

На правах рукописи

Турлапов Андрей Вадимович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
УЛЬТРАХОЛОДНОГО ГАЗА ФЕРМИ-АТОМОВ

01.04.07 — физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Нижний Новгород — 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН) и Университете имени Дюка (Duke University, США).

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН
Каган Юрий Моисеевич;

доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН
Питаевский Лев Петрович;

доктор физико-математических наук, профессор
Балыкин Виктор Иванович.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН).

Защита состоится « ____ » _____ 2012 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 520.009.01 при Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» по адресу 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

А.В. Мерзляков

Общая характеристика диссертационной работы

Актуальность

Материя, обладающая массой покоя, построена из частиц с полужелым спином. Разнообразные системы, состоящие из большого числа одинаковых или похожих фермионов, встречаются в природе и лабораториях. Свойства этих систем во многом определяются статистикой Ферми–Дирака, которой подчинены входящие в них частицы. А сами системы объединены общностью теоретических подходов к их описанию и общим кругом задач. К ферми-системам можно отнести:

- материю нейтронных звёзд и систему нуклонов в тяжёлых атомных ядрах;
- кварк-глюонную плазму, существовавшую в первые мгновения Большого взрыва, а сейчас получаемую в ускорителях при столкновении тяжёлых ядер;
- электронный газ в металлах, полу- и сверхпроводниках, на поверхностях твёрдых тел и жидкостей;
- гелий-3 в жидкой фазе;
- газы нейтральных атомов-фермионов, которые лишь недавно, в 1999 году [1], научились приготавливать в квантово вырожденном состоянии, охлаждая до температур порядка микро- и нанокельвинов.

Общие теоретические подходы применимы, несмотря на разную природу частиц и межчастичных взаимодействий. Изучив одну ферми-систему, можно делать выводы о свойствах других. Например, измерения параметров атомного газа, приведённые в диссертации, позволили проверить расчёты энергии основного состояния нейтронной материи и одну из теорий высокотемпературной сверхпроводимости.

Вскоре после создания ультрахолодный газ ферми-атомов утвердился в качестве среды для наблюдения новых явлений квантовой физики, проверки фундаментальных теорий и моделирования других ферми-систем. Явления, которые впервые удалось наблюдать именно в атомном газе, включают в себя сверхтекучесть с резонансными s -волновыми взаимодействиями, стабильность ферми-материи в этом же режиме взаимодействия и мост БКШ–БЭК (в англоязычной литературе «BCS–BEC crossover» — множество состояний системы многих тел между двумя асимптотическими состояниями, подчиняющимися соответственно теориям Бардина–Купера–Шриффера и бозе-эйнштейновского конденсата). Атомная система оказалась востребованной благодаря гибкости её параметров — возможности изменять сечение рассеяния в максимально широких пределах, а также настраивать спиновый состав, плотность, размерность и внешний потенциал.

Эксперименты с ультрахолодными атомами позволяют проверять теоретические модели, описывающие другие ферми-системы — нейтронные звёзды и ядра тяжёлых атомов [2, 3], кварк-глюонную плазму [4], высокотемпературные сверхпроводники [5]. Исследование на примере атомной системы в ряде случаев может оказаться более предпочтительным, чем эксперимент с оригинальной ферми-системой, для которой теоретическая задача была изначально сформулирована. Например, в отличие от материи нейтронных звёзд, в атомном газе возможно прямое наблюдение явлений. В сравнении с экспериментальными образцами физики твёрдого тела, в атомном газе существенно более гибко настраиваются взаимодействия и спиновый состав. Кроме того, атомный газ не содержит неконтролируемых примесей.

Цель и задачи

Целью работы является исследование общих свойств ферми-систем. Для достижения этой цели решались задачи:

- исследование основного состояния ферми-системы при различных величинах межчастичного взаимодействия;
- изучение термодинамических свойств ферми-систем;
- обнаружение и изучение сверхтекучей фазы сильно взаимодействующей ферми-системы;
- проверка гипотезы об универсальности части сильно взаимодействующих систем;
- исследование гидродинамики ферми-систем;
- новые физические реализации ферми-систем;
- создание экспериментальных методов для решения вышеперечисленных задач.

Методы

Исследования проведены в экспериментах с газом ферми-атомов лития-6, приготовленном при температурах от десятков нано- до нескольких микрокельвинов, и образованным из него газом бозе-молекул Li_2 . Приготовление квантово вырожденного газа происходит методами пленения и охлаждения вещества при помощи оптических и магнитных полей. Манипуляции с газом и измерения происходят также при помощи световых и магнитных полей. Часть экспериментальных методов создана в рамках диссертационной работы и применена впервые.

Перечень и новизна результатов, выносимых на защиту. Роль автора

В серии экспериментов исследован сильно взаимодействующий газ ферми-атомов и его производная — бозе-эйнштейновский конденсат двухатомных молекул. Исходным веществом во всех экспериментах выступал газ атомов лития-6. Результаты не привязаны к газу конкретного химического элемента. Часть результатов применима к другим типам ферми-частиц — нейтронам, электронам, кваркам. Полученные результаты позволили проверить фундаментальные теории, в том числе описывающие ядерную материю, высокотемпературные сверхпроводники, кварк-глюонную плазму. Впервые приготовлен двумерный ферми-газ атомов, что открыло путь к моделированию широкого круга фундаментальных задач в атомной системе.

Представленные к защите результаты могут быть разделены на две группы:

- а) наблюдение и изучение новых физических явлений и систем;
- б) создание новых экспериментальных методов.

Появление второй группы результатов связано с тем, что физика ультрахолодных ферми-атомов зародилась совсем недавно. Наблюдение новых явлений шло рука об руку с созданием и развитием методов эксперимента. Без появления новых методов многие измерения были бы невозможны. Например, к началу работы над диссертацией не существовало методов термометрии сильно взаимодействующего ферми-газа атомов. Создание новых экспериментальных методов стало ключом к наблюдению и пониманию физических процессов. Ниже следуют представленные к защите результаты, разделённые на две указанные группы. Все результаты получены впервые в мире, кроме результата a11, обладающего внутрироссийским приоритетом. Результаты a10 и a11 вошли в число важнейших научных достижений РАН 2010 года.

а) Новые явления, наблюдения и физические системы:

- 1) свидетельство сверхтекучести атомного ферми-газа (рассмотрено в главе 6 диссертации);

- 2) измерение зависимости энергии от температуры в сильно взаимодействующем ферми-газе (глава 7);
- 3) измерение температуры перехода к сверхтекучему состоянию в атомном ферми-газе (глава 7);
- 4) измерение температуры перехода к сверхтекучему состоянию альтернативным методом — по затуханию дышащей моды — в отличие от предыдущего измерения a_3 , выполненного по зависимости энергии от температуры (глава 6);
- 5) наблюдение признаков разрушения сверхтекучего состояния при уменьшении взаимодействия в атомном ферми-газе (глава 6);
- 6) экспериментальная проверка вириальной теоремы для ферми-газа в режиме резонансного взаимодействия (глава 5);
- 7) измерение сдвиговой вязкости, экспериментальная проверка квантового предела вязкости в атомном ферми-газе (глава 9);
- 8) наблюдение распространения звука в газе ферми-атомов, в газе бозе-молекул (глава 3);
- 9) проверка уравнения состояния ферми- и бозе-системы при нулевой температуре в широком диапазоне s -волновых взаимодействий по скорости звука (глава 8);
- 10) приготовление, наблюдение двумерного ферми-газа атомов (глава 4);
- 11) создание первой в России установки для приготовления квантово вырожденного газа атомов и молекул, как в режиме фермиевского вырождения, так и бозе-эйнштейновской конденсации; достижение наименьших в стране температур, до 18 нК (главы 3 и 4).

б) Новые экспериментальные методы:

- 1) термометрия сильно взаимодействующего ферми-газа атомов, применимая при произвольной температуре (глава 3);
- 2) прецизионный ввод энергии в сильно взаимодействующий ферми-газ атомов (глава 3);
- 3) энергометрия сильно взаимодействующего ферми-газа атомов (глава 3);
- 4) управление кинематической размерностью ферми-газа при помощи внешнего потенциала (глава 4);
- 5) существенное улучшение пространственного разрешения при измерении распределения плотности ферми-газа атомов (глава 3);
- 6) термометрия двумерного ферми-газа атомов (глава 4).

Автору принадлежит ведущая роль в проведении всех экспериментов. Кроме того, автор принимал участие во всех этапах процесса исследований, непосредственно участвовал во всех этапах получения данных и научных экспериментов, лично участвовал в апробации результатов исследований, разработке экспериментальных установок, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке публикаций. Экспериментальная установка ИПФ РАН создана под руководством и при непосредственном участии автора. Все результаты получены после защиты кандидатской диссертации.

