

Гигантская асимметрия процессов расслоения и гомогенизации твердых растворов ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$

В.Н. Григорьев, В.А. Майданов, А.А. Пензев, А.В. Полев,
С.П. Рубец, Э.Я. Рудаковский, А.С. Рыбалко, Е.В. Сырников

*Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины
пр. Ленина, 47, г. Харьков, 61103, Украина
E-mail: rybalko@ilt.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 18 мая 2004 г., после переработки 22 июня 2004 г.

С использованием прецизионной барометрии проведено сравнение кинетики процессов расслоения и гомогенизации твердых растворов ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$ с образцами трех типов — слабыми растворами ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ и ${}^4\text{He}$ в ${}^3\text{He}$ и концентрированными растворами ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$. Установлено, что во всех типах изученных растворов скорость начального этапа гомогенизации может превосходить скорость расслоения более чем в 500 раз. Заметная скорость фазового расслоения в концентрированных растворах, когда, согласно современным представлениям, примесные атомы в квантовых кристаллах должны быть локализованы, свидетельствует в таких условиях о новом неизвестном механизме массопереноса, а быстрая гомогенизация говорит о недиффузионном характере этого процесса.

З використанням прецизійної барометрії проведено порівняння кінетики процесів розшарування і гомогенізації твердих розчинів ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$ зі зразками трьох типів — слабкими розчинами ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ і ${}^4\text{He}$ в ${}^3\text{He}$ і концентрованими розчинами ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$. Установлено, що у всіх типах вивчених розчинів швидкість початкового етапу гомогенізації може перевершувати швидкість розшарування більш ніж у 500 разів. Помітна швидкість фазового розшарування в концентрованих розчинах, коли, відповідно до сучасних представлень, домішкові атоми в квантових кристалах повинні бути локалізовані, свідчить у таких умовах про новий невідомий механізм масопереносу, а швидка гомогенізація говорить про недифузійний характер цього процесу.

PACS: 67.80.Gb, 64.70.Kb.

1. Введение

В последнее время достигнут заметный прогресс в исследовании кинетики зародышеобразования и расслоения твердых растворов ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$. Разработка методики выращивания высококачественных кристаллических образцов и использование прецизионных низкотемпературных методов позволили получить надежные, хорошо воспроизводимые экспериментальные данные. В результате были зарегистрированы необычные особенности в переносе вещества при фазовом переходе и определен эффективный коэффициент массовой диффузии [1–3], а также экспериментально показано, что в твердых растворах ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$ фазовое расслоение может быть реализовано путем механизма гомогенного зародышеобразования [4–6].

Однако большинство экспериментов по кинетике расслаивающихся твердых растворов ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$ было посвящено изучению фазового перехода из однородного в расслоившееся состояние, когда в кристаллической матрице случайным образом располагаются включения другой фазы. Обратный переход из двухфазного в однородное состояние исследован лишь в работах [1,2] для слабых растворов ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$. Эксперимент проводился при быстром отогреве распавшегося раствора от одной и той же начальной температуры T_i до различных конечных температур T_f , что позволило впервые получить сведения о кинетике растворения твердых ОЦК включений ${}^3\text{He}$ в ГПУ матрице раствора (почти чистом ${}^4\text{He}$). Одним из наиболее интересных результатов было наблюдение аномально быстрого переноса вещества при растворении включений, причем процесс носил пороговый харак-

тер относительно разности между конечной и начальной температурами $\Delta T = T_f - T_i$ [7]. Обнаруженные эффекты качественно объяснены в рамках предложенной модели многоступенчатого процесса растворения включений ${}^3\text{He}$ [2], где существенным моментом было наличие недиффузионного баллистического переноса примесных атомов.

