

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР
им. Б. И. Веркина

На правах рукописи

УДК 536.48

ОМЕЛАЕНКО Николай Федорович

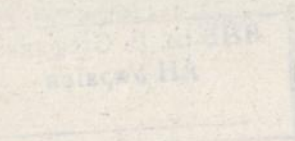
ЯМР-исследования фазового расслоения
жидких и твердых растворов изотопов гелия.

01.04.09. - Физика низких температур

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков - 1993



4 10 29006
Работа выполнена в Физико-техническом институте низких температур им. Б. И. Веркина АН Украины

Научные руководители: доктор физико-математических наук
профессор В. А. МИХЕЕВ
доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник
Э. Я. РУДАВСКИЙ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Адаменко И. Н.
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник
Городилов Б. Я.

Ведущая организация: Российский Научный центр "Институт
им. И. В. Курчатова", 123182, Москва.

Защита состоится "___" _____ 1994 г. в 15⁰⁰ часов на заседании Специализированного Совета К 016.27.02 при Физико-техническом институте низких температур им. Б. И. Веркина АН Украины (310164, г. Харьков, пр. Ленина, 47).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института низких температур им. Б. И. Веркина АН Украины.

Автореферат разослан "___" _____ 1994 г.

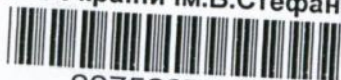
Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с подписями, заверенными Гербовой печатью, просим направлять по адресу 310164, г. Харьков, 164 пр. Ленина, 47 ФТИНТ им. Б. И. Веркина АН Украины, ученому секретарю Специализированного совета К 016.27.02

Ученый секретарь Спецсовета
К 016.27.02
кандидат физ.-мат. наук

А. М. Кислов

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00756870 (X)

Актуальность проблемы. Растворы ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ занимают одно из ведущих мест в современной физике и технике низких температур. Как жидкие, так и твердые растворы являются примером систем, где квантовые закономерности проявляются в макроскопических масштабах. Жидкие растворы при достаточно низких температурах образуют квантовые жидкости, у которых, как и у чистых ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$, деброялевская длина волны атомов сравнима с межатомными расстояниями, а твердые растворы являются одними из наиболее ярких представителей квантовых кристаллов.

Среди наиболее интересных физических явлений, обнаруженных в растворах ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$, следует отметить квантовую диффузию ${}^3\text{He}$ в кристаллах ${}^4\text{He}$, когда примесные атомы становятся квазичастицами и могут свободно перемещаться по всему кристаллу. Другой круг явлений связан с тем, что в жидких растворах ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ при очень низких температурах примеси ${}^3\text{He}$ образуют ферми-жидкость, которая растворяется в сверхтекучем фоне, образованном ${}^4\text{He}$.

Важной особенностью растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ является также их использование в современной криогенной технике сверхнизких температур: Рефрижераторы растворения, использующие холод, образованный при растворении ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$, в настоящее время являются основным средством получения температур вплоть до $\sim 10^{-3}$ К.

При низких температурах как в жидких, так и твердых растворах ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ имеет место фазовый переход I рода — фазовое расслоение на концентрированную и разбавленную фазы. Однако до самого последнего времени оставались практически неизученными вопросы, связанные с кинетикой этих фазовых переходов. Между тем свойства растворов, проявляемые в процессе фазового расслоения, оказываются очень непохожими на фазовые переходы I рода во многих классических системах. При определенных условиях в жидких растворах ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ можно ожидать проявления квантовых эффектов, а также условий гомогенного зародышеобразования. При распаде твердых растворов можно ожидать влияния различных процессов, связанных с туннельным переносом вещества.

По этой причине представляется актуальным систематическое исследование кинетики фазового расслоения жидких и твердых растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$, что может служить стимулом для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований данной проблемы.

Ц е л ь в настоящей работы является:

1. Исследование кинетики образования и роста концентрированной фазы при фазовом расслоении твердых растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ и моделирование этого процесса с помощью численных экспериментов.

2. Изучение спиновой диффузии и магнитной восприимчивости в квазидономерной концентрированной фазе, образующейся при распаде твердых растворов изотопов гелия.