Практическая значимость результатов

Результаты получены в эксперименте с газом атомов лития-6. В основном результаты носят фундаментальный характер, не привязаны к конкретному химическому элементу, а часто — и к типу ферми-частицы вообще. Часть результатов может быть применена к нейтронной материи, электронному газу в твёрдом теле и кварк-глюонной плазме.

Описанные в диссертации измерения термодинамических характеристик сильно взаимодействующего ферми-газа атомов позволили количественно проверить одну из моделей высокотемпературной сверхпроводимости. Измерения энергии основного состояния атомного газа позволяют найти энергию основного состояния достаточно плотной нейтронной материи. Гидродинамический поток сильно взаимодействующего ферми-газа атомов моделирует другую систему с предельно низкой вязкостью — кварк-глюонную плазму. Измерение вязкости и энтропии атомного газа, возможно, позволит впервые проверить теорию струн. Шаг в этом направлении сделан в диссертации: сообщено об измерении вязкости атомного ферми-газа, выполненном впервые.

Измерение скорости звука в конденсате бозе-молекул Li_2 , газе атомов лития-6 и в системе на мосту между этими двумя коллективными состояниями позволило проверить теории моста БКШ–БЭК. Эти теории носят фундаментальный характер, не привязаны к атомной системе и могут быть применены к другим ферми-системам. Например мост БКШ–БЭК был предсказан, но до сих пор не реализован для газа экситонов в твёрдом теле [6] и газа кварков [7].

Наблюдение новых явлений квантовой физики, проверка фундаментальных теорий и моделирование других ферми-систем стали возможными в атомном газе благодаря его уникальным свойствам. Взаимодействие между атомами может контролироваться изменяясь в максимально широких пределах, может настраиваться спиновый состав, плотность, размерность и внешний потенциал. Сама система фундаментально беспримесна. Возможно построение атомной системы в соответствии с наперёд заданными гамильтонианом, в отличие от более традиционных подходов физики твёрдого тела, где гамильтониан часто строится для приближённого описания уже существующей системы. Создание экспериментальных методов для атомной системы, таким образом, важно для развития фундаментальной физики и понимания других ферми-систем.

Вынесенные на защиту экспериментальные методы позволили произвести количественное исследование системы. Например, благодаря созданию метода термометрии и метода прецизионного ввода энергии стало возможным изложенное в диссертации, впервые выполненное последовательное изучение термодинамики сильно взаимодействующего ферми-газа атомов. Проверка при конечных температурах гипотезы об универсальности ферми-газа в унитарном режиме и создание метода энергометрии легли в основу последующих измерений термодинамических характеристик сильно взаимодействующего газа ферми-атомов [8, 9].

Приготовление двумерного ферми-газа атомов существенно расширило круг задач, реализация которых доступна при помощи ультрахолодных атомных газов. В этой системе, возможно, впервые удастся наблюдать куперовские пары с ненулевым импульсом — так называемое спаривание Фульде–Фарелла–Ларкина–Овчинникова [10, 11]. Контролируемая атомная система позволит моделировать двумерные задачи высокотемпературной сверхпроводимости. Для двумерного ферми-газа атомов с p -волновыми взаимодействиями есть обоснованные надежды на стабильность [12]. Это, возможно, позволит наблюдать новые типы фазовых переходов [13].

Структура диссертации

Работа напечатана на 292 страницах, состоит из введения, 8 глав, заключения, 3 приложений и списка источников, содержащего 208 наименований. В диссертацию входят 67 рисунков и 5 таблиц.

Краткое содержание диссертации

Глава 1: Введение

Вклад физики атомных ферми-газов в фундаментальную физику, история и перспективы направления, актуальность диссертации изложены во введении, которое также содержит публикации автора по теме работы и выносимые на защиту результаты.

Глава 2: Обзор основных свойств газа ферми-атомов

Основные свойства газа ферми-атомов лития-6 и его производных описаны в главе 2. Эта глава приведена для знакомства с объектом экспериментов и не содержит новых сведений.

Глава 3: Экспериментальные методы

В ходе диссертационной работы создана первая в России экспериментальная установка для приготовления вырожденного газа атомов и молекул, как в режиме фермиевского вырождения, так и бозе-эйнштейновской конденсации. Достигнуты наименьшие в стране температуры, до 18 нК. В эксперименте атомный газ готовится методами лазерного пленения и охлаждения. Достижение квантового вырождения требует охлаждения до температур T от десятков нано- до нескольких микрокельвинов ввиду крайне низкой концентрации газа $n = 10^{11} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Всего исследования выполнялись на двух экспериментальных установках: сначала — в Университете имени Дюка, а затем — в ИПФ РАН. Последняя в сравнении с установкой, использовавшейся в Дюке, обладает новыми возможностями: реализовано пленение атомного газа в дипольной ловушке с периодически модулированной интенсивностью, что позволило впервые приготовить двумерный ферми-газ атомов; существенно улучшено разрешение видеосистемы при фотографировании. Последнее даёт возможность наблюдать свойства газа непосредственно в ловушке, без выпуска из ловушки и разлёта. Таким образом, непосредственно измеряются параметры исследуемой системой, а интерпретация измерений перестаёт зависеть от теоретической модели разлёта газа. Становится возможным наблюдение локальных свойств, например, флуктуаций плотности, которые чувствительны к квантовой статистике, микросостоянию системы и фазовым переходам.

Фотографирование является основным методом снятия данных в экспериментах. Все более сложные методы включают в себя фотографирование в качестве составной части. Усовершенствованный метод фотографирования впервые позволил напрямую измерить распределение плотности каждой спиновой компоненты газа непосредственно в ловушке, с разрешением много меньшим поперечного размера облака. Пример снимка газа, пленённого в веретенообразной дипольной ловушке, приведён на рисунке 1. На фото показано распределение плотности, проинтегрированное вдоль луча зрения. Видны частицы только в одном из двух спиновых состояний. Снимок сделан при помощи прибора с зарядовой связью (ПЗС). Для фотографирования атомный газ подсвечивается импульсом широкого

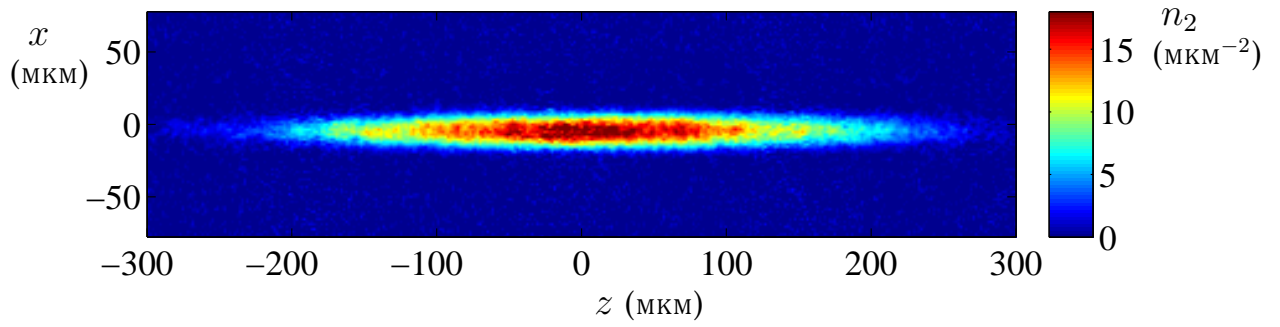


Рисунок 1 — Снимок ферми-газа, пленённого в веретенообразном дипольном потенциале. В цвете кодирована двумерная концентрация атомов в каждом спиновом состоянии $n_2(x, z)$. В облаке $2N = 210\,000$ атомов. Видна половина атомов — только те, что находятся в одном из двух равнонаселённых внутренних состояний.

однородного луча. Облако атомов поглощает свет, создавая тень в луче подсвета, который проецируется на ПЗС. Тень в луче подсвета позволяет рассчитать распределение плотности.