В этом плане представляло интерес исследование кинетики гомогенизации расслоившихся твердых растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ при больших концентрациях примесей в матрице, когда баллистический режим не может быть реализован. В этих условиях перенос вещества происходит при очень больших градиентах концентрации. В настоящей работе полученные ранее результаты для слабых растворов ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ (с концентрацией $\sim 2\%$ ${}^3\text{He}$) дополнены новыми экспериментами с концентрированными растворами (30–35 % ${}^3\text{He}$) и слабыми растворами ${}^4\text{He}$ в ${}^3\text{He}$ ($\sim 2\%$ ${}^4\text{He}$). Целью работы было сопоставление результатов, полученных для растворов различных концентраций, сравнение кинетики расслоения и гомогенизации, а также исследование возможного влияния пересыщения, структурного перехода ОЦК–ГПУ, концентрации зародышей новой фазы и других факторов.

2. Особенности экспериментальной методики

Эксперименты проводили в той же измерительной ячейке, описанной в работах [1,2]. Исследуе-

мый кристалл имел форму цилиндра диаметром 9 мм и высотой 1,5 мм, давление в образце измерялось *in situ* с помощью емкостного датчика давления. Ячейка находилась в постоянном тепловом контакте с плитой камеры растворения, температуру которой регистрировали термометром, основанном на кривой плавления ${}^3\text{He}$.

В работе исследовали образцы трех типов: А – слабые растворы ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$, В – слабые растворы ${}^4\text{He}$ в ${}^3\text{He}$ и С – концентрированные растворы ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ (табл. 1). Отметим, что, кроме исходной концентрации x_0 , исследованные образцы отличались кристаллографической структурой. Слабые растворы ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ в однородном состоянии имели ГПУ структуру, а новая фаза – ОЦК; для слабых растворов ${}^4\text{He}$ в ${}^3\text{He}$ реализовалась обратная ситуация. Что же касается концентрированных растворов, то в условиях эксперимента как исходный однородный раствор, так и обе расслоившиеся фазы имели ОЦК структуру. Рентгеновскими исследованиями [8,9] установлено, что исходная ОЦК структура растворов легко переохлаждается, и, как правило, переход к равновесной ГПУ структуре начинается только при отогреве. Последнее обстоятельство подтверждено и в наших экспериментах с концентрированными растворами.

Полученные образцы подвергались термической обработке путем многократного циклирования температуры от 100 мК до однородной области, что, как было показано ранее [2], приводит к повыше-

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов твердых растворов ${}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$.

Тип образца	Исходная концентрация, x_0	P_0 , бар	Кристаллическая структура			T_S , мК	τ_{f1} , 10^3 с	τ_{eff} , с
			В однородном состоянии	После расслоения				
				Матрица	Включения			
А	2,6% ${}^3\text{He}$	34,7	ГПУ	ГПУ	ОЦК	231	1,80–4,68	25–280
В	2,3% ${}^4\text{He}$	38,6	ОЦК	ОЦК	ГПУ	202	0,36–39,60	102–1900*
	2,65% ${}^4\text{He}$	34,8	ОЦК	ОЦК	ГПУ	202	0,36–36,00*	214–320*
	1,9% ${}^4\text{He}$	31,6	ОЦК	ОЦК	ГПУ	194	0,54–54,00*	40–380
	2,9% ${}^4\text{He}$	35,5	ОЦК	ОЦК	ГПУ	211	0,72–25,20	66**
	3,3% ${}^4\text{He}$	33,0	ОЦК	ОЦК	ГПУ	221	0,72–7,56	630*–860*
С	30,5% ${}^3\text{He}$	36,4	ОЦК	ОЦК	ОЦК	360	1,8–63,00	79–170
	34,2% ${}^3\text{He}$	30,3	ОЦК	ОЦК	ОЦК	380	2,16–17,28	63–176

Примечание: * – данные относятся к образцам, которые, по-видимому, имели неравновесную структуру; ** – исследовался только один образец