3. Измерение предельной растворимости ${}^3\text{He}$ в сверхтекучем ${}^4\text{He}$ при сверхнизких температурах и повышенных давлениях.

4. Создание и исследование пересыщенных метастабильных сверхтекучих растворов ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ и определение границ их существования.

Научная новизна. Впервые экспериментально обнаружено, что образующаяся при фазовом расслоении ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ концентрированная фаза обладает необычными магнитными и кинетическими свойствами. Время роста этой фазы существенно превышает характерные времена, обусловленные квантовыми эффектами в кристалле.

Впервые построены равновесные фазовые диаграммы состояния жидких растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ при сверхнизких температурах и повышенных давлениях. Зарегистрированы возникающие перед фазовым расслоением пересыщенные сверхтекучие растворы и определена температурная зависимость максимально достижимого пересыщения.

Научное и практическое значение настоящей работы связано с тем, что полученные в ней новые результаты экспериментального исследования фазового расслоения в жидких и твердых растворах изотопов гелия существенно расширяют наши представления на стыке физики фазовых переходов, физики квантовых жидкостей и квантовых кристаллов. Диссертация ставит новые задачи, связанные с детальным исследованием свойств концентрированной фазы, образующейся при распаде твердых растворов.

Новые сведения о кинетике фазовых переходов, полученные в работе, могут носить более общий характер и быть использованы при анализе других вопросов, возникающих при исследовании других процессов фазовых переходов I-го рода.

Разработанные и созданные в процессе выполнения данной работы экспериментальные устройства — рефрижератор растворения, измерительные ячейки, ЯМР методики — могут быть использованы и в других фундаментальных исследованиях при низких и сверхнизких температурах.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту.

1. Обнаружено, что при фазовом расслоении твердых растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ образующаяся концентрированная фаза, равномерно распределенная по объему кристалла, обладает необычными свойствами: ее намагниченность в широком диапазоне температур следует закону Кюри, а коэффициент диффузии достигает необычно больших для твердого тела значений.

2. Установлено, что процесс фазового расслоения твердых растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ происходит за времена (десятки часов), намного превышающие значения, определенные с учетом квантовых свойств твердых растворов изотопов гелия. При этом характерные времена распада уменьшаются при повторных охлаждениях и увеличиваются после отжига образца.

3. Обнаружено, что рост новой фазы со временем имеет ступенчатый вид, что, как показано моделированием этого процесса, может быть связано с влиянием деформационного потенциала дефектов решетки и с сильной зависимостью коэффициента диффузии примесных атомов ${}^3\text{He}$ от концентрации.

4. Получены экспериментальные данные о равновесной диаграмме фазового расслоения жидких растворов изотопов гелия и измерена предельная равновесная растворимость ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ при повышенных давлениях и низких температурах. Получена эмпирическая формула, описывающая зависимость предельной растворимости от давления и температуры.

5. Обнаружено, что фазовому расслоению жидких растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ предшествует образование пересыщенных долгоживущих сверхтекучих растворов, а линия, описывающая максимально достижимое пересыщение, может соответствовать классическому термоактивируемому процессу зародышеобразования.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных конференциях по физике низких температур (LT-18, Киото, Япония, 1987 г.; НТ-XXIX, Казань, 1992 г.), на XXV всевозных совещаниях по физике низких температур (Ленинград, 1988 г.), на Бакурианских коллоквиумах по сверхтекучести и квантовым кристаллам (Бакуриани, Грузия, 1989 и 1990 г.), на 4 и 5 республиканских семинарах по физике и технике сверхнизких температур (Донецк, 1989; Алушта, 1991), на республиканской конференции "Фізика в Україні" (Киев, 1993 г.) и на XX, XXI и XXII научно-технических конференциях молодых исследователей (ФТИНГ АН Украины, Харьков, 1989-1991 г.).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 145 наименований. Общий объем диссертации 146 стр., включая 45 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении дана краткая характеристика области исследования, обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели исследования, показана их научная и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

Глава I содержит литературный обзор экспериментальных данных, касающихся фазовой диаграммы системы ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$, диффузии атомов ${}^3\text{He}$ в жидких и твердых растворах изотопов гелия. В этой главе также описываются некоторые кинетические свойства твердых и жидких растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ и приводятся сведения о физических результатах по исследованию фазового расслоения жидких и твердых растворов ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$, полученных до начала проведения настоящей работы.