На момент начала исследований, описанных в диссертации, отсутствовал метод термометрии неидеального ферми-газа, применимый в широком диапазоне температур. Автором и коллегами создан способ эмпирической термометрии ферми-газа с резонансными s -волновыми взаимодействиями, помещённого в параболический потенциал. Метод основан на подгонке профилем плотности идеального ферми-газа в том же потенциале $U(\vec{x}) = \sum_{i=1}^3 m\omega_i^2 x_i^2/2$. В подгоночной формуле отношение T/E_Φ (температуры к глобальной энергии Ферми $E_\Phi \equiv \hbar(\omega_x\omega_y\omega_z/6N)^{1/3}$) заменено на варьируемую величину $(T/E_\Phi)_{\text{эмп.}}$, выполняющую роль эмпирической температуры. Величина $(T/E_\Phi)_{\text{эмп.}}$ может быть соотнесена со значениями T/E_Φ путём теоретического моделирования. Любая модель должна давать асимптоту

$$\frac{T}{E_\Phi} = \left(\frac{T}{E_\Phi} \right)_{\text{эмп.}} \sqrt{1 + \beta}, \quad (1)$$

в которой

$$\beta \equiv \frac{\mu_{\text{лок.}}}{\varepsilon_\Phi} - 1 \quad (2)$$

универсальная постоянная, связывающая при $T = 0$ локальный химический потенциал $\mu_{\text{лок.}}$ и энергию Ферми $\varepsilon_\Phi \equiv (6\pi^2 n)^{2/3} \hbar^2/2m$, где n — концентрация атомов в одном из двух равнонаселённых спиновых состояний. Величина β измерена в диссертационной работе, результаты измерений приведены в таблице 1 автореферата. Теоретическая модель, представленная в работе [14], позволяет сделать предположение, что асимптота достаточно точна при $(T/E_\Phi)_{\text{эмп.}} \geq 0,4$.

Впервые разработан метод энергометрии ферми-газа с резонансными s -волновыми взаимодействиями, помещённого в параболический потенциал. Метод не зависит от модели микросостояния системы. Установлено, что энергия E , приходящаяся на один атом, может быть вычислена по формуле

$$E = 3m\omega_x^2 \langle x^2 \rangle = 3m\omega_z^2 \langle z^2 \rangle, \quad \text{где} \quad \langle \dots \rangle \equiv \frac{1}{N} \int \dots n(\vec{x}) d^3\vec{x}. \quad (3)$$

Впервые создан метод прецизионного ввода энергии в ферми-газ с резонансными s -волновыми взаимодействиями, находящийся в параболическом потенциале. Это позволило настраивать температуру системы. Метод основан на известном законе расширения газа, выпущенного при $T = 0$ из гармонического потенциала. После выпуска газа, расширения

и последующего захвата, известно изменение потенциальной энергии газа. Затем этот прирост энергии перераспределяется между потенциальной и внутренней энергией по мере прихода системы в состояние термодинамического равновесия.

Впервые наблюдалось распространение звука в ферми-газе атомов и бозе-газе молекул. Звуковые волны возбуждаются лучом зелёного монохроматического света, который включается на короткое время. Луч, возбуждающий звук в веретенообразной ловушке, показан на рисунке 2. Звуковые волны распространяются из плоскости возбуждения

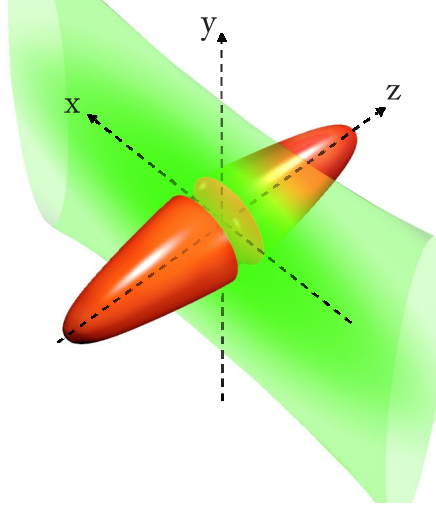


Рисунок 2 — Зелёный луч, импульс которого возбуждает звуковую волну в облаке атомов (показано красным).

к краям вдоль длинного направления z . Волны наблюдаются по изменению плотности. Проверена справедливость модели [15], связывающей при $T = 0$ уравнение состояния $\mu_{\text{лок.}}(n)$ со скоростью звука $c(z)$ в плоскости z :

$$c(z) = \sqrt{\frac{\int n(x, y, z) dx dy}{m \int \left(\frac{d\mu_{\text{лок.}}}{dn}\right)^{-1} dx dy}}. \quad (4)$$

Наличие подобной модели позволяет использовать измерения скорости звука для количественной проверки моделей уравнения состояния, что в дальнейшем использовано в диссертации.

Глава 4: Двумерный ферми-газ атомов

Впервые приготовлен двумерный ферми-газ атомов. Кинематическая двумерность достигнута путём удержания газа в сильно анизотропном гармоническом потенциале дископодобной формы

$$U(\vec{x}) = \frac{m\omega_z^2 z^2}{2} + \frac{m\omega_{\perp}^2 (x^2 + y^2)}{2}, \quad \omega_z \gg \omega_{\perp}. \quad (5)$$

Атомы населяют лишь нижний энергетический уровень движения вдоль z . Серия подобных потенциалов создаётся пучностями стоячей волны, что схематично показано на рисунке 3. Фотографию серии облаков двумерного ферми-газа можно видеть на рисунке 4. Снимок сделан вдоль плоскости облаков, в направлении y , отмеченном на рисунке 3. На снимке показано проинтегрированное вдоль луча зрения распределение плотности $n_2(x, z) = \int n(\vec{x}) dy$.

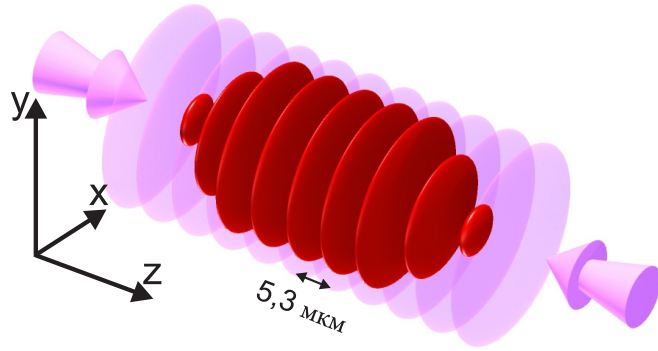


Рисунок 3 — Пленение атомов пучностями стоячей волны. Облака атомов показаны тёмно-красным, а распределение интенсивности света — светлосиреневым.

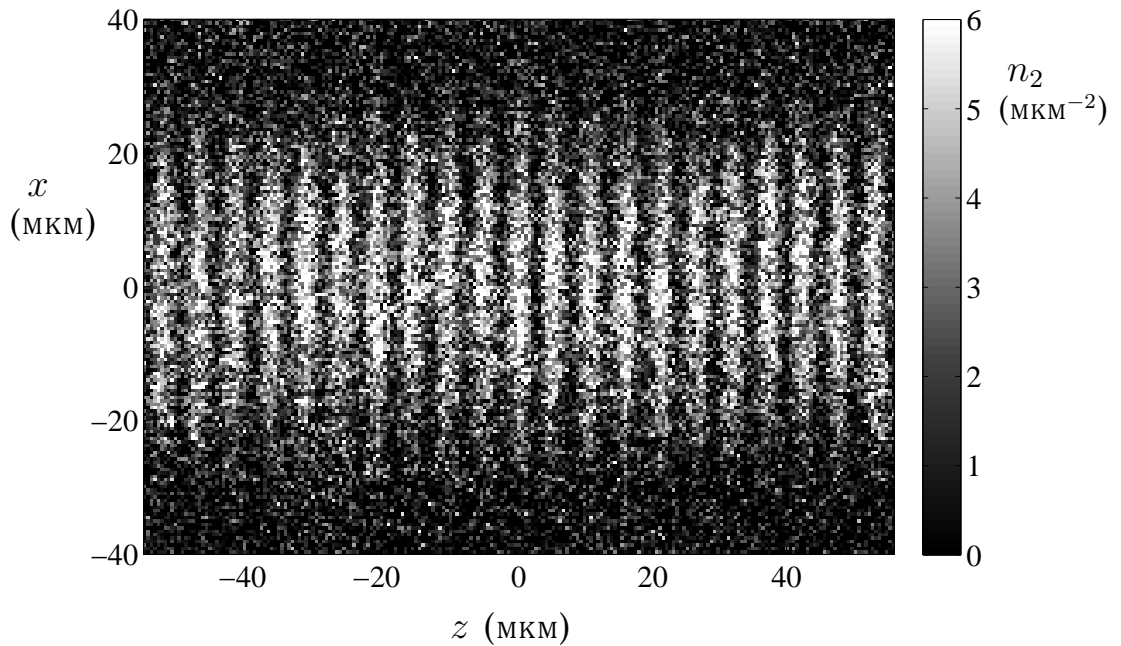


Рисунок 4 — Серия облаков двумерного ферми-газа. Показано распределение концентрации $n_2(x, z)$. Число атомов в одном спиновом состоянии на квадратный микрон кодировано в тонах серого.