нию качества кристаллов и получению воспроизводимых результатов. В частности, найденные экспериментально значения температуры расслоения растворов T_s (табл. 1) в пределах ошибки соответствовали равновесной фазовой диаграмме, рассчитанной в [10]. В работе регистрировалось изменение давления ΔP со временем при понижении или повышении температуры, а соответствующие концентрации растворов определялись из диаграммы состояния [10]. Хорошо известно, что концентрация изотопов в твердом образце может заметно отличаться от концентрации исходной газовой смеси. Концентрация однородного раствора *in situ* x_0 уточнялась с помощью формулы Маллина [11], которая при охлаждении из однородного состояния до температуры T_i может быть записана в виде

$$x_0(1 - x_0) - x_i(1 - x_i) = 2,5\beta V_\mu (P_i - P_0), \quad (1)$$

где P_0 — равновесное давление раствора в однородном состоянии, x_i и P_i — равновесные значения концентрации и давления в расслоившемся растворе при температуре T_i , β и V_μ — сжимаемость и молярный объем образца. Для слабых растворов x_0 непосредственно рассчитывали по измеренной разности $\Delta P_i = P_i - P_0$ и значениям x_i из диаграммы состояния. В качестве β использованы известные значения сжимаемости чистого ${}^4\text{He}$ или ${}^3\text{He}$. В случае концентрированных растворов, когда значения β неизвестны, строили зависимость $x_i(1 - x_i)$ от ΔP_i , из которой значение $x_0(1 - x_0)$ находили экстраполяцией к $\Delta P_i = 0$. Пример такого графика для раствора 30,5 % ${}^3\text{He}$ представлен на рис. 1. Угол наклона прямой на рис. 1 позволяет найти β . Для данного раствора $\beta = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ бар}^{-1}$, что приблизительно на 40% меньше аддитивного значения для исходного раствора.

Эксперимент проводили следующим образом. Исследуемый образец из однородного состояния подвер-

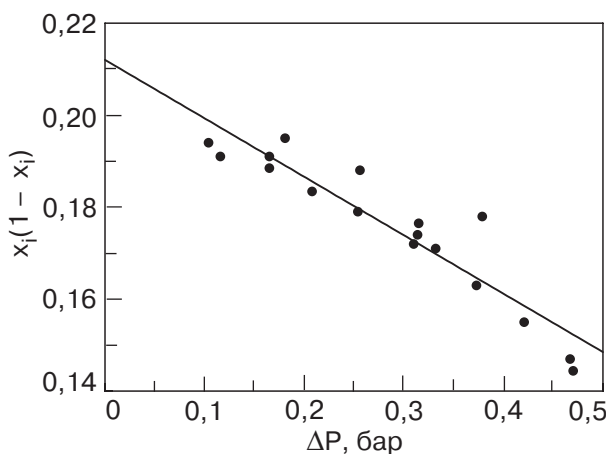


Рис. 1. Зависимость $x_i(1-x_i)$ от ΔP_i для раствора 30,5% ${}^3\text{He}$.

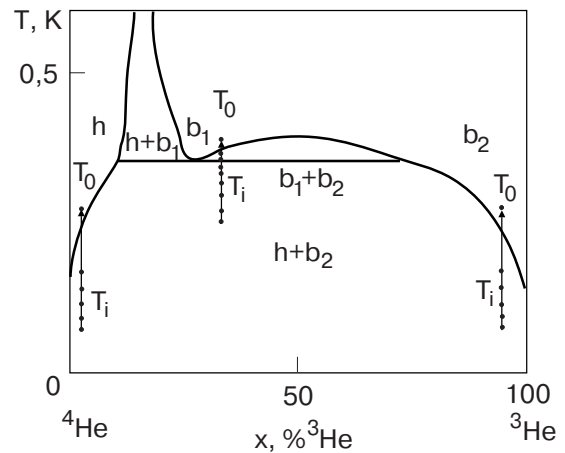


Рис. 2. Схема равновесной фазовой диаграммы твердых растворов ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$ при давлении 35,1 бар и линии отогрева образцов типа А, В, С от различных начальных температур T_i до конечной температуры T_f : h — ГПУ фаза; b_1 и b_2 — ОЦК фазы.