Глава заканчивается выводами и формулировкой постановки задачи данной диссертации.

В главе II описана экспериментальная установка, включающая в себя рефрижератор растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ с адсорбционной откачкой паров ${}^3\text{He}$, позволяющий проводить физические измерения в области температур вплоть до 30 мК и давлений до 40 атм. В этой же главе также описана методика импульсного ЯМР применительно к измерению времен спин-решеточной и спин-спиновой релаксации, диффузии и магнитной восприимчивости, а также схема ЯМР-спектрометра с рабочей частотой 9.15 МГц.

Температура контролировалась термометром сопротивления MATSU-SITA-72, калиброванному по кривой плавления чистого ${}^3\text{He}$. Измерение температуры осуществлялось кристаллизационным термометром, основанном на измерении давления плавления ${}^3\text{He}$. Максимальная относительная ошибка измерения температуры не превышала 1%.

Точность измерения амплитуды ЯМР эхо-сигнала составляла 10%. При этом относительная ошибка при измерении времен магнитной релаксации и коэффициента диффузии была не больше 5%, а абсолютная ошибка измерения концентрации слабой фазы при расслоении жидких растворов не превышала 0.03%.

В главе III приведены экспериментальные результаты исследования кинетики процесса фазового расслоения слабых твердых растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ и моделирования этого процесса на компьютере, а также ре-

зультаты измерений времен магнитной релаксации, коэффициента спиновой диффузии ^3He и температурной зависимости намагниченности в концентрированной фазе расплавленного раствора.

Методика исследования кинетики процесса расслоения твердых растворов была основана на сильном различии времен продольной релаксации в слабой (~50 мин.) и в концентрированной (~1 сек.) фазах. В экспериментах использовалась измерительная ячейка, медный корпус которой крепился с помощью резьбового соединения к камере растворения, к крышке которой был припечен медный порошок для улучшения теплового контакта. Исследуемые образцы кристаллизовались непосредственно в цилиндрическом объеме внутри ЯМР катушки. Дно измерительной ячейки являлось подвижной пластиной емкостного датчика давления. Эксперименты проводились с образцами с молярным объемом $v=20.55 \text{ см}^3/\text{моль}$, выращенными из газовой смеси с концентрацией $x_3 = 0.54\%$ методом блокировки капилляра. Охлаждение от 400 мК до 100 мК осуществлялось со скоростью $\sim 5 \text{ мК}/\text{мин}$.

h, o. e.

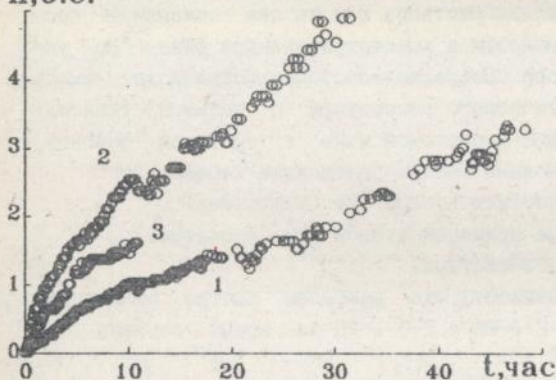


Рис. 1. Кинетика распада твердого раствора с исходным содержанием 0.54% ^3He при температуре 100 мК.

Кривая 1 характеризует типичный ход процесса распада после первого охлаждения образца, кривая 2 — кинетику распада того же образца после быстрого отогрева до 400 мК и повторного охлаждения, а кривая 3 описывает кинетику распада того же кристалла после отжига.

Обращает на себя внимание тот факт, что предистория образца сильно влияет на кинетику распада твердого раствора ^3He - ^4He . В частности, термоциклирование приводило не только к изменению времени распада, но и влияло на температуру расслоения T_p . Заметное

Типичная временная зависимость амплитуды эхо-сигнала от концентрированной фазы представлена на рис. 1, характеризующая кинетику распада твердого раствора ^3He - ^4He при температуре 100 мК. Кривая 1 характеризует типичный ход процесса распада после первого охлаждения образца, кривая 2 — кинетику распада того же образца после быстрого отогрева до 400 мК и повторного охлаждения, а кривая 3 описывает кинетику распада того же кристалла после отжига.

