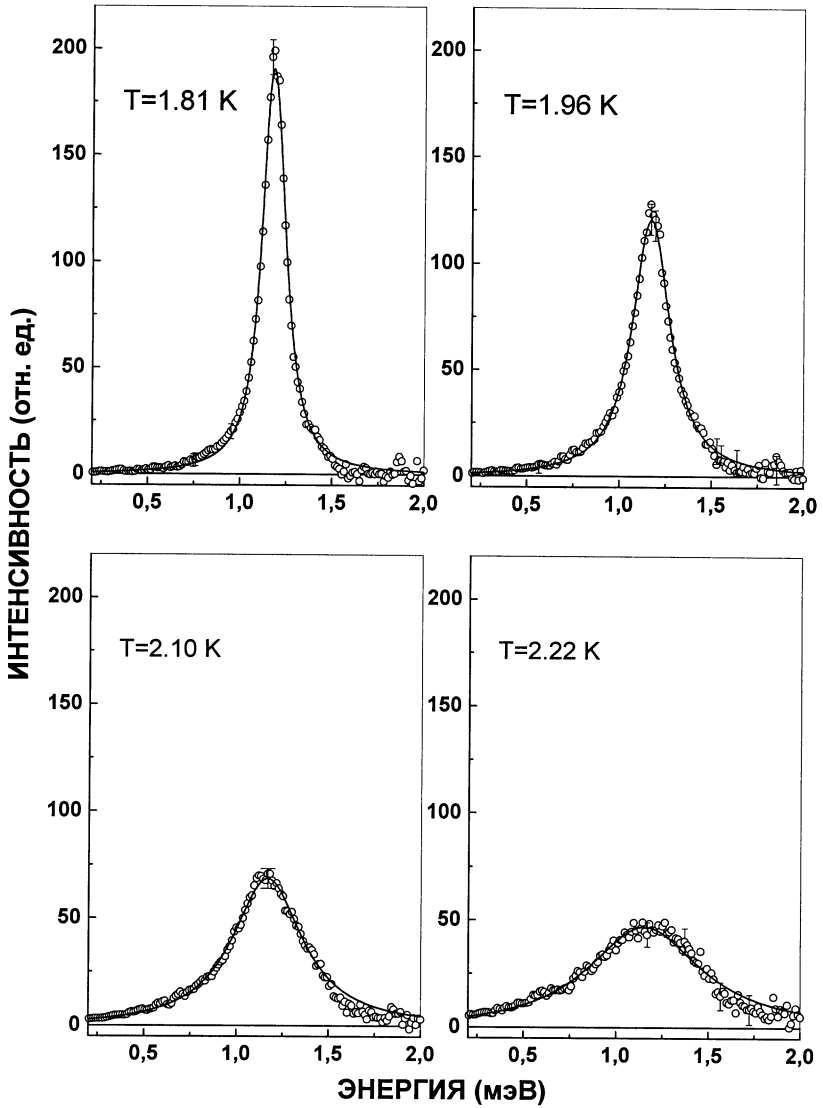


Рисунок 10. Изменение с температурой однофононной части $S(Q, \omega)$ жидкого ^4He при $Q=1.15 \text{ \AA}^{-1}$. Обозначения такие же, как и на рис. 8, 9.