гался охлаждению в двухфазную область до некоторой температуры T_i , от которой затем проводили обратный отогрев в однородную область до температуры T_0 (схема эксперимента показана на рис. 2 на фоне фазовой диаграммы). Для каждого из трех типов образцов величина T_i варьировалась в заметных пределах, что позволяло изменять величину пересыщения матрицы $\Delta x = x_0 - x(T_i)$. В большинстве экспериментов значения T_i задавались путем ступенчатого охлаждения образца, при этом особую роль в условиях, когда $\Delta T_1 \geq T_{1+i}$ играла величина первой ступеньки охлаждения $\Delta T_1 = T_{s0} - T_{f1}$. Именно на этой стадии формируется определенная плотность зародышей новой фазы, которые, как обычно предполагается, при дальнейшем охлаждении лишь подвергаются диффузионному росту.

3. Результаты и их обсуждение

Типичные временные зависимости давления $P(t)$, отражающие кинетику фазового расслоения и последующей гомогенизации образцов типа А, В и С, приведены на рис. 3. Как видно на графиках, характер этих зависимостей во всех случаях одинаков, а различие носит лишь количественный характер.

Как неоднократно отмечалось ранее, временные зависимости изменения давления $\Delta P(t)$, отражающие изменение средней концентрации матрицы в процессе расслоения, при достаточно больших временах хорошо описываются экспоненциальной зависимостью вида

$$\Delta P(t) = P_f - P(t) = (P_f - P_i) \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

где P_i и P_f — начальное и конечное равновесное давление в образце, τ — характеристическая посто-

