

КВАНТОВАЯ ДИФфуЗИЯ ПРИМЕСЕЙ He^3 В ТВЕРДОМ He^4

В. Н. Григорьев, Б. Н. Есельсон, В. А. Михеев,
Ю. Е. Шульман

Целью данной работы явилось обнаружение и исследование особенностей поведения примесей He^3 , связанных с квантовой природой твердого гелия.

В ряде теоретических работ [1–3] было показано, что примеси в квантовых кристаллах, благодаря возможности туннелирования, перестают быть локализованными и превращаются в квазичастицы ("примесоны"), движение которых в идеальном кристалле ограничивается лишь столкновениями их друг с другом или с фононами. Наиболее отчетливо эти особенности проявляются в поведении коэффициента диффузии (D) примесей, величина и зависимость от концентрации и температуры которого определяется рассеянием таких квазичастиц друг на друге и на фононах.

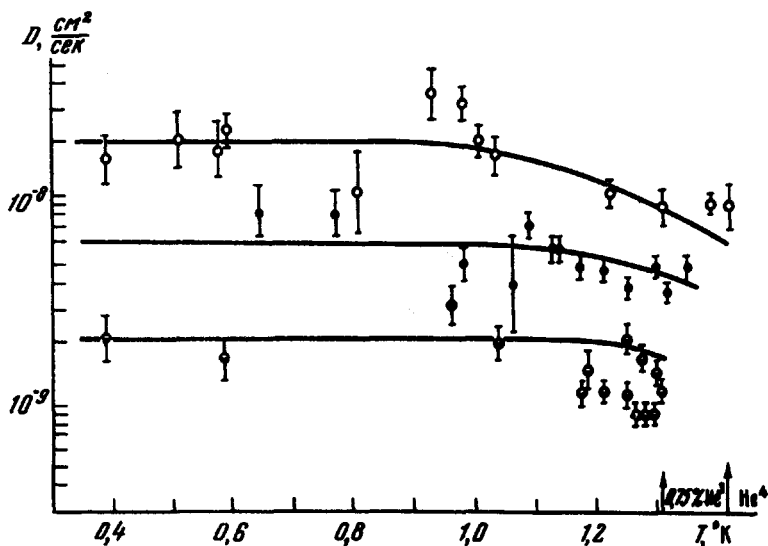


Рис. 1. Зависимость коэффициента диффузии He^3 от температуры для различных концентраций He^3 : Φ — 0,092%; Ψ — 0,25%; Ω — 0,75%. Сплошные кривые соответствуют уравнению $D^{-1} = 6,25 \cdot 10^{10}x + 4,6 \cdot 10^6 T^9$. Стрелки на оси T указывают границы перехода ОЦК — ГПУ

Экспериментальные исследования коэффициента диффузии проводились методом спигового эха с помощью ЯМР установки, описанной ранее [4, 5]. Исследовались твердые растворы, содержащие 0,75; 0,25 и 0,092% He^3 , при значении молярного объема $21,0 \pm 0,05 \text{ см}^3/\text{моль}$ до температуры $0,4^\circ\text{K}$.

Результаты приведены на рис. 1, где представлена температурная зависимость D для различных концентраций (x) He^3 в ГПУ фазе твердого гелия. Отметим ряд особенностей полученных результатов.

Прежде всего, в отличие от данных для высоких температур [5], при $T < 1,1^\circ\text{K}$ коэффициент диффузии перестает зависеть от температуры (область "плато"), что характерно для процессов, когда определяющую роль начинают играть процессы взаимного столкновения примесей. Кроме того, если в концентрированных растворах в области "плато" D не зависит от концентрации [6], то в данном случае наблюдается явное возрастание D при уменьшении содержания He^3 . Это обстоятельство в соответствии с [3] свидетельствует о существенной роли взаимодействия примесей друг с другом.

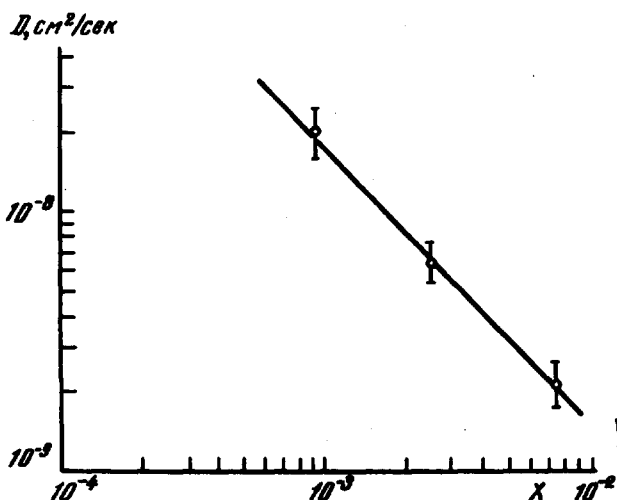


Рис. 2. Зависимость коэффициента диффузии He^3 от концентрации He^3 в твердом He^4 . $V = 21,0 \pm 0,05 \text{ см}^3/\text{моль}$