Глава 5: Универсальный ферми-газ

Под универсальностью здесь понимается зависимость всех локальных термодинамических свойств от единственной безразмерной переменной — T/ε_F . Все размерные величины могут быть выражены через ε_F и безразмерные универсальные константы. К таким величинам относится, в том числе, температура перехода в сверхтекучее состояние $T_{кр.}$ и энергия основного состояния. Найдя универсальные константы для одной физической системы, с их помощью можно описать другие универсальные системы. В работе [16] предложена гипотеза о том, что система в унитарном режиме парных s -волновых столкновений универсальна. Универсальность сильновзаимодействующих систем не доказана на основе микроскопических уравнений. Расчёт универсальных констант, таких как β и $T_{кр.}/\varepsilon_F$, представляет собой сложную задачу из-за отсутствия малого параметра. Таким образом, важны и интересны, как экспериментальная проверка универсальности, так и поиск универсальных констант.

В диссертации сообщается о проверке универсальности при $T = 0$ новым методом — по распространению звука. Этот же метод впервые применён для измерения универсальной константы β , определенной согласно уравнению (2) как отношение энергии среднего поля к локальной энергии Ферми. Также величина β найдена альтернативным методом, из размеров облака. В таблице 1 сведены результаты измерений и расчётов универсальной постоянной β . Звёздочкой отмечены полученные в рамках диссертационной работы результаты.

Таблица 1 — Результаты расчётов и измерений универсальной постоянной β . Звёздочкой отмечены результаты, полученные в рамках диссертационной работы.

Метод	Значение β	Год	Коллектив, ссылка
Расчёты			
Уравнение Галицкого	-0,674	2001	Heiselberg [3]
Приближение Вигнера-Зайца	-0,33	2001	Heiselberg [3]
Монте-Карло	-0,56	2003	Carlson и др. [17]
Самосогласованное применение состояния БКШ и учёт флуктуаций	-0,545	2004	Strinati и др. [18]
Монте-Карло	-0,58±0,01	2004	Giorgini и др. [19]
Измерения			
По кинетической энергии газа, выпущенного из ловушки, в приближении $T = 0$	-0,10±0,07	2002	Duke Univ. [20]
По размеру облака	-0,26±0,07	2003	Duke Univ. [21]
По размеру облака	-0,68 ^{+0,13} _{-0,10}	2004	Univ. Innsbruck [22]
По кинетической энергии газа, выпущенного из ловушки	-0,64±0,15	2004	Ecole Normale Supérieure [23]
*По размеру облака	-0,49±0,04	2005	Duke Univ. [14]
По размеру облака	-0,54±0,05	2006	Rice Univ. [24]
По размеру облака	-0,54 ^{+0,05} _{-0,12}	2006	JILA [25]
*По скорости звука	-0,565±0,015	2007	Duke Univ. [26]
Реконструкция локальной плотности. Экстраполяция к $T = 0$	-0,58	2010	Univ. Electro-Communications [9]

Впервые универсальность ферми-системы проверена при конечных температурах. Проверка выполнена двумя независимыми методами — по размеру облака в ловушке и по частоте дышащей моды. Проверена вириальная теорема для универсальной системы, лежащая в основе метода энергетрии, разработанного в рамках диссертационной работы. Служащая для проверки универсальности зависимость частоты дышащей моды от температуры показана на рисунке 5а. Частота на графике нормирована на поперечную частоту ловушки ω_{\perp} . Во всём интервале температур частота моды лежит вблизи значения $\omega_{г/д} = 1,84\omega_{\perp}$, предсказанного в рамках универсальной изоэнтропийной гидродинамики. Совпадение частоты колебаний с предсказанием стало первым известным подтверждением универсальности резонансно взаимодействующей системы при конечных температурах.

Глава 6: Сверхтекучесть

Свидетельство сверхтекучести ферми-газа атомов, впервые полученное путём непосредственного наблюдения изучаемой системы, представлено в диссертации. Наблюдались

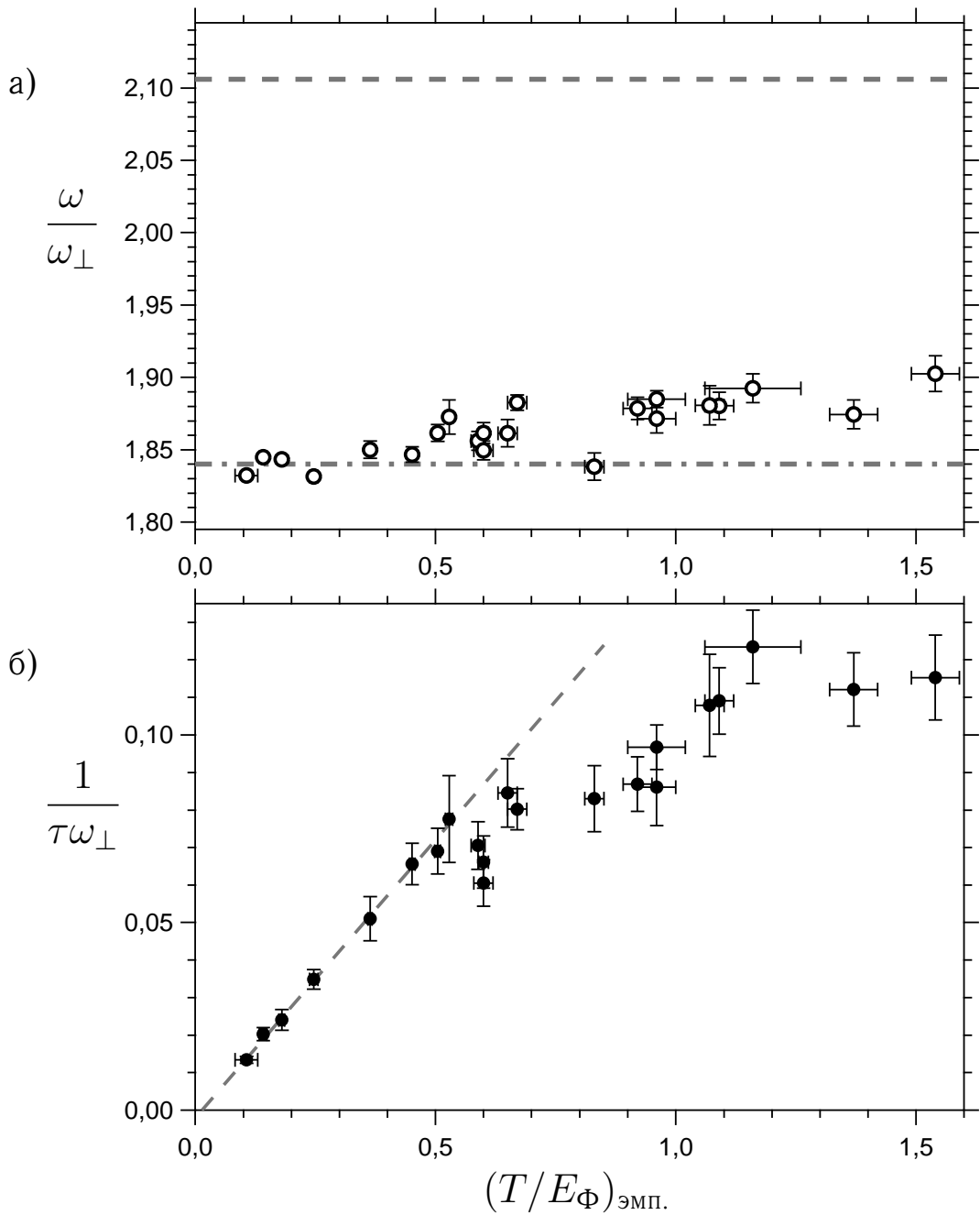


Рисунок 5 — Частота (а) и декремент (б) поперечной дышащей моды сильновоздействующего ферми-газа в зависимости от эмпирической температуры $(T/E_{\Phi})_{\text{эмп.}}$, интервал которой примерно соответствует $T/E_{\Phi} \approx 0,04-1,1$. Частота ω и декремент $1/\tau$ нормированы на поперечную частоту ловушки ω_{\perp} . На графике (а) штрих-пунктиром и штрихом показано значение частоты в гидродинамическом пределе ($1,84\omega_{\perp}$) и пределе идеального газа ($2\omega_x = 2,106\omega_{\perp}$) соответственно.