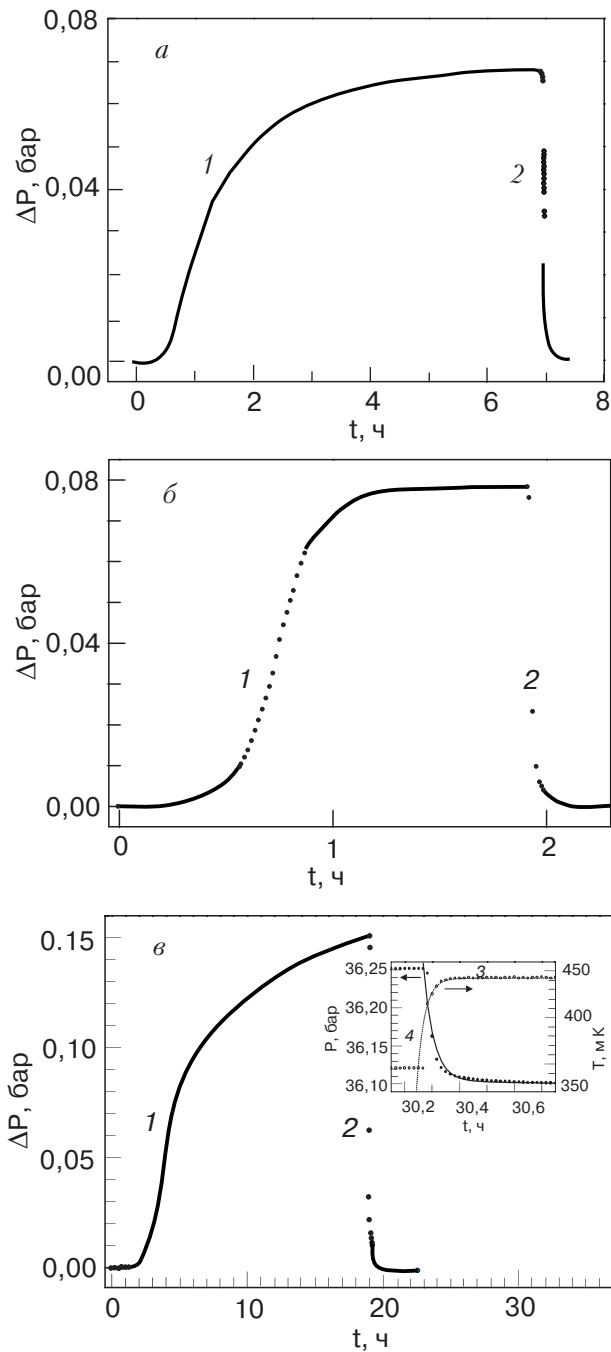


Рис. 3. Типичная кинетика изменения давления образца в процессе фазового расслоения (1) и последующей гомогенизации (2): образец А, $P_0 = 35,9867$ бар (а); образец В, $P_0 = 31,4368$ бар (б); образец С, $P_0 = 31,4368$ бар (в). На вставке представлены изменения температуры (3) и соответствующие изменения давления (4) для начального этапа отогрева образца. Сплошная линия 4 – расчет по формуле (3) при $h = 0,96$, $\tau_1 = 135$ с, $\tau_2 = 2217$ с; штриховая линия 3 соответствует аппроксимации изменения температуры функцией с одной экспонентой.

янная времени, определяющая кинетику процесса. В данных исследованиях кинетика расслоения для

образцов всех трех типов также хорошо описывалась зависимостью (2).

Процесс гомогенизации раствора в ряде случаев в пределах разброса экспериментальных точек удавалось описать с помощью двух характерных времен, соответствующих двум стадиям процесса – быстрой τ_1 и медленной τ_2 с весовым множителем h :

$$\Delta P = [h \exp(-t/\tau_1) + (1 - h) \exp(-t/\tau_2)](P_f - P_i), \quad (3)$$

как это показано на вставке на рис. 3,в, где представлена также зависимость изменения температуры и ее аппроксимация экспоненциальной функцией. В этом случае постоянная времени изменения температуры τ_T оказывается ~ 50 с и близкой к значению характерного времени быстрого этапа растворения τ_1 . Это означает, что скорость гомогенизации в этих условиях определяется скоростью изменения температуры. Если время изменения температуры заметно меньше 50 с (нижний предел τ_T ограничивается теплосоппротивлением Капицы на границе твердый гелий–стенка ячейки), то описание изменения давления при гомогенизации с помощью (3) оказывается невозможным: весовой множитель h получается при этом больше 1, что, по-видимому, можно рассматривать как следствие очень быстрого изменения ΔP . Что же касается второго этапа гомогенизации, определяемого временем τ_2 , то обработка показывает, что τ_2 , по крайней мере, на порядок больше τ_1 .

Описать изменение давления при гомогенизации зависимостью (3) и получить при этом время τ_1 , заметно превышающее постоянную времени установления температуры τ_T , оказалось возможным только для концентрированных образцов, полученных при очень малых пересыщениях. В слабых растворах ^3He в ^4He и ^4He в ^3He это не удавалось, по-видимому, из-за влияния ОЦК–ГПУ перехода. На рис. 4 представлена зависимость найденных в этом случае значений τ_1 от величины τ_{f1} – постоянной времени распада однородного раствора, характеризующей концентрацию зародышей новой фазы при переохлаждении до температуры T_{f1} , при которой был «приготовлен» данный образец.

На рис. 4 видно заметное увеличение τ_1 по мере роста τ_{f1} . Отметим, что рис. 4 отражает происходящие процессы сугубо качественно. Реальная зависимость $\tau_1(\tau_{f1})$ является, по-видимому, более сильной, поскольку минимальные τ_1 , наблюдающиеся при больших пересыщениях, являются заведомо завышенными из-за близости к характерным временам установления температуры (при больших пересыщениях τ_1 лишь на 20–30 % больше τ_T , а при самых малых – в 2–3 раза). В табл. 1 указан