увеличение T_p и скорости роста новой фазы после термоциклирования и уменьшение их после отжига указывают на важную роль дефектов в процессе образования новой фазы при распаде твердых растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$. Появлению таких дефектов способствует быстрое изменение температуры ("термоудар"), а также процесс перестройки решетки ГПУ-ОЦК.

Отличительной особенностью всех кривых на рис. 1 является наличие на них ступеней различной длины и высоты. Еще один экспериментальный результат заключается в том, что процесс распада весьма продолжителен и составляет десятки часов, в то время как оценки, полученные с учетом квантовой диффузии, дают времена, не превышающие нескольких часов. Отметим, что полученные в нашей работе данные о времени распада были затем подтверждены Побеллом, получившим характерные времена 20-30 часов.

В связи со ступенчатым ростом сигнала от концентрированной фазы, а также большими временами распада, возникает вопрос, отражает ли приведенная на рис. 1 зависимость амплитуды эхо-сигнала от времени истинный процесс распада раствора или же она описывает процесс релаксации намагниченности в концентрированной фазе ${}^3\text{He}$ уже давно распавшегося раствора. Последнее обстоятельство может иметь место при наличии энергетического резервуара с большой теплоемкостью между зеemanовской Z - системой и Ph - системой фононов. Были рассмотрены все возможные каналы релаксации через:

- 1) туннельный обмен местами атомов ${}^3\text{He}$ (3-система);
- 2) туннельное движение примесей атомов ${}^4\text{He}$ (4-система);
- 3) движение вакансий (ν -система).

Подробный расчет показывает, что наиболее быстро релаксация протекает по топологиям: $Z-\nu\text{-Ph}$ и $Z-3-\nu\text{-Ph}$ за время порядка 0.1 секунды.

Результаты численных оценок T_1 и измерения T_1 в концентрированной фазе были сопоставлены с результатами прямых измерений T_1 в чистом массивном ${}^3\text{He}$. Было обнаружено, что в "чистом" ${}^3\text{He}$ в исследуемом интервале температур и плотностей время T_1 (~ 1 с) согласуется с численными оценками (~ 0.1 с) и результатами измерения T_1 (~ 1 с) концентрированной фазы.

Совпадение результатов для массивного "чистого" ${}^3\text{He}$ и концентрированной фазы ${}^3\text{He}$, выпавшей из слабого раствора, вместе с результатами численных оценок дает основание считать идентичными процессы продольной релаксации в этих двух системах и свидетельст-

вует о термодинамическом равновесии между спиновой и фононной системами.

Особый интерес представляло также исследование свойств концентрированной фазы, образующейся при распаде слабых твердых растворов ^3He в ^4He . Поскольку амплитуда эхо-сигнала пропорциональна намагниченности ^3He , то представлялось целесообразным измерение температурной зависимости намагниченности концентрированной фазы. Измерение амплитуды эхо-сигнала, характеризующей магнитную восприимчивость в зависимости от температуры, проводились при быстром отогреве после распада исходного раствора. При этом учитывался тот факт, что восстановление исходного раствора протекает в течение нескольких часов, что намного превосходит время, необходимое для измерения.

h, о.е.

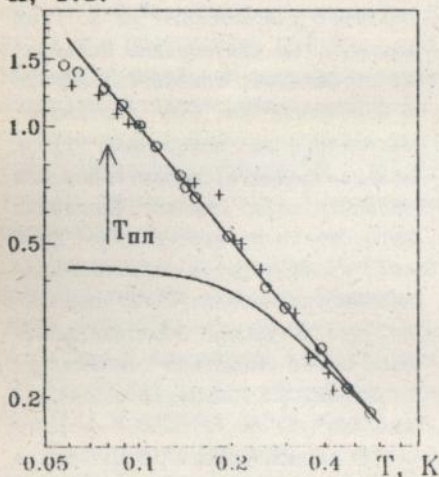


Рис. 2. Зависимость амплитуды восстановленного эхо-сигнала от температуры: о - массивный ^3He с содержанием 0.6% ^4He ; + - концентрированная фаза распавшегося слабого раствора 0.54% ^3He . Стрелкой показана температура плавления ^3He при $\omega = 24.65 \text{ см}^3/\text{моль}$. Нижняя кривая - восприимчивость жидкого ^3He при давлении 27.5 атм.