свойства дышащей моды газа в ловушке. Проанализированы возможные состояния газа и показано, что лишь сверхтекучесть удовлетворительно согласуется с измерениями. Кроме наличия сверхтекучести в эксперименте также возможно видна точка фазового перехода. Данные эксперимента представлены на рисунке 5. Наблюдаемое поведение частоты и декремента моды согласуется с предположением о существовании сверхтекучей фазы при $(T/E_{\Phi})_{\text{эмп.}} < 0,53$. Сверхтекучий газ представляет собой жидкость, что согласуется с наблюдаемой частотой. Кроме того, с понижением температуры должна расти сверхтекучая фракция, что уменьшает декремент. При нулевой температуре вся жидкость

должна перейти в сверхтекучую фазу, что приводит к обращению декремента в 0. Падение декремента с температурой также совпадает с наблюдениями. Модель нормального газа и жидкости предсказывает зависимость частоты и декремента от температуры, качественно отличающуюся от наблюдаемой в эксперименте.

Температура, при которой зависимость декремента от температуры терпит излом, $(T/E_{\Phi})_{\text{эмп.}} = 0,53 \pm 0,01$ может быть температурой фазового перехода. Доверительный интервал здесь учитывает лишь статистическую ошибку измерения. Значение на эмпирической шкале температур позволяет найти термодинамическую температуру и выразить её через глобальную и локальную энергии Ферми: $T_{\text{кр.}} = (0,35 \pm 0,01) E_{\Phi}$ и $T_{\text{кр.}} = 0,38 \varepsilon_{\Phi}$, соответственно. Независимо от температуры измерена энергия, приходящаяся в точке излома на один атом в облаке, которая составила $E_{\text{кр.}} = 1,01 E_{\Phi}$.

Также исследовано поведение дышащей моды веретенообразного облака при различных значениях межчастичного взаимодействия при $T \approx 0$. При уменьшении взаимодействия наблюдается резкий рост декремента, сопровождающийся ростом частоты. Это наблюдение может быть интерпретировано как разрыв куперовских пар атомов колебаниями дышащей моды.

Глава 7: Термодинамика ферми-газов

Впервые измерена зависимость энергии от температуры для сильно взаимодействующего газа ферми-атомов. Степенная зависимость $E_{\text{полн.}}(T)$ с высоким показателем при $T < 0,27 E_{\Phi}$ стала признаком наличия сверхтекучей фазы в этой области, а излом при $T = 0,27 E_{\Phi}$ указывает на фазовый переход в этой точке, что позволило впервые выполнить измерение критической температуры в ферми-системе с резонансными взаимодействиями и также впервые в ферми-газе атомов. Проведено сравнение результатов измерений с теоретической моделью, которая была изначально разработана для высокотемпературных сверхпроводников, а затем адаптирована для атомного газа. Совпадение данных с моделью позволило, таким образом, проверить в атомной системе одну из многочастичных теорий твёрдого тела. Экспериментальная и теоретическая зависимость показаны на рисунке 6. Там же можно видеть подгонку степенными зависимостями выше и ниже точки излома.

Результаты известных измерений критической температуры фазового перехода сведены в таблицу 2. Результат [27], приведённый во второй строке таблицы и описанный в 6-ой главе диссертации, по-прежнему остаётся единственным, где поиск перехода к сверхтекучести производился наиболее прямым способом — путём наблюдения за свойствами потока жидкости.

Глава 8: Мост между бозе- и ферми-состоянием

Для газа ферми-атомов и бозе-эйнштейновского конденсата молекул произведена проверка уравнения состояния $\mu_{\text{лок.}}(n)$ при $T \approx 0$ по зависимости скорости звука от межатомного взаимодействия, которое перестраивается при помощи явления резонанса Фешбаха, контролируемого внешним магнитным полем. Показано, что скорость звука очевидно отличается от предсказаний теории среднего поля и лежит близко к значениям, рассчитанным методом Монте-Карло. На рисунке 7 показан результат измерений — зависимость нормированной скорости звука c_0/v_{Φ} от параметра взаимодействия $1/k_{\Phi}a$, где a — длина s -волнового рассеяния при нулевой кинетической энергии, $\hbar k_{\Phi} \equiv \sqrt{2E_{\Phi}m}$ — глобальный импульс Ферми. Также на этом рисунке можно увидеть результаты теоретического моделирования.

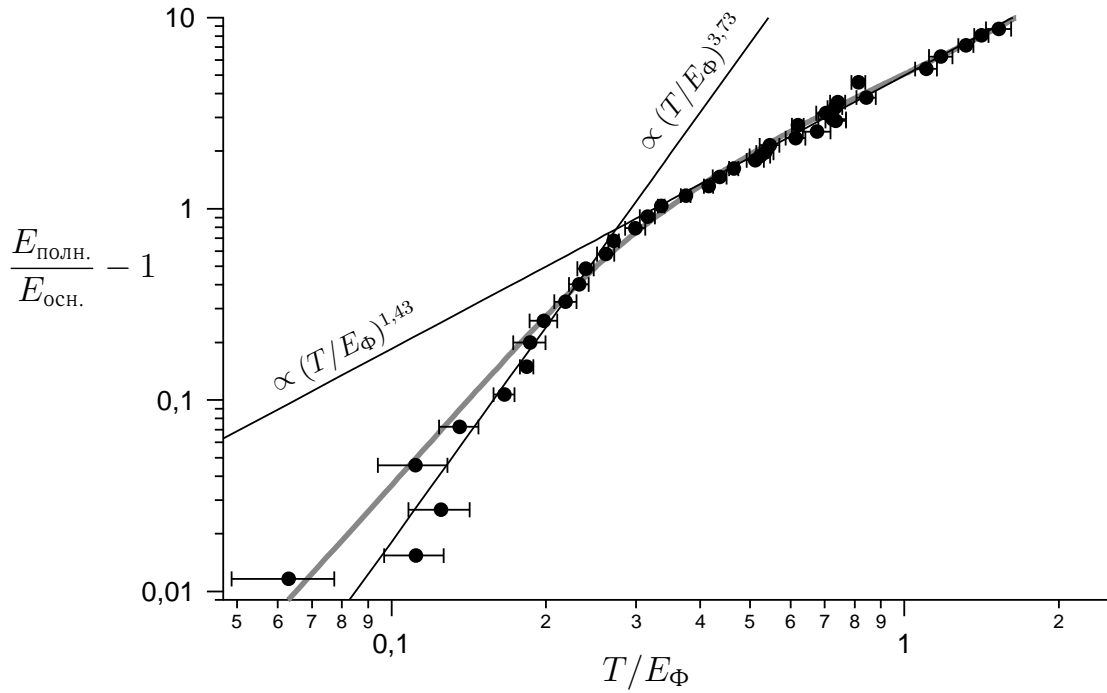


Рисунок 6 — Зависимость энергии от нормированной температуры T/E_{Φ} на логарифмической шкале. Полная энергия газа в ловушке $E_{\text{полн.}}$ нормирована на энергию основного состояния $E_{\text{осн.}}$. Точки и толстая серая кривая — соответственно данные и теория сильновзаимодействующего газа. Чёрные тонкие линии — подгонка данных выше и ниже фазового перехода степенными функциями.

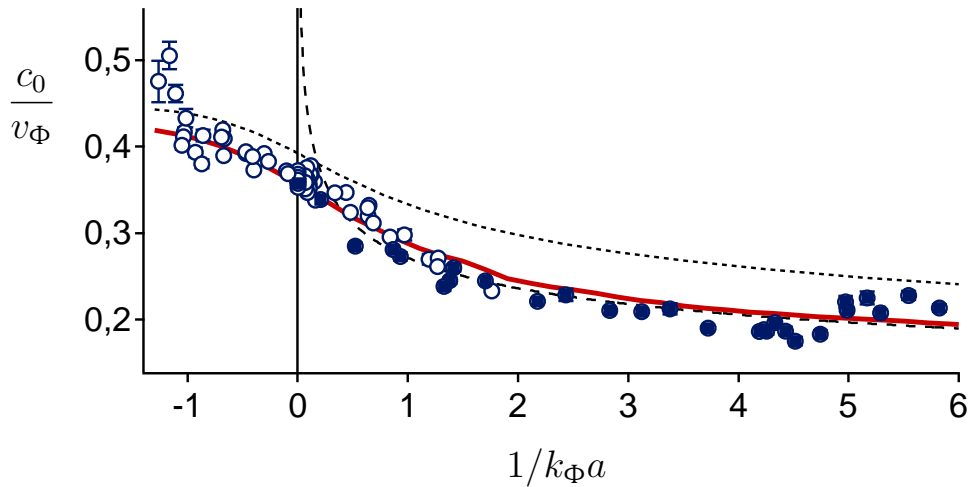


Рисунок 7 — Нормированная скорость звука c_0/v_{Φ} в зависимости от параметра взаимодействия $1/k_{\Phi}a$. Кружки и кольца отвечают измерениям в ловушке глубиной 140–500 нК и 0,6–80 мК соответственно. Сплошная красная линия — расчёты методом Монте-Карло. Пунктир — расчёт в модели среднего поля. Штриховая линия — формула $c_0/v_{\Phi} = \frac{1}{4}(\frac{5}{2}k_{\Phi}a_{\text{мол.}})^{1/5}$ для БЭК молекул при $a_{\text{мол.}} = 0,6a$.