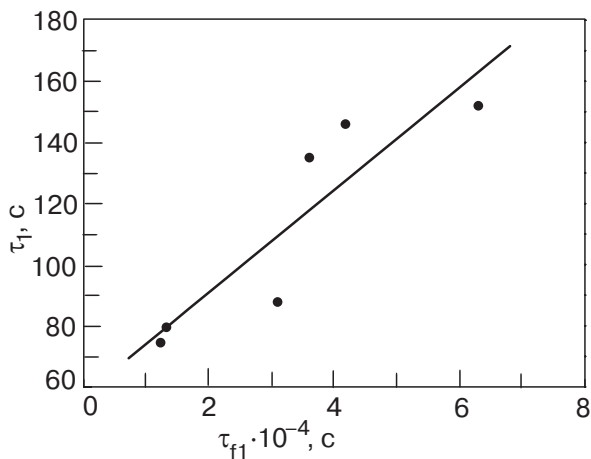


Рис. 4. Зависимость характеристического времени быстрой стадии гомогенизации в растворе с исходной концентрацией 30,5 % ${}^3\text{He}$ от величины τ_{f1} .

диапазон найденных значений τ_{f1} для образцов данной концентрации. При малых пересыщениях значения τ_{f1} для всех образцов быстро уменьшались по мере увеличения ΔT_1 , а при больших выходили на постоянное значение, как это наблюдалось в предыдущих экспериментах [3,6]. Для сравнения приведены также величины τ_{eff} , полученные при обработке временных зависимостей одной экспонентой и по порядку величины, характеризующие скорость гомогенизации.

В наших предыдущих исследованиях (см. [1–5]) была достаточно надежно установлена связь кинетики распада твердых растворов с диффузионными процессами, когда время распада обратно пропорционально квадрату расстояния между включениями новой фазы l . Поэтому заметный рост τ_1 можно связать с увеличением l , о чем свидетельствует возрастание τ_{f1} . Наличие двух экспонент в рассматриваемом случае представляется довольно естественным, хотя бы потому, что имеет место одновременно как проникновение ${}^4\text{He}$ в зародыш, так и обратный процесс переноса ${}^3\text{He}$. Возможно, что эти процессы имеют диффузионный характер. Более определенному заключению препятствуют несколько обстоятельств.

1. Отсутствие данных о размерах зародышей для образцов типа С.

2. Неизвестно решение соответствующей диффузионной задачи.

3. Полностью отсутствуют сведения о диффузионных процессах в концентрированных растворах ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$: неизвестны не только величины коэффициентов диффузии, но и совершенно непонятен механизм, который мог бы обеспечить перенос атомов.

Согласно существующим представлениям, перенос вещества при достаточно низких температурах может быть обеспечен только за счет процессов тун-

нелирования. В слабых растворах ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ туннелирование примесей приводит к явлению квантовой диффузии, которое (в однородных растворах) хорошо изучено как теоретически, так и экспериментально (см., например, [12,13]). В слабых растворах ${}^4\text{He}$ в ${}^3\text{He}$ когерентное движение примесей, характерное для квантовой диффузии, невозможно из-за отсутствия идеальной периодичности за счет случайной ориентации ядерных спинов ${}^3\text{He}$, и перенос вещества осуществляется путем хаотического туннелирования. Увеличение концентрации примесей в обоих случаях ослабляет диффузионное движение из-за срыва энергетических уровней примесей в разных узлах решетки под влиянием взаимодействия примесей друг с другом. Когда этот сбой уровней в соседних узлах решетки превышает ширину энергетической зоны примесных квазичастиц, туннелирование оказывается невозможным, и это должно привести к локализации примесей. Явление локализации обнаружено в ЯМР экспериментах с растворами ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$ [14]. И эксперимент, и теоретические оценки показывают, что критическая концентрация, при которой должна наступить локализация в растворах ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$, менее 10 %, и можно было бы ожидать, что в более концентрированных растворах вообще не должен происходить какой-либо массоперенос.

