

НОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ КВАНТОВОЙ ДИФФУЗИИ He^3
В ТВЕРДОМ ГЕЛИИ

В. Н. Григорьев, Б. Н. Есельсон, В. А. Михеев

Проведены измерения коэффициента диффузии примесей He^3 в ГПУ фазе твердого гелия при повышенной плотности. Впервые наблюден переход вакансионной диффузии в квантовую диффузию примесей. Обнаружена сильная зависимость обменного интеграла J_{34} от плотности твердого гелия.

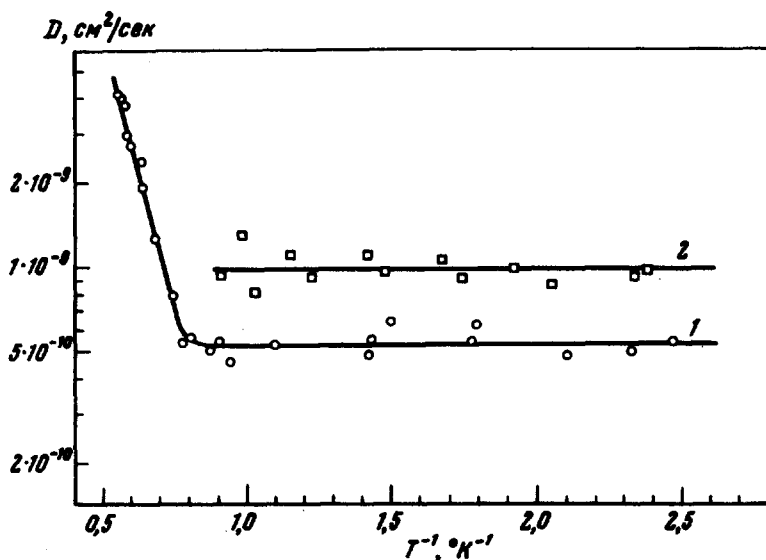
Недавно были обнаружены особенности температурной [1] и концентрационной [1, 2] зависимостей коэффициента диффузии He^3 в слабых твердых растворах $\text{He}^3 - \text{He}^4$, связанные с квантовым характером движения примесей в твердом гелии. Полученные экспериментальные данные подтвердили теоретические представления [3 — 6], согласно которым примеси и дефекты в квантовых кристаллах ведут себя как квазичастицы, почти свободно движущиеся по кристаллу.

Из-за трудности измерений указанные эксперименты [1, 2] были ограничены областью максимальных молярных объемов, непосредственно примыкающей к кривой плавления ГПУ фазы растворов. Поскольку дальнейшие всесторонние исследования явления квантовой диффузии представляют существенный интерес, нами были предприняты новые эксперименты с использованием усовершенствованной методики измерений, основные результаты которых излагаются в данной статье.

Речь идет прежде всего о выяснении влияния молярного объема на величину и характер квантовой диффузии. С этой целью проводились измерения коэффициента диффузии D He^3 в ряде растворов при различных значениях молярного объема. Из-за резкого уменьшения времени поперечной релаксации при увеличении давления в этих условиях практически невозможны измерения D методом обычного спинового эха, и поэтому был использован метод так называемого стимулированного эха [7, 8], в котором благодаря применению трех 90° -ных импульсов удается в значительной мере ослабить релаксационное затухание и существенно расширить диапазон измеряемых значений D . Отметим, что использование этой методики позволило получить данные с гораздо большей точностью благодаря лучшему отношению сигнал/шум. При этом полученные результаты несколько отличаются от приведенных в [1], где измерения проводились на пределе возможностей прежней методики. Измерения проводились с помощью спектрометра ЯМР, использованного в предыдущих работах [1, 9], который за счет введения нескольких дополнительных блоков позволил проводить измерения как в режиме обычного, так и стимулированного эха. Криогенная часть установки и методика измерений в основных чертах была такой же, как и в [1, 9].

Были исследованы растворы с содержанием He^3 0,25% и 0,75% при значениях молярного объема $V_1 = 20,7 \text{ см}^3/\text{моль}$ и $V_2 = 21,0 \text{ см}^3/\text{моль}$ в широкой области температур. Как видно из рисунка, где приведены результаты для второго из указанных растворов, на кривой 1 отчетливо проявляются две температурные области: область высоких темпера-

тур, соответствующая вакансионной диффузии, и область низких температур, в которой имеет место диффузия примесей. (Участок вакансионной диффузии отсутствует на кривой 2, поскольку при $V_2 = 21,0 \text{ см}^3/\text{моль}$ ГПУ фаза не существует при $T > 1,3^\circ\text{K}$).