Глава 9: Поиск квантового предела вязкости

Впервые в атомном ферми-газе выполнены измерения коэффициента сдвиговой вязкости η . Коэффициент измерен по затуханию дышащей моды газа в веретенообразной ловушке. Результаты измерений отношения η/s , где s — плотность энтропии, нанесены на график 8. Показана зависимость η/s от энергии E , приходящейся на один атом в газе.

Таблица 2 — Результаты измерений параметров фазового перехода в сильно взаимодействующем ферми-газе — температуры и приходящейся на один атом энергии. Звёздочкой отмечены результаты, описанные в диссертации.

Метод	$T_{кр.}/E_{\Phi}$	$T_{кр.}/\varepsilon_{\Phi}$	$E_{кр.}/E_{\Phi}$	Год	Коллектив, ссылка
*По зависимости энергии от температуры	$0,27 \pm 0,02$	0,24	$0,85 \pm 0,05$	2005	Duke Univ. [14]
*По затуханию дышащей моды	$0,35 \pm 0,01$	0,38	$1,01 \pm 0,01$	2005	Duke Univ. [27]
По зависимости энтропии от энергии	$0,29^{+0,03}_{-0,02}$	—	$0,94 \pm 0,05$	2007	Duke Univ. [8]
По БЭК молекул, наблюдаемому после переключения магнитного поля на бозевскую сторону резонанса Фешбаха и последующего выключения поля	$0,24 \pm 0,03$ и $0,19 \pm 0,03$	—	—	2008	Univ. Electro-Communications [28]
По БЭК молекул, наблюдаемому после быстрого переключения магнитного поля на бозевскую сторону резонанса Фешбаха	$0,21 \pm 0,02$	$0,17 \pm 0,01$	$0,78 \pm 0,03$	2010	Univ. Electro-Communications [9]
По отклонению от теории ферми-жидкости Ландау, наблюдаемому в зависимости давления от $T/\mu_{лок.}$	$0,19 \pm 0,02$	$0,157 \pm 0,015$	—	2010	Ecole Normale Supérieure [29]

Также на графике 8 сравниваются свойства атомного ферми-газа со свойствами других систем. Показано значение η/s для жидкого гелия-4 вблизи точки кипения ($T = 4,2$ К, $P = 1$ атм.), составляющее $\approx 0,7\hbar$ ([30] и ссылки в ней), и для кварк-глюонной плазмы, в случае которой различные модели и методы обработки данных дают значения $(1,89-3,99)\hbar/4\pi = (0,15-0,32)\hbar$ [31]. Как в случае гелия, так и для кварк-глюонной плазмы, на графике не рассматривается зависимость η/s от энергии, а приведены лишь минимальные значения. Для атомной системы наименьшие значения η/s лежат ниже значения для гелия. В то же время эти значения несколько выше оценки для кварк-глюонной плазмы. В анализе, приведённом в диссертации, коэффициент вязкости η завышен, поскольку предполагается, что сдвиговая вязкость — единственная причина затухания. При построении более точной модели затухания дышащей моды может оказаться, что η/s лежит ещё ближе фундаментальному пределу $\eta/s = \hbar/4\pi$, предсказанному в рамках теории струн. Более точное измерение сдвиговой вязкости и уточнение величины η/s может стать вопросом дальнейших исследований. Достижение барьера $\eta/s = \hbar/4\pi$ в широкой области параметров и демонстрация его непреодолимости позволили бы экспериментально проверить теорию струн, которая на данный момент не подтверждена в экспериментах.

Глава 10: Заключение. Приложения

В заключении перечислены основные результаты. Материалы, которые могут оказаться полезными для воспроизведения содержащихся в диссертации расчётов, приведены

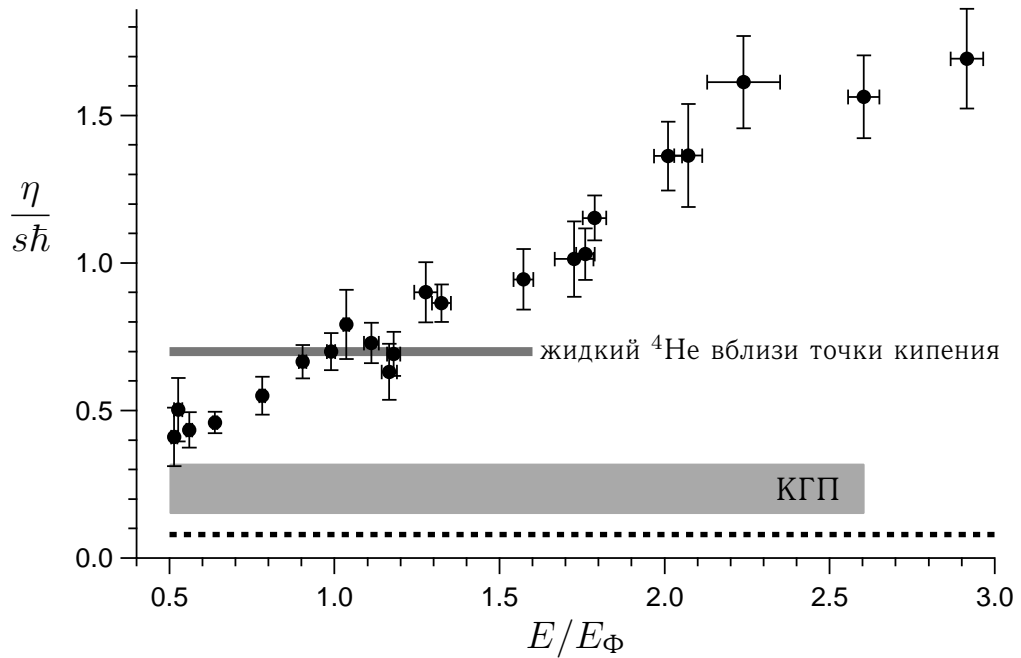


Рисунок 8 — Оценка отношения η/s в зависимости от энергии для сильно взаимодействующего газа ферми-атомов (точки). Пунктирная прямая — нижний предел $\eta/s = \hbar/4\pi$ в теории струн. Также показана оценка η/s для кварк-глюонной плазмы (КГП) и значение для жидкого гелия-4 вблизи точки кипения ($T = 4,2$ К, $P = 1$ атм.), вне зависимости от энергии.

в приложениях А и Б. Формулы для идеального ферми-газа в дископодобном потенциале помещены в приложение А. Поправки, связанные с ангармонизмом потенциала, обсуждаются в приложении Б. Применение газа ферми-атомов для изучения явлений за пределами квантовой задачи многих тел продемонстрировано в приложении В, где описана интерференция цепочки молекулярных бозе-эйнштейновских конденсатов со случайными фазами.

Основные результаты диссертации

- а) В экспериментах всесторонне изучен сильно взаимодействующий ферми-газ атомов, что позволило проверить фундаментальные модели и теории, в том числе, применимые к другим ферми-системам — ядерной материи, высокотемпературным сверхпроводникам, кварк-глюонной плазме. В результате этих экспериментов для ферми-системы с резонансными s -волновыми взаимодействиями, в том числе для атомного газа
- впервые получено непротиворечивое свидетельство сверхтекучести;
 - впервые измерена температура и энергия перехода к сверхтекучести, причём, двумя различными способами;
 - впервые измерена зависимость энергии от температуры;
 - впервые измерена вязкость; проверено предсказание теории струн о фундаментальном нижнем пределе вязкости;
 - впервые при конечных температурах проверена гипотеза об универсальности сильно взаимодействующей ферми-системы.

- б) Впервые наблюдалось распространение звука в ферми-газе атомов и его производной, бозе-эйнштейновском конденсате молекул. На основе прецизионных измерений скорости звука выполнена проверка уравнения состояния ферми-системы на мосту БКШ–БЭК.
- в) Впервые приготовлен двумерный ферми-газ атомов, открывающий путь экспериментальной реализации широкого круга задач: обнаружению неоднородной сверхтекучести Фульде–Ферела–Ларкина–Овчинникова, наблюдению новых типов фазовых переходов, созданию бездефектной модели высокотемпературного сверхпроводника с управляемой извне константой связи. Последнее позволит проверить двумерные теории высокотемпературной сверхпроводимости.
- г) Разработана серия новых экспериментальных методов, позволивших выполнить перчисленные наблюдения. Методы уже нашли применение в последующих экспериментах над ультрахолодными газами ферми-атомов. Методы являются достаточно общими, их применимость не ограничена атомом лития.
- д) Впервые в России создана экспериментальная установка для приготовления вырожденного газа атомов и молекул, как в режиме фермиевского вырождения, так и бозе-эйнштейновской конденсации. Достигнуты наименьшие в стране температуры, до 18 нК.