Однако эксперименты по распаду растворов ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$, в том числе и выполненные в настоящей работе, опровергают такую точку зрения и свидетельствуют о том, что и в концентрированных растворах наблюдается достаточно интенсивный массоперенос, по крайней мере, в условиях фазового расслоения. Более того, когда образцы, полученные при больших пересыщениях, гомогенизировались в условиях максимальных скоростей нагрева, время первого этапа растворения включений уменьшалось до неизмеримых в данных экспериментах величин, о чем свидетельствует невозможность обработки первичных временных зависимостей даже с помощью двух экспонент. По-видимому, этот факт можно рассматривать как свидетельство существования очень быстрого и, скорее всего, недиффузионного механизма переноса вещества. Следует подчеркнуть, что такая ситуация имеет место для всех исследованных растворов, включая и неконцентрированные. Можно считать, что во всех подобных случаях характерное время первой стадии гомогенизации распавшихся растворов составляет не более 20–30 с, а время распада может достигать 2–3 часов, т.е. характерное время гомогенизации может быть по меньшей мере в 300–400 раз меньше, чем соответствующее время распада. Еще большее различие наблюдалось для концентрированных растворов.

Формально процессы роста и растворения отличаются направлением градиента концентрации ∇x . Известно, что решение диффузионной задачи в сферической геометрии при постоянных внутреннем и внешнем радиусах симметрично относительно ∇x . Учет изменения радиуса включения приводит к некоторой асимметрии. Однако связанное с этим различие характерных времен не превышает порядка величины (см., например, [15]) и не может объяснить более сильную асимметрию, которая несомненно имеет в своей основе физическую природу, т.е. различие механизмов переноса вещества при росте включений и их растворении.

Отметим, что в пяти экспериментах (из более, чем 50) со слабыми растворами ${}^4\text{He}$ в ${}^3\text{He}$ были найдены значения τ_1 , превышающие 200 с. Образцы в этих экспериментах были получены при самых малых пересыщениях, и мы полагаем, что в них возникали зародыши с неравновесной структурой (ОЦК вместо ГПУ). Последующий отогрев таких образцов при гомогенизации, как уже упоминалось выше, стимулировал переход ОЦК–ГПУ, и этот процесс накладывался на процесс растворения включений.

4. Заключение

Таким образом, результаты настоящей работы показали, что в процессах расслоения и гомогенизации атомы гелия в кристалле сохраняют достаточно высокую подвижность, которая обеспечивает установление равновесного состояния даже при концентрации примесей, намного превышающей критическую, приводящую к самолокализации в однородных растворах. При этом рост зародышей новой фазы, по-видимому, осуществляется диффузионным путем, а растворение происходит намного быстрее, чем это следует из теоретических оценок для чисто диффузионных процессов. Характерной особенностью процесса растворения является наличие больших градиентов концентрации в начальный момент времени. В неидеальных растворах, какими являются растворы ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$, это приводит к появлению значительной движущей силы, вынуждающей атомы примеси совершать скачки в направлении градиента (см., например, [16]). Возможно, что такой эффект способен «разблокировать» самолокализацию примесей. Не исключено также, что при достаточно больших градиентах необходимо изменять и сами диффузионные уравнения. Выяснение этих вопросов, как и поиск других более неожиданных объяснений, например, возможной роли неравновесных вакансий в переносе вещества (возникновение таких вакансий при повышении температуры расслоившегося раствора предполагалось в [17, 18]), требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Авторы благодарят М.А. Стржемечного за полезные дискуссии.

Работа частично поддержана Государственным Фондом Украины по фундаментальным исследованиям (проект 02.07.00391, договор Ф7.286-2001).