Зависимость коэффициента диффузии He^3 от обратной температуры в твердом растворе $\text{He}^3 - \text{He}^4$, содержащем 0,75% He^3 :
 1. — $V = 20,7 \pm 0,05 \text{ см}^3/\text{моль}$, 2. — $V = 21,0 \pm 0,05 \text{ см}^3/\text{моль}$

При низких температурах в области квантовой диффузии, где D не зависит от температуры, прежде всего обращает на себя внимание существенное уменьшение коэффициента диффузии при сравнительно небольшом изменении молярного объема, что свидетельствует об ослаблении обменного взаимодействия атомов He^3 и He^4 при увеличении плотности. Воспользовавшись полученными экспериментальными данными, с помощью соотношения [5, 6]

$$D \sim J_{34} \sigma^2 / \hbar x,$$

где J_{34} — обменный интеграл, характеризующий частоту обмена $\text{He}^3 - \text{He}^4$, σ — межатомное расстояние, x — концентрация He^3 , найдем $J_{34}(V_2) / J_{34}(V_1) \approx 1,9$.

Полученный результат свидетельствует о крайне сильной зависимости J_{34} от плотности растворов, намного превосходящей аналогичную зависимость для чистого He^3 [10], где при таком же изменении молярного объема обменный интеграл изменяется приблизительно на 25%. Это интересное обстоятельство вероятно найдет объяснение в микроскопической теории поведения примесей He^3 в твердом гелии.

При высоких температурах наблюдается экспоненциальная зависимость $D = D_0 \exp(-\Delta/T)$ с энергией активации $\Delta = (8,9 \pm 1)^\circ\text{K}$ и $D_0 = (6 \pm 2) \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{сек}$ (кривая 1). Следует отметить, что найденное значение Δ заметно меньше, чем в ОЦК фазе He^3 [11] при том же мо-

лярном объеме (ГПУ фаза He^3 не существует при $V = 20,7 \text{ см}^3/\text{моль}$, а экстраполяция от больших плотностей дает еще более высокие значения Δ). Это обстоятельство может быть связано, с одной стороны, с различием вкладов в энергию образования вакансий членов, учитывающих работу расширения кристалла (из-за различия давлений, соответствующих одинаковым молярным объемам), а с другой — с тем, что в растворе расстояние He^3 до ближайших соседей за счет большей амплитуды нулевых колебаний оказывается несколько выше средних, что также приводит к уменьшению Δ .

Для раствора 0,25% температурная зависимость D имеет аналогичный характер, но область вакансионной диффузии оказывается гораздо более узкой, что не позволяет надежно определить характерные параметры Δ и D_0 .

Заметим также, что при низких температурах характерная для диффузии примесонов обратная пропорциональность D и x , найденная ранее вблизи кривой плавления [1, 2], как показывают данные эксперименты, имеет место и для $V = 20,7 \text{ см}^3/\text{моль}$.

В заключение стоит отметить, что представленная на рисунке кривая 1 впервые дает возможность проследить непрерывный переход от вакансионной диффузии к диффузии примесонов.

Пользуемся случаем поблагодарить Ю.Е.Шульмана за помощь в измерениях.

Физико-технический институт
низких температур
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
9 июля 1973 г.

Литература

- [1] В.Н.Григорьев, Б.Н.Есельсон, В.А.Михеев, Ю.Е.Шульман. Письма в ЖЭТФ, 17, 25, 1973.
- [2] M.G. Richards, S.Pope, A.Widom. Phys. Rev. Lett., 29, 708, 1972.
- [3] А.Ф.Андреев, И.М.Лифшиц. ЖЭТФ, 56, 2057, 1969.
- [4] R.A.Guyer, L.I.Zane. Phys. Rev., 188, 445, 1969.
- [5] В.А.Слюсарев, М.А.Стржеменный. Физика низких температур. Труды ФТИНТ АН УССР, вып. 19, 67, 1972, Харьков.
- [6] A. Widom, M.G.Richards. Phys. Rev., A6, 1196, 1972.
- [7] E.L.Nahn. Phys. Rev., 80, 580, 1950.
- [8] D.E.Woessner. J. Chem. Phys., 34, 2057, 1961.
- [9] В.Н.Григорьев, Б.Н.Есельсон, В.А.Михеев. ЖЭТФ, 64, 607, 1973.
- [10] R.A.Guyer, R.C.Richardson, L.I.Zane. Rev. Mod. Phys., 43, 532, 1971.
- [11] H.A.Reich. Phys. Rev., 129, 630, 1963.