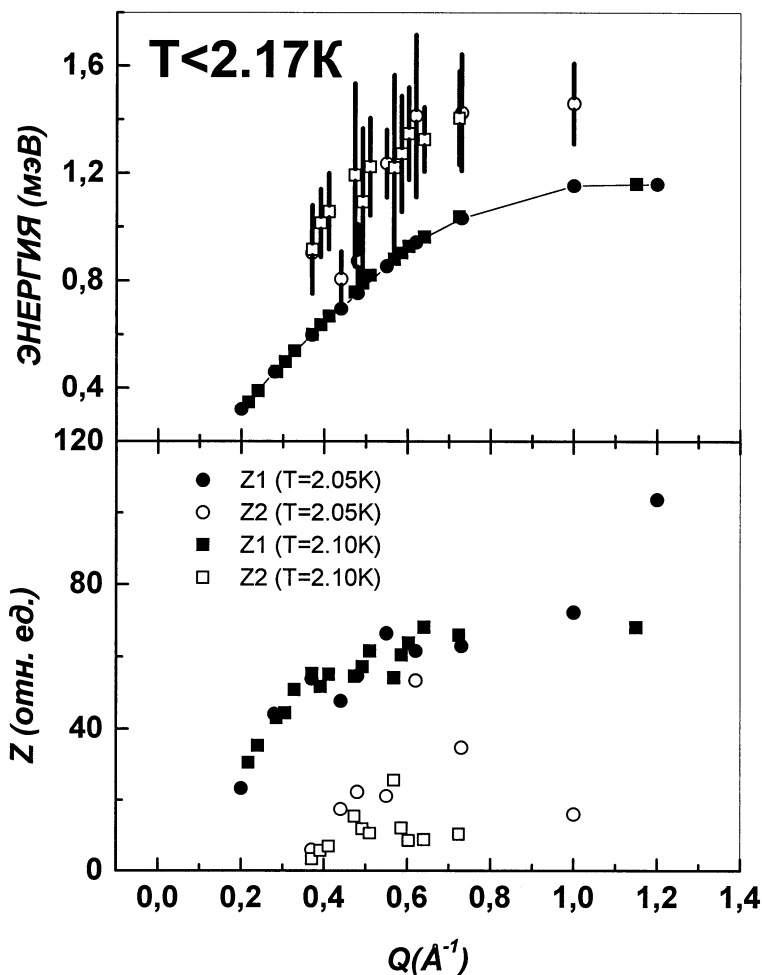


Рисунок 11. Параметры двухкомпонентной модели описания $S(Q, \omega)$ жидкого ${}^4\text{He}$ при $T=2.05$ и 2.10 K (кружочки соответствуют $T=2.05\text{K}$ квадратики -2.10K). На верхнем рисунке показаны дисперсионная зависимость основного однофононного пика. Положение особенности отмечено черточками, которые обозначают ее полуширину. На нижнем рисунке изображена зависимость их интенсивности. Пустые символы на обоих рисунках соответствуют более высокоэнергетичной компоненте, заполненные - основному однофононному пику.

Для описания температурной зависимости $S(Q, \omega)$ нами была применена модель Глайда-Гриффина [13, 14], которая достаточно хорошо воспроизводит, наблюдаемую в эксперименте и характерную только для жидкого ${}^4\text{He}$ особенность: существование в $S(Q, \omega)$ острого пика при $Q > 0.73 \text{ \AA}^{-1}$ в сверхтекучей фазе и его исчезновение (превращение в плохо определенный континуум) в нормальной фазе жидкости (рис. 12). Отметим, что модель Глайда-Гриффина - впервые учитывает явление бозе-конденсации. В этой главе также рассматривается перспективность дальнейшего исследования $S(Q, \omega)$ жидкого ${}^4\text{He}$ в области малых Q .