1. А.Н. Ганьшин, В.А. Майданов, Н.Ф. Омелаенко, А.А. Пензев, Э.Я. Рудавский, А.С. Рыбалко, *ФНТ* **24**, 1117 (1998).
2. А.Н. Ганьшин, В.Н. Григорьев, В.А. Майданов, Н.Ф. Омелаенко, А.А. Пензев, Э.Я. Рудавский, А.С. Рыбалко, Ю.А. Токарь, *ФНТ* **25**, 796 (1999).
3. В.Н. Григорьев, В.А. Майданов, А.А. Пензев, Э.Я. Рудавский, А.С. Рыбалко, Е.В. Сырников, *ФНТ* **29**, 1165 (2003).
4. A. Penzev, A. Ganshin, V. Grigor'ev, V. Maidanov, E. Rudavskii, A. Rybalko, V. Slezov, and Ye. Syrnikov, *J. Low Temp. Phys.* **126** 151 (2002).
5. A. Smith, V. Maidanov, E. Rudavskii, V. Grigor'ev, V. Slezov, M. Poole, J. Saunders, and B. Cowan, *Phys. Rev.* **B67**, 245314 (2003).
6. В.Н. Григорьев, В.А. Майданов, А.А. Пензев, Э.Я. Рудавский, А.С. Рыбалко, В.В. Слезов, Е.В. Сырников, *ФНТ* **30**, 177 (2004).
7. A. Ganshin, V. Grigor'ev, V. Maidanov, N. Omelaenko, A. Penzev, E. Rudavskii, and A. Rybalko, *J. Low Temp. Phys.* **116** 349 (1999).
8. S.N. Ehrlich and R.O. Simmons, *J. Low Temp. Phys.* **68**, 125 (1987).
9. В.А. Фраас и Р.О. Симмонс, *Phys. Rev.* **B36**, 97 (1987).
10. D.O. Edwards and S. Balibar, *Phys. Rev.* **B39**, 4083 (1989).
11. W.J. Mullin, *Phys. Rev. Lett.* **20**, 254 (1968).
12. А. Андреев, *Progr. Low Temp. Phys.* **8**, 67 (1982).
13. В.Н. Григорьев, *ФНТ* **23**, 5 (1997).
14. В.А. Михеев, В.А. Майданов, Н.П. Михин, *ФНТ* **8**, 1000 (1982).
15. Б.Я. Любов, *Диффузионные процессы в неоднородных твердых средах*, Наука, Москва (1981).
16. Д. Маннинг, *Кинетика диффузии атомов в кристаллах*, Мир, Москва (1971).
17. А.Н. Ганьшин, В.Н. Григорьев, В.А. Майданов, А.А. Пензев, Э.Я. Рудавский, А.С. Рыбалко, Е.В. Сырников, *Письма ЖЭТФ* **73**, 329 (2001).
18. А.Н. Ганьшин, В.Н. Григорьев, В.А. Майданов, А.А. Пензев, Э.Я. Рудавский, А.С. Рыбалко, Е.В. Сырников, *ФНТ* **29**, 487 (2003).

**Giant asymmetry of separation and
homogenization processes
in solid $^3\text{He}-^4\text{He}$ solutions**

V.N. Grigor'ev, V.A. Maidanov, A.A. Penzev,
A.V. Polev, S.P. Rubets, E.Ya. Rudavskii,
A.S. Rybalko, and E.V. Syrnikov

The kinetics of the processes of separation and homogenization of solid $^3\text{He}-^4\text{He}$ solutions is compared by using the precision barometry. The experiments were made with the initial specimens of three types: weak $^3\text{He}-^4\text{He}$ and $^4\text{He}-^3\text{He}$ solu-

tions and concentrated $^3\text{He}-^4\text{He}$ ones. It is found that the homogenization rate at the initial stage may be more than 500 times higher than the rate of separation. This is the case for all types of the solutions studied. The appreciable rate of phase separation in the concentrated solutions where, according to the modern concepts, impurity atoms in quantum crystals should be localized, suggests that in such conditions there is a new unknown mechanism of mass-transfer, while the fast homogenization points to a nondiffusion nature of the process.