Результаты измерений приведены на рис. 2. Отчетливо видно, что вплоть до температуры плавления $T = 80 \text{ мК}$ полученные данные хорошо описываются законом Кюри. Видно, что имеется довольно хорошая корреляция данных для "чистого" ^3He и концентрированной фазы распавшегося слабого раствора, что свидетельствует о парамагнитных свойствах концентрированной фазы ^3He , выпавшей из слабого твердого 0.54% раствора ^3He в ^4He .

Для сравнения на рис. 2 приведена кривая восприимчивости жидкого ^3He . Очевидно, что поведение намагниченности концентрированной фазы соответствует твердотельному, а не жидкостному поведению.

В этом случае особый интерес представляло измерение коэффициента диффузии в выпавшей фазе. Измерения коэффициента

диффузии проводились с помощью обычной ЯМР-методики по изменению амплитуды эхо-сигнала в зависимости от градиента магнитного поля. Однако, вместо обычной экспоненциальной зависимости получилась зависимость, которая характерна для низкоразмерной диффузии.

Обработанные по формулам для одномерной диффузии полученные значения коэффициента диффузии (рис. 3) оказались зависящими от времени (τ) между ЯМР импульсами. Видно, что при больших τ реализуется режим ограниченной диффузии, когда $D \sim \tau^2$. Смена режимов при $\tau \sim 10$ мс дает размер ограничения $l \sim 4 \cdot 10^{-4}$ см.

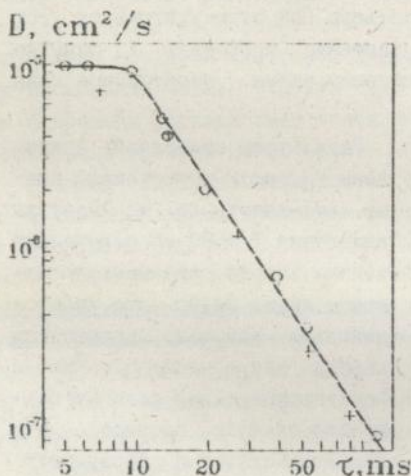


Рис. 3. Зависимость коэффициента диффузии от времени между радиочастотными импульсами τ в концентрированной фазе расплавленного 0.54% раствора. Прямая линия соответствует зависимости $D \sim \tau^{-2}$.

Обращает на себя внимание необычно большое значение коэффициента диффузии в концентрированной фазе, выпадающей из слабого раствора. Такое значение D характерно для жидкого ^3He и, как минимум, на два порядка превышает коэффициент спиновой диффузии в массивном ^3He . Это противоречит данным по измерениям T_1 и намагниченности, характерным для твердого тела. Однако однозначного ответа на этот вопрос пока нет, кроме того, в недавних экспериментах Побелла было показано, что во вновь образовавшейся фазе может смещаться температура плавления по сравнению с массивным ^3He .

В данной работе была также предпринята попытка моделирования процесса роста концентрированной фазы с использованием вычислительной техники. Предполагалось, что рост новой фазы происходит диффузионным путем в потенциале поля дислокации. При этом допускалась также возможность существования не только разбавленной и концентрированной фаз, но и некоторых промежуточных фаз - локализованной, где проявляется явление квантовой локализации, и ОЦК-фазы, образующейся в результате ГПУ-ОЦК перехода.

Несмотря на грубость модели, численные эксперименты дают ряд результатов, согласующихся с экспериментом: наличие ступенек в

процессе роста новой фазы; влияние деформационного поля дислокации на фазовое расслоение; влияние сильной зависимости коэффициента диффузии от концентрации на процесс накопления новой фазы.

Проведенное моделирование можно рассматривать как предварительное, и в дальнейшем предполагается усовершенствовать модель и сделать ее более адекватной реальной ситуации.