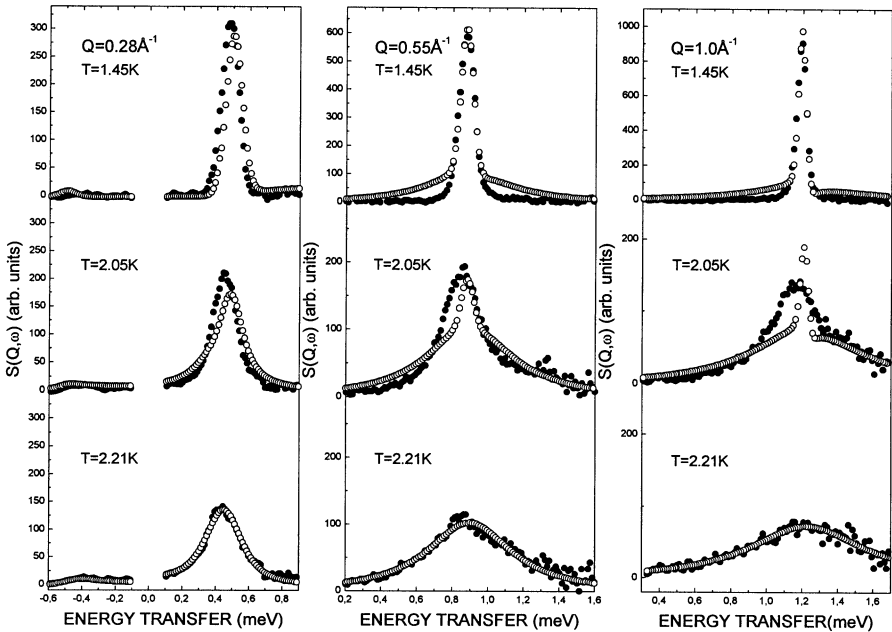


Рисунок 12. Параметризация $S_l(Q, \omega)$ жидкого ${}^4\text{He}$ по модели Глайда-Гриффина при $Q=0.28; 0.55; 1.00 \text{ \AA}^{-1}$. Заполненные кружочки соответствуют экспериментальному $S_l(Q, \omega)$, пустые кружочки - модели Глайда-Гриффина.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые проведены систематические прецизионные измерения ДДС жидкого ^4He в фонон-максонной области дисперсионной кривой с подробной температурной зависимостью от 0.4 до 2.22 К.
2. Экспериментальные спектры ДДС преобразованы в спектры $S(Q, \omega)$ при постоянной передаче импульса с учетом методических поправок на фоновое рассеяние, ослабление потока нейтронов в образце, рассеяние от контейнера и эффективность детекторов. Из экспериментальных спектров $S(Q, \omega)$ гелия выделена однофононная составляющая $S_I(Q, \omega)$.
3. Исследована температурная зависимость $S_I(Q, \omega)$ в интервале температур от 0.44 до 2.22 К при волновых векторах от 0.2 до 1.2 \AA^{-1} . Полученные данные по температурной зависимости параметров однофононного пика $Z(Q, T)$ – интенсивности, $\omega(Q, T)$ – энергии и $\Gamma(Q, T)$ – полуширины, которые существенно дополняют уже имеющиеся в литературе. В температурной зависимости энергии возбуждения $\omega(Q, T)$ наблюдается скачок при температуре чуть ниже T_λ и $Q > 0.3 \text{ \AA}^{-1}$, что подтверждает результаты более ранних измерений. Впервые показано, что при волновых векторах меньше 0.3 \AA^{-1} $\omega(Q, T)$ не зависит от температуры. На основании анализа температурной зависимости $S_I(Q, \omega)$, которая существенно различна при разных Q , делается вывод о том, что возбуждения при $Q < 0.3 \text{ \AA}^{-1}$ являются коллективными возбуждениями типа нулевого звука, в то время как возбуждения в максонной области являются модой одночастичных возбуждений. Область волновых векторов $0.3 < Q < 0.73 \text{ \AA}^{-1}$ является переходной от одного типа возбуждений к другому.
4. Впервые наблюдается и описана особенность динамического структурного фактора жидкого гелия при волновых векторах от 0.37 до 0.73 \AA^{-1} . На основании зависимости этой особенности от температуры, она интерпретируется как проявление гибридизации между модой коллективных возбуждений и модой одночастичных возбуждений, согласно работе Свенсона-Гриффина [15].
5. В рамках развития методики исследования динамики жидкого гелия в работе изучены методические эффекты, в частности влияние сильной дисперсии на функцию разрешения спектрометра. Установлено, что форма функции разрешения

при рассеянии нейтронов жидким гелием имеет несимметричный вид. Создана программа для расчета функции разрешения, которая может быть использована при проведении исследований на спектрометре ДИН-2ПИ и на других системах с произвольным законом рассеяния.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Bogoyavlenskii I. V., Puchkov A. V., Skomorokhov A. N., Poupko S. V., Neutron scattering study of He-4 $S(Q, \omega)$ at the phonon-maxon region // Physica B. 1997. V. **234-236**. P. 324-326.
2. Благовещенский Н. М., Богоявленский И. В., Пучков А. В., Скоморохов А. Н. Рассеяние нейтронов жидким He-4 при 0.44К: Препринт ФЭИ №2515. Обнинск, 1996.
3. Blagoveshchenskii N. M., Bogoyavlenskii I. V., Karnatsevich L. V., Kozlov Zh. A., Kolobrodov V. G., Puchkov A. V., Skomorokhov A. N., Two-branch structure of the spectrum of excitations of superfluid helium-4 // Письма в ЖЭТФ, 1993, Т. **57**. №.7. С. 414-417.
4. Благовещенский Н. М., Богоявленский И. В., Карнацевич Л. В., Козлов Ж. А., Колобродов В. Г., Приезжев В. Б., Пучков А. В., Скоморохов А. Н., Ярунин В. С., Структура спектра возбуждений в жидком He-4: Препринт ОИЯИ РЗ-94-125, Дубна, 1994.
5. Blagoveshchenskii N. B., Bogoyavlenskii I. V., Karnatsevich L. V., Kozlov Zh. A., Kolobrodov V. G., Puchkov A. V., Skomorokhov A. N., On a structure of superfluid helium-4 elementary excitations spectrum // Physica B. 1994.V. **194-196**. P. 545-546.
6. Blagoveshchenskii N. B., Bogoyavlenskii I. V., Karnatsevich L. V., Kozlov Zh. A., Kolobrodov V. G., Priezzhev V. B., Puchkov A. V., Skomorokhov A. N., Yarunin V. S., Structure of liquid He-4 excitation spectrum // Phys. Rev. B. 1994.V. **50**, P. 16550-16565.
7. Blagoveshchenskii N. B., Bogoyavlenskii I. V., Karnatsevich L. V., Kozlov Zh. A., Kolobrodov V. G., Priezzhev V. B., Puchkov A. V., Skomorokhov A. N., Yarunin V. S., Structure of liquid He-4 excitation spectrum: Report of activity, JINR, Dubna, 1994. P. 171.
8. Blagoveshchenskii N. M., Bogoyavlenskii I. V., Puchkov A. V. Skomorokhov A. N., Data analysis of the neutron scattering on ^4He at $T=0.4$ K // Proc.of the 21-st International Conference on Low Temperature Physics, August 8-14, 1996, Prague, Czech J.of Phys. 1996. V. **46**, 1996, P. 255.
9. Богоявленский И. В., Карнацевич Л. В., Козлов Ж. А., Колобродов В. Г., Приезжев В. Б., Пучков А. В., Скоморохов А. Н., Исследование спектра возбуждений в жидком гелии-4 методом рассеяния нейтронов // Физика Низких Температур, 1994. Т. **20**. №.7. С. 626-635.
10. Пучков А. В., Скоморохов А., Исследование динамического структурного фактора жидкого гелия // доклад на XXXI Совецании по Физике Низких Температур, Москва, 1998
11. Благовещенский Н. М., Богоявленский И. В., Карнацевич Л. В., Пучков А. В. Скоморохов. А. Н., Исследования жидкого гелия методом рассеяния нейтронов. Новый анализ данных // Физика Низких Температур 1997. том. **23** №5-6. С. 509-514 – русский, С.374-378 – американский вариант.