Используя для описания примесей газовое приближение, можно записать $D \sim v^2 \tau$, где v – средняя скорость квазичастиц, а τ – время релаксации. Если считать вклады за счет процессов столкновений примесей друг с другом и с фонами независимыми и воспользоваться правилом Маттиссена $\tau^{-1} = \tau_{\text{пр}}^{-1} + \tau_{\text{фон}}^{-1}$, где $\tau_{\text{пр}}^{-1} \sim J_{34} x / \hbar$ – время релаксации за счет взаимного рассеяния примесей [3], $\tau_{\text{фон}}^{-1} \sim (\Theta / \hbar) (T / \Theta)^9$ – фоновое время релаксации [1], то получим удобную интерполяционную формулу

$$D^{-1} \sim \frac{\hbar^2}{J_{34}^2 a^2} \left[\frac{J_{34} x}{\hbar} + \frac{\Theta}{\hbar} \left(\frac{T}{\Theta} \right)^9 \right]. \quad (1)$$

Здесь x – концентрация He^3 , Θ – температура Дебая, a – величина порядка расстояния между ближайшими соседями. В области "плато" первый из упомянутых процессов является доминирующим, и поэтому уравнение (1) можно представить в виде

$$D \sim \frac{J_{34} a^2}{\hbar x}. \quad (2)$$

На рис. 2 приведена концентрационная зависимость значений D , полученных при усреднении экспериментальных данных для $T < 1,2^\circ\text{K}$.

Прямая на графике соответствует уравнению $D = 1,6 \cdot 10^{-11} x^{-1} \text{см}^2 \text{сек}^{-1}$ ¹⁾, что хорошо согласуется с формулой (2). Найденное отсюда значение J_{34} составляет по порядку величины 10^{-7} °К. Обращает на себя внимание также заметное уменьшение D с повышением температуры выше 1,1°К, имеющее место для всех исследованных растворов. Это явление связано, по-видимому, с возрастанием в этой области роли процессов рассеяния примесей на фононах (см. формулу (1)). С целью подтверждения этого предположения мы произвели обработку всех экспериментальных данных по формуле (1), причем показатель степени (n) температурного слагаемого предполагался заранее неизвестным. Используя два участка каждой кривой ($T < 1,1^\circ\text{K}$ и $T > 1,1^\circ\text{K}$), можно получить два независимых значения для обменного интеграла J_{34} (ширины энергетической зоны квазичастиц). Обработка приводит к следующим результатам: $n = 9 \pm 2$, а значения ширины зоны, вычисленные двумя независимыми способами, оказались совпадающими по порядку величины и равными 10^{-7} °К. Заметим, что найденные величины обменного интеграла J_{34} , приблизительно на три порядка меньше соответствующих значений J_{33} для чистого He^3 (при том же молярном объеме).

Таким образом, полученные данные о концентрационной зависимости D и совпадающие по порядку величины значения J_{34} , вычисленные для двух различных процессов рассеяния квазичастиц, являются экспериментальным подтверждением квантового характера диффузии примесей He^3 в ГПУ фазе твердого гелия.

Предварительные результаты измерений D в ОЦК фазе подтверждают полученные ранее [5] данные о сильном различии D в ОЦК и ГПУ фазах. Большая величина классической диффузии в ОЦК фазе сильно маскирует квантовые эффекты, тем не менее, обнаруженное небольшое возрастание D при уменьшении концентрации He^3 , по-видимому, также можно связать с осуществлением квантовой диффузии. Экспериментальные исследования этих явлений продолжаются.

Авторы благодарны В.А.Слюсареву и М.А.Стржемечному за плодотворные дискуссии.

Физико-технический институт
низких температур
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
29 ноября 1972 г.

Литература

- [1] А.Ф.Андреев, И.М.Лифшиц, ЖЭТФ, 56, 2057, 1969.
- [2] R.A.Guyer, L.I.Zane. Phys. Rev., 188, 445, 1969.
- [3] В.А.Слюсарев, М.А.Стржемечный. Сб. Физика низких температур, вып. 19, 39, 1972 (Харьков).

¹⁾ После завершения настоящих исследований появилась работа [7], в которой авторы также наблюдали зависимость $D = \text{const} / x$ при температуре $T = 0,53^\circ\text{K}$ с $\text{const} = (1,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-11} \text{см}^2 / \text{сек}$.

- [4] В.Н. Григорьев, Б.А. Гулин, Б.Н. Есельсон, В.Д. Корепанов, В.А. Михеев. Сб. Физика конденсированного состояния, выпуск 10, 166, 1970. '
- [5] В.Н. Григорьев, Б.Н. Есельсон, В.А. Михеев. ЖЭТФ, 64, вып. 2, 1973.
- [6] D.S. Miyoshi, R.M. Cotts, A.S. Greenberg, R.C. Richardson. Phys. Rev., A2, 870, 1970.
- [7] M.G. Richards, J. Pope, A. Widom. Phys. Rev. Lett., 29, 708, 1972. '
-