В главе IV приведены данные по измерению предельной равновесной растворимости ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ при сверхнизких температурах и повышенных давлениях, а также результаты исследования пересыщенных метастабильных сверхтекучих растворов ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ в зависимости от температуры и давления.

Как было показано, на процесс фазового расслоения в твердых растворах определяющее влияние оказывают дефекты кристаллической решетки. Это не позволяет исследовать влияние других механизмов на процесс зародышеобразования. Жидкие растворы ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ в этом смысле являются более "чистым" объектом. Кроме того, при низких температурах все посторонние примеси в гелии кристаллизуются, а ${}^4\text{He}$ покрывает пленкой все твердые поверхности, благодаря чему стенки не стимулируют образования новой фазы ${}^3\text{He}$. Единственным источником зарождения новой фазы является свободная поверхность, где имеется повышенная концентрация ${}^3\text{He}$. Но это обстоятельство можно легко устранить, если проводить эксперименты при давлении выше давления насыщенных паров.

Цилиндрическая медная ячейка для исследования процессов фазового расслоения в жидких растворах ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ содержала в верхней части небольшую по объему полость, охватываемую ЯМР катушкой, вклеенной в эпоксидную вставку. При расслоении жидкого раствора ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ более легкая концентрированная фаза ${}^3\text{He}$ всплывала и накапливалась в верхней части ячейки.

Регистрация фазового расслоения производилась методом импульсного ЯМР по изменению формы и амплитуды сигнала в процессе расслоения. Поскольку амплитуда h эхо-сигнала ЯМР пропорциональна числу ядер ${}^3\text{He}$ в этой полости, то временная зависимость $h(t)$ дает сведения об изменении количества ${}^3\text{He}$ внутри радиочастотной катушки, т.е. о кинетике фазового расслоения.

Исследование кинетики фазового расслоения требовало наличия данных о равновесных линиях расслоения при повышенных давлениях и низких температурах. К началу выполнения этой работы таких данных не было. Поэтому предварительно были проведены измерения по опре-

делению равновесных концентраций расслоившихся фаз в зависимости от температуры (в диапазоне от 30 мК до 200 мК) и давления (в диапазоне от 0.07 до 1 атм).

Концентрация разбавленной фазы x_d определялась из измеренных значений амплитуды эхо-сигнала до (h_0) и после (h) расслоения с учетом известных значений полного объема ячейки и объема верхней цилиндрической полости:

$$x_d = x_0 - x_0 \frac{h/h_0 \cdot v_d/v_0 - 1}{V_{\text{я}}/V_{\text{к}} \cdot v_4/v_0 - 1}, \quad (1)$$

где v_d , v_0 , v_4 - молярные объемы слабой фазы, исходного раствора и чистого ^4He . Абсолютная погрешность измерения концентрации при этом составляла $\Delta x_d < 0.03\%$. Полученные экспериментальные данные (рис. 4) аппроксимировались эмпирической зависимостью:

$$x_d = (x_{d0} + a \cdot P) \cdot (1 + \beta \cdot T^2), \quad (2)$$

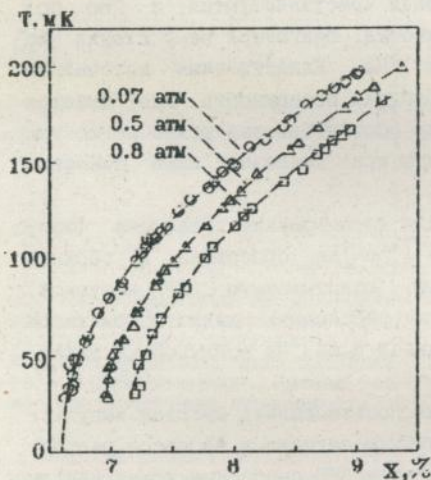


Рис. 4. Равновесные линии фазового расслоения растворов при различных давлениях. Сплошные кривые - расчет по формуле (2).

где подгоночные коэффициенты соответственно равны $x_{d0} = 6.6\%$, $a = 0.632 \text{ атм}^{-1}$, $\beta = 9.10 \text{ К}^{-2}$.