12. Blagoveshchenskii N. M., Bogoyavlenskii I. V., Puchkov A. V. Skomorokhov A. N. New analysis of liquid ^4He neutron scattering data // 3-rd Liquid Matter Conference, Norwich, UK, 6-10 July, 1996, Europhysics Conference Abstracts v.20B, poster P4-2.
13. Богоявленский И. В., Пучков А. В., Скоморохов А., Analysis of liquid He-4 neutron scattering data on basis of the Glyde-Griffin model // Physica B. 1998. V. **241-243**, P. 947-949.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л. Д. // ЖЭТФ. 1941. Т. **11**. С. 592.
2. Ландау Л. Д. // J. Phys. USSR. 1947. V. **11**. P. 91.
3. Беляев С.Т. // ЖЭТФ. 1958. Т. **34**. С. 417; // ЖЭТФ. 1958. Т. **34**. С. 433.
4. Hugengoholtz N., Pines D. // Phys. Rev. 1959. V. **116**. P. 489.
5. Gavoret J., Nozieres P. // Ann. Phys. N.Y. 1964. V. **28**. P. 349.
6. Hoheberg P. S., Martin P.C. // Phys. Rev. Lett. 1964. V. **12**. P. 69.
7. Непомнящий А.А., Непомнящий Ю.А., // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. **21**. С. 3; Непомнящий Ю.А., Непомнящий А.А., // ЖЭТФ. 1978. Т. **48**. С. 493.
8. Ma S. K., Woo C. W. // Phys. Rev. Lett. 1967. V. **12**. P. 165.
9. Griffin A., Cheung T. H. // Phys. Rev. A. 1973. V. **7**. P. 2086.
10. Szeplafalusy P. and Kondor I. // Ann. Phys. NY. 1974. V. **82**. P.1.
11. Nozieres P. and Pines D. The Theory of Quantum Liquids, Vol. II (Addison-Wesley, NY, 1990).
12. Glyde H. R. in Condensed Matter Theories, Vol.8, edited by Blum and F.B.Malik, (plenum, New York, 1993) P. 159.
13. Glyde H. R. and Griffin A. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. **65**. P. 1454.
14. Glyde H. R. // Phys. Rev. B. 1992. V. **45**. P. 7321.
15. Tarvin J. A. Passel L. // Physical Review B 1974. V. **19**. P. 1458.
16. Svensson E. C. // Excitations in Two and Three-Dimensional fluids Edited by A.G.F.Wyatt and H.J.Lauter, Plenum, Press, New York, 1991.
17. Svensson E. C., Griffin A., // Physica B. 1990. V. **165-166**, P. 501.
18. Andersen K. H., Stirling W. G., Sherm R., Stunault A. // J. Phys.: Condens. Matter 1994. V **6**. P. 821.
19. Andersen K.H., Stirling W.G. // J. Phys.: Condens. Matter 1994. V.**6**. P. 5805.
20. Miller A., Pines D., Nozieres P // Phys. Rev. 1962. V. **127**. P. 1452.
21. M. de Schepper, Cohen E. G. D., //Phys. Rev. A 1980. V. **22**. P. 287.
22. A. van Well, Verkerk P., de Graaf L.A., Suck J-B., Copley J. R. D. // Phys. Rev. A. 1985. V. **31**. P. 3391.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 февраля 2000 года.

Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 21.02.2000
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 2,38
Тираж 100. Заказ 51872.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области