Публикации и доклады по теме диссертации

По теме диссертации опубликованы 12 статей в рецензируемых журналах и 4 статьи в трудах международных конференций. Выпущена 1 научно-популярная статья. Сделано 11 приглашённых докладов на конференциях. Часть работ вызвала широкий интерес в научном мире — публикации процитированы более 1000 раз, некоторые освещены научно-популярной прессой. Данные о цитировании приведены по материалам Web of Science и arXiv.org. Все работы выполнены после защиты кандидатской диссертации.

Статьи в рецензируемых журналах

- A1 Dynamics of a highly-degenerate, strongly-interacting Fermi gas of atoms / J. E. Thomas, S. L. Hemmer, J. Kinast, A. Turlapov, M. E. Gehm, K. M. O'Hara // *Journal of Low Temperature Physics*. — 2004, Jan. Vol. 134. P. 655–664.
Процитирована 1 раз.
- A2 Evidence for superfluidity in a resonantly interacting Fermi gas / J. Kinast, S. L. Hemmer, M. E. Gehm, A. Turlapov, J. E. Thomas // *Physical Review Letters*. — 2004, Apr. Vol. 92, no. 15. P. 150402.
Процитирована 472 раза.
Освещена в репортажах (*Physics Today*. 2004. Vol. 58. May. P. 23 ; *ibid*. July. P. 25), (*Science News*. 2004. Vol. 166. 18 Sep. P. 186), (NASA. 2004. 27 Apr. URL: <http://www.jpl.nasa.gov/releases/2004/112.cfm>) и других.
Репортаж (*Physics News Update*. 2004. No. 681. 13 April) отмечен в числе лучших историй 2004 года (American Institute of Physics. *Physics News*. 2005. Feb. P. 5).
- A3 Kinast J., Turlapov A., Thomas J. E. Breakdown of hydrodynamics in the radial breathing mode of a strongly interacting Fermi gas // *Physical Review A*. — 2004, Nov. Vol. 70, no. 5. P. 051401.

Процитирована 78 раз.

- A4 Heat capacity of strongly-interacting Fermi gas / J. Kinast, A. Turlapov, J. E. Thomas, Q. Chen, J. Stajic, K. Levin // *Science*. — 2005, Feb. Vol. 307. P. 1296.

Процитирована 240 раз.

Репортажи о работе вышли в (*Nature*. 2005. Vol. 433, 3 Feb. P. 474), (*Physics Today*. 2005. Vol. 58. July. P. 25), (American Institute of Physics. *Physics News Graphics*. 2005. 5 Jul. URL: <http://www.aip.org/png/2005/235.htm>) и других изданиях.

- A5 Kinast J., Turlapov A., Thomas J. E. Damping in a unitary Fermi gas // *Physical Review Letters*. — 2005, May. Vol. 94. P. 170404.

Процитирована 60 раз.

Репортажи о работе опубликованы в (*Physics Today*. 2005. Vol. 58. July. P. 25) и (American Institute of Physics. *Physics News Graphics*. 2005. 5 Jul. URL: <http://www.aip.org/png/2005/235.htm>).

- A6 Thomas J. E., Kinast J., Turlapov A. Virial theorem and universality in a unitary Fermi gas // *Physical Review Letters*. — 2005, Sep. Vol. 95, no. 12. P. 120402.

Процитирована 80 раз.

- A7 Evaporative cooling of unitary Fermi gas mixtures in optical traps / L. Luo, B. Clancy, J. Joseph, J. Kinast, A. Turlapov, J. E. Thomas // *New Journal of Physics*. — 2006, Sep. Vol. 8. P. 213.

Процитирована 6 раз.

- A8 Measurement of sound velocity in a Fermi gas near a Feshbach resonance / J. Joseph, B. Clancy, L. Luo, J. Kinast, A. Turlapov, J. E. Thomas // *Physical Review Letters*. — 2007, Apr. Vol. 98, no. 17. P. 170401.

Процитирована 43 раза.

- A9 Is a gas of strongly interacting atomic fermions a nearly perfect fluid? / A. Turlapov, J. Kinast, B. Clancy, Le Luo, J. Joseph, J. E. Thomas // *Journal of Low Temperature Physics*. — 2008, Feb. Vol. 150. P. 567–576. Published online 21 Nov. 2007.

Процитирована 28 раз.

- A10 Мартыанов К. А., Махалов В. Б., Турлапов А. В. Наблюдение вырожденного ферми-газа, пленённого стоячей электромагнитной волной // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2010, апр. Т. 91, вып. 8. С. 401–404.

Процитирована 1 раз.

Результат работы отмечен в (*Отчётном докладе Президиума Российской академии наук «Научные достижения РАН в 2010 году»*, РАН, 2011).

- A11 Martiyanov Kirill, Makhalov Vasiliy, Turlapov Andrey. Observation of a two-dimensional Fermi gas of atoms // *Physical Review Letters*. — 2010, Jul. Vol. 105, no. 3. P. 030404.

Процитирована 20 раз.

Журнал опубликовал с пометкой «Редакторы рекомендуют».

Репортаж о работе вышел в (*Science*. 2010. Vol. 329. 30 Jul. P. 492). Основной результат работы отмечен в (*Отчётном докладе Президиума Российской академии наук «Научные достижения РАН в 2010 году»*, РАН, 2011).

- A12 Турлапов А. В. Ферми-газ атомов // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2012, янв. Т. 95, вып. 2. С. 104–112.

Статьи в трудах международных конференций

- A13 Dynamics of a highly-degenerate, strongly-interacting Fermi gas / J. E. Thomas, S. L. Hemmer, J. M. Kinast, A. V. Turlapov, M. E. Gehm, K. M. O'Hara // *Laser spectroscopy: Proceedings of the XVI international conference. 13–18 July 2003. Palm Cove, Far North Queensland, Australia* / Ed. by Peter Hannaford, Andrei Sidorov, Hans Bachor. — 2003. P. 137–144.
- A14 Thomas J. E., Kinast J., Turlapov A. Thermodynamics and mechanical properties of a strongly-interacting Fermi gas // *Laser spectroscopy: Proceedings of the XVII international conference. 19–24 June 2005. Aviemore, Scotland* / Ed. by E. A. Hinds, Allister Ferguson, Erling Riis. — 2005. P. 223–228.
- A15 Thomas J. E., Kinast J., Turlapov A. Universal thermodynamics of a strongly interacting Fermi gas // *Low Temperature Physics: 24th international conference on low temperature physics (LT24). 10–17 August 2005. Orlando, FL, USA* / Ed. by Y. Takano, S. P. Hershfield, P. J. Hirschfeld, A. M. Goldman // American Institute of Physics. *AIP conference proceedings*. — 2006. Vol. 850. P. 69–76.
- A16 Optical trapping and fundamental studies of atomic Fermi gases / J. E. Thomas, J. Joseph, B. Clancy, L. Luo, J. Kinast, A. Turlapov // *Optical trapping and optical micromanipulation III. 13–17 August 2006. San Diego, CA, USA* / Ed. by K. Dholakia, G. C. Spalding // *Proceedings of SPIE*. — 2006. Vol. 6326. P. 632602.

Научно-популярная статья

- A17 Kinast J., Turlapov A., Thomas J. E. Optically trapped Fermi gases model strong interactions in nature // *Optics and Photonics News*. — 2005. Vol. 16. P. 21.

Приглашённые доклады автора диссертации

- A18 Experiments with a cold strongly-interacting Fermi gas // The 70th annual meeting of the southeastern section of the American Physical Society. 6–8 November 2003. Wilmington, NC, USA.
- A19 Experiments with a degenerate gas of Fermi atoms // II international conference “Frontiers of nonlinear physics”. 5–12 July 2004. Nizhniy Novgorod, Russia.
- A20 Universal properties of Fermi gases near a Feshbach resonance // 2005 March meeting of the American Physics Society. 21–25 March 2005. Los Angeles, CA, USA.
- A21 Dynamics and thermodynamics of a strongly-interacting Fermi gas // European Science Foundation exploratory workshop “New phenomena in superfluidity and superconductivity”. 4–5 July 2005. Camerino, Italy.
- A22 Universality and superfluidity in a strongly-interacting Fermi gas // Workshop “Strong correlations in ultra-cold Fermi systems”. 15–21 January 2006. Aspen, CO, USA.
- A23 Quantum viscosity of a strongly-interacting Fermi gas // Workshop “The interface of quark-gluon plasma physics and cold-atom physics”. 19–23 March 2007. Trento, Italy.