Особенности фазового перехода изучались методом декомпрессии, основанном на том, что фазовая диаграмма x - T существенно смещается с давлением. Исходное давление создавалось при температуре ~ 200 мК, затем образец охлаждался до минимальной температуры (~ 30 мК), после чего осуществлялся сброс давления (декомпрессия) до заданного значения. Декомпрессия производилась с различной скоростью. Наиболее информативные результаты были получены при малых скоростях сброса (ниже ~ 0.1 атм/мин). В этом случае раствор переходил

в долгоживущее метастабильное состояние. Для растворов с концентрацией $8 + 9.5\% \text{ } ^3\text{He}$ в области давлений 0.1-0.8 атм при температуре

~ 30 мК время жизни такой фазы составляло несколько часов. При этом механические возмущения: подлив ^4He в дьюар или специально создаваемые вибрации дьюара не приводили к фазовому расслоению.

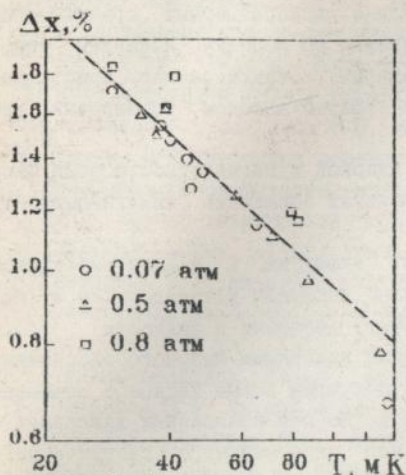


Рис. 5. Температурная зависимость максимального пересыщения раствора при различных давлениях.

Чтобы инициировать расслоение, полученный метастабильный раствор отогревался со скоростью 1-2 мК/мин, пока не происходил фазовый переход. Полученные таким образом данные о линии достижимого пересыщения для трех давлений приведены на рис. 5. Область метастабильной фазы раствора ограничена слева равновесной линией расслоения, а справа - линией достижимого пересыщения. Как известно, термоактивационный механизм приводит к зависимости пересыщения Δx от температуры по закону $\Delta x \sim T^{-1/2}$. Видно, что в весьма широком интервале температур экспериментальные данные хорошо описываются

этой классической зависимостью. Это означает, что в эксперименте образование зародышей новой фазы в растворе ^3He - ^4He происходит, по-видимому, термоактивационным путем.

В В О Д Ы

1. Обнаружено, что процесс роста и накопления концентрированной фазы при распаде твердых растворов изотопов гелия происходит за заметно большее время (десятки часов), чем это следует из оценок с учетом квантовой диффузии.

2. Установлено, что рост новой фазы имеет ступенчатый вид, что, как показано моделированием этого процесса, может быть связано с влиянием деформационного потенциала дефектов решетки и с сильной зависимостью коэффициента диффузии примесных атомов ^3He от концентрации.

3. Показано, что температура распада и скорость роста новой фазы зависят от предистории образца, что указывает на заметное

влияние дефектов кристаллической решетки на процесс фазового расслоения твердого раствора ^3He - ^4He .

4. Концентрированная фаза, образующаяся при распаде твердых растворов ^3He - ^4He , может собираться в низкоразмерные ограниченные образования, причем размер ограничения по порядку величины соответствует расстоянию между дислокациями, а также размеру кристаллитов, образующихся при выращивании образца методом блокировки капилляра.

5. Температурная зависимость ядерной намагниченности этой фазы подчиняется закону Кюри и соответствует поведению намагниченности чистого ^3He .

6. Обнаружено, что коэффициент диффузии в концентрированной фазе намного превосходит коэффициент диффузии в твердом ^3He и более близок по значению к коэффициенту диффузии в жидкости.

7. Предложена методика измерения диаграммы фазового расслоения жидких растворов изотопов гелия и получены новые данные о равновесной предельной растворимости ^3He в ^4He при повышенных давлениях.

8. Предложена методика создания пересыщенного сверхтекучего раствора ^3He в ^4He , с помощью которой получены самые большие пересыщения, а линия, описывающая максимально достижимое пересыщение, соответствует классическому термоактивируемому процессу зародышеобразования.

Список работ по теме диссертации:

1. Михеев В. А., Майданов В. А., Михин Н. П., Кальной С. Е., Омелаенко Н. Ф. Особенности концентрированной фазы в условиях распада слабых твердых растворов ^3He в ^4He . Физ. низких темп. 14, № 6, 563-575 (1988)
2. Mikheev V. A., Mikhin N. P., Maidanov V. A., Kal'noy S. E., Omel'enko N. F. Decomposition kinetics in solid solutions of helium isotopes at superlow temperatures. Proc. 18th Int. Conf. of Low Temperature Physics (LT-18) (Kyoto, 1987).
3. Михеев В. А., Майданов В. А., Михин Н. П., Кальной С. Е., Омелаенко Н. Ф. ЯМР - исследование магнитной восприимчивости слабых твердых растворов ^3He - ^4He в условиях фазового расслоения. В кн.: Тезисы докладов XXV Всесоюзного совещания по физике низких температур, Ленинград, ФТИ АН СССР, ч. 2, Г7, (1988).
4. Михеев В. А., Майданов В. А., Михин Н. П., Омелаенко Н. Ф. Ячейка для

исследования низкотемпературного расслоения жидких растворов изотопов гелия. В кн.: Тезисы докладов XX научно-технической конференции молодых исследователей. Харьков, ФТИНТ АН УССР, 166-167 (1989).

5. Михеев В.А., Майданов В.А., Михин Н.П., Омелаенко Н.Ф. Методика исследования расслоения жидких растворов ^3He - ^4He с помощью ЯМР. В кн.: Тезисы докладов 4 республиканского семинара по физике и технике СНТ-4, Донецк, ДонФТИ, (1989).
6. Михеев В.А., Майданов В.А., Михин Н.П., Надирашвили Э.Ш., Омелаенко Н.Ф. Методика исследования расслоения жидких растворов изотопов гелия методом импульсного ЯМР. В кн.: Тезисы докладов XXI научно-технической конференции молодых исследователей Харьков, ФТИНТ, 41-42 (1990).
7. Майданов В.А., Михеев В.А., Михин Н.П., Омелаенко Н.Ф. ЯМР исследования фазового расслоения жидких растворов ^3He - ^4He под давлением. В кн.: XXIX совещание по физике низких температур. Тезисы докладов. Казань, КГУ, ч.2, Г2 (1992).
8. Майданов В.А., Михеев В.А., Михин Н.П., Омелаенко Н.Ф., Рудавский Э.Я., Чаговец В.К., Шешин Г.А. Пересыщение сверхтекучих растворов ^3He - ^4He в области фазового расслоения, Физ. низких темп. 18, № 9, 943-951 (1992).
9. Омелаенко Н.Ф. Исследования расслоения жидких растворов ^3He - ^4He при давлениях выше давления насыщенного пара, В кн.: Тезисы докладов XXII научно-технической конференции молодых исследователей, Харьков, ФТИНТ, 41-42 (1990).
10. Maidanov V.A., Mikheev V.A., Mikhin N.P., Omelaenko N.F., NMR study of phase separation of superfluid ^3He - ^4He solutions, in: ESF network on 2 quantum fluids and solids, first workshop: superfluidity, Cargeesse, 17 to 23 April 1993, 226-227.
11. Mikheev V.A., Chagovets V.K., Maidanov V.A., Omelaenko N.F., Rudavskii E.Ya., Mikhin N.P., Sheshin G.A., The kinetics of phase separation in superfluid solutions of quantum liquids in the ultralow temperatures regions. Proc. of Int. Conf. "Physics in Ukraine, " Boqolyubov Inst. Teor. Phys., Kiev, 59-62 (1993).

ЛІБ ім. В. Стефаника
АН України

Ав 29.006

Омелаенко Николай Федорович

— Ответственный за выпуск — канд. физ.-мат. наук
Майданов В. А.

Подписано к печати 17 декабря - 1993 г.
Физ. п. л. 1, учетн. изд. л. 1, заказ № 84, тираж 100 экз.

Ротап rint ФТИНТ им. Б. И. Веркина АН Украины,
310164, Харьков-164, пр. Ленина, 47