- A24 Why does a gas of strongly-interacting fermions behave as a nearly perfect fluid? // International symposium on quantum fluids and solids. 1–6 August 2007. Kazan, Russia.
- A25 Ultracold Fermi atoms in 2 and 3 dimensions // IV international conference “Frontiers of nonlinear physics” (FNP 2010). 13–20 July 2010. Nizhniy Novgorod – St. Petersburg, Russia.
- A26 Quasi-two-dimensional gas of Fermi atoms // International conference on coherent and nonlinear optics (ICONO 2010). 23–26 August 2010. Kazan, Russia.
- A27 Experiments with ultracold atomic gases // HIC-for-FAIR school and workshop on dense QCD phases in heavy-ion collisions. 21 August – 4 September 2010. JINR, Dubna, Russia.
- A28 Two-dimensional Fermi gas of atoms // Workshop on frontiers in ultracold Fermi gases. 6–10 June 2011. Trieste, Italy.

Список литературы

- 1 *DeMarco B., Jin D. S.* Onset of Fermi degeneracy in a trapped atomic gas // *Science*. 1999, Sep. Vol. 285. P. 1703.
- 2 *Baker George A.* Neutron matter model // *Physical Review C*. 1999, Oct. Vol. 60, no. 5. P. 054311.
- 3 *Heiselberg Henning.* Fermi systems with long scattering lengths // *Physical Review A*. 2001, Mar. Vol. 63, no. 4. P. 043606.
- 4 *Kolb P. F., Heinz U.* Quark Gluon Plasma 3 / Ed. by R. C. Hwa, X. N. Wang. Singapore: World Scientific, 2004. P. 634. arXiv: nucl-th/0305084.
- 5 BCS-BEC crossover: From high temperature superconductors to ultracold superfluids / Q. Chen, J. Stajic, S. Tan, K. Levin // *Physics Reports*. 2005, Jun. Vol. 412. P. 1.
- 6 *Келдыш Н. В., Козлов А. Н.* Коллективные свойства экситонов в полупроводниках // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1968. Т. 54, вып. 3. С. 978–993.
- 7 *Kerbikov B.* Unusual condensates in quark and atomic systems // *Surveys in High Energy Physics*. 2006. Vol. 20. P. 47 – 57. arXiv:hep-ph/0510302.
- 8 Measurement of the entropy and critical temperature of a strongly interacting Fermi gas / L. Luo, B. Clancy, J. Joseph, J. Kinast, J. E. Thomas // *Physical Review Letters*. 2007, Feb. Vol. 98, no. 8. P. 080402.
- 9 Measurement of universal thermodynamic functions for a unitary Fermi gas / Munekazu Horikoshi, Shuta Nakajima, Masahito Ueda, Takashi Mukaiyama // *Science*. 2010, Jan. Vol. 327, no. 5964. P. 442–445.
- 10 *Fulde Peter, Ferrell Richard A.* Superconductivity in a strong spin-exchange field // *Physical Review*. 1964, Aug. Vol. 135, no. 3A. P. A550–A563.
- 11 *Ларкин А. И., Овчинников Ю. Н.* Неоднородное состояние сверхпроводников // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1964, сен. Т. 47. С. 1136.

- 12 *Levinsen J., Cooper N. R., Gurarie V.* Stability of fermionic gases close to a p -wave Feshbach resonance // *Physical Review A*. 2008, Dec. Vol. 78, no. 6. P. 063616.
- 13 *Gurarie V., Radzihovsky L., Andreev A. V.* Quantum phase transitions across a p -wave Feshbach resonance // *Physical Review Letters*. 2005, Jun. Vol. 94, no. 23. P. 230403.
- 14 Heat capacity of strongly-interacting Fermi gas / J. Kinast, A. Turlapov, J. E. Thomas, Q. Chen, J. Stajic, K. Levin // *Science*. 2005, Feb. Vol. 307. P. 1296.
- 15 Sound propagation in elongated superfluid fermionic clouds / P. Capuzzi, P. Vignolo, F. Federici, M. P. Tosi // *Physical Review A*. 2006, Feb. Vol. 73, no. 2. P. 021603.
- 16 *Ho Tin-Lun.* Universal thermodynamics of degenerate quantum gases in the unitarity limit // *Physical Review Letters*. 2004, Mar. Vol. 92, no. 9. P. 090402.
- 17 Superfluid Fermi gases with large scattering length / J. Carlson, S.-Y. Chang, V. R. Pandharipande, K. E. Schmidt // *Physical Review Letters*. 2003, Jul. Vol. 91, no. 5. P. 050401.
- 18 *Perali A., Pieri P., Strinati G. C.* Quantitative comparison between theoretical predictions and experimental results for the BCS-BEC crossover // *Physical Review Letters*. 2004, Sep. Vol. 93, no. 10. P. 100404.
- 19 Equation of state of a Fermi gas in the BEC-BCS crossover: A quantum Monte Carlo study / G. E. Astrakharchik, J. Boronat, J. Casulleras, Giorgini, S. // *Physical Review Letters*. 2004, Nov. Vol. 93, no. 20. P. 200404.
- 20 Observation of a strongly interacting degenerate Fermi gas of atoms / K. M. O'Hara, S. L. Hemmer, M. E. Gehm, S. R. Granade, J. E. Thomas // *Science*. 2002, Nov. Vol. 298. P. 2179.
- 21 Mechanical stability of a strongly interacting Fermi gas of atoms / M. E. Gehm, S. L. Hemmer, S. R. Granade, K. M. O'Hara, J. E. Thomas // *Physical Review A*. 2003, Jul. Vol. 68, no. 1. P. 011401(R).
- 22 Crossover from a molecular Bose-Einstein condensate to a degenerate Fermi gas / M. Bartenstein, A. Altmeyer, S. Riedl, S. Jochim, C. Chin, J. Hecker Denschlag, R. Grimm // *Physical Review Letters*. 2004, Mar. Vol. 92, no. 12. P. 120401.
- 23 Experimental study of the BEC-BCS crossover region in lithium 6 / T. Bourdel, L. Khaykovich, J. Cubizolles, J. Zhang, F. Chevy, M. Teichmann, L. Tarruell, S. J. J. M. F. Kokkelmans, C. Salomon // *Physical Review Letters*. 2004, Jul. Vol. 93, no. 5. P. 050401.
- 24 Pairing and phase separation in a polarized Fermi gas / G. B. Partridge, W. Li, R. I. Kamar, Y. Liao, R. G. Hulet // *Science*. 2006, Jan. Vol. 311. P. 503.
- 25 Potential energy of a ^{40}K Fermi gas in the BCS-BEC crossover / J. T. Stewart, J. P. Gaebler, C. A. Regal, D. S. Jin // *Physical Review Letters*. 2006, Nov. Vol. 97. P. 220406.
- 26 Measurement of sound velocity in a Fermi gas near a Feshbach resonance / J. Joseph, B. Clancy, L. Luo, J. Kinast, A. Turlapov, J. E. Thomas // *Physical Review Letters*. 2007, Apr. Vol. 98, no. 17. P. 170401.
- 27 *Kinast J., Turlapov A., Thomas J. E.* Damping in a unitary Fermi gas // *Physical Review Letters*. 2005, May. Vol. 94. P. 170404.

- 28 Critical temperature and condensate fraction of a fermion pair condensate / Yasuhisa Inada, Munekazu Horikoshi, Shuta Nakajima, Makoto Kuwata-Gonokami, Masahito Ueda, Takashi Mukaiyama // *Phys. Rev. Lett.* 2008, Oct. Vol. 101. P. 180406.
- 29 Exploring the thermodynamics of a universal Fermi gas / S. Nascimbene, N. Navon, K. J. Jiang, F. Chevy, C. Salomon // *Nature*. 2010, Feb. Vol. 463. P. 1057.
- 30 Kovtun P. K., Son D. T., Starinets A. O. Viscosity in strongly interacting quantum field theories from black hole physics // *Physical Review Letters*. 2005, Mar. Vol. 94, no. 11. P. 111601.
- 31 Nagle J. L., Steinberg P., Zajc W. A. Quantitative and conceptual considerations for extracting the Knudsen number in heavy ion collisions // *Physical Review C*. 2010, Feb. Vol. 81, no. 2. P. 024901.