

Письма в ЖЭТФ, том 18, вып. 11, стр. 689 – 692

5 декабря 1973 г.

**ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СПЕКТРЕ КВАЗИЧАСТИЦ He^3
В СВЕРХТЕКУЧИХ РАСТВОРАХ He^3-He^4**

В. И. Соболев, Б. Н. Есельсон

На основании анализа данных о температурной зависимости плотности нормальной компоненты делается заключение о возможности существования новых особенностей энергетического спектра квазичастиц He^3 в сверхтекучих растворах He^3-He^4 .

Как известно, в последнее время были предприняты попытки получения сведений об энергетическом спектре элементарных возбуждений в растворах He^3-He^4 [1 – 3]. В этих работах предполагалось, что закон дисперсии для квазичастиц He^3 представляет собой квадратичную функ-

цию импульса p с минимумом при $p = 0$ (как это следовало из [4, 5]) и было найдено, что параметры ротоннов в растворах существенно зависят от концентрации.

Однако, в проведенных недавно прямых экспериментах [6 – 8] установлено, что эти параметры практически не меняются при увеличении концентрации He^3 вплоть до $x = 0,26$ (x – весовая концентрация).

Отсюда следует, что представления об энергетическом спектре, использованные в работах [1 – 3], требуют пересмотра.

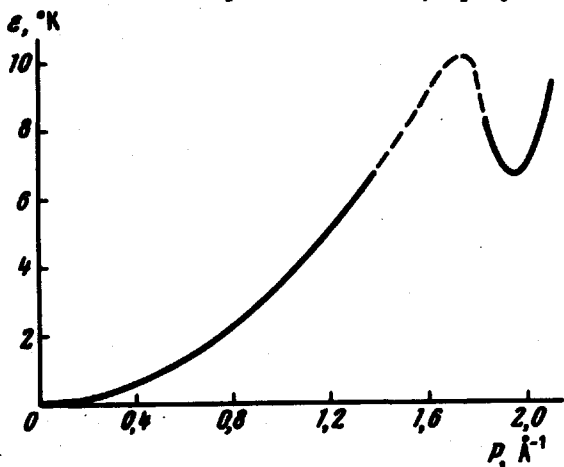


Рис 1. Дисперсионная кривая квазичастиц He^3 в растворе $\text{He}^3\text{--He}^4$

Новый подход к этой проблеме был указан Л.П.Питаевским, предложившим в качестве зависимости $\epsilon(p)$ (ϵ – энергия квазичастицы) использовать функцию (рис. 1), которая при малых импульсах по-прежнему является параболой с вершиной при $p = 0$ и, кроме того, имеет минимум (при $p \neq 0$), аналогичный ротонному для чистого He^4 .

В настоящей работе, путем соответствующей обработки экспериментальных данных [3] исследуется возможность существования указанного закона дисперсии. В частности, из него следует формула для примесной части относительной плотности нормальной компоненты κ_i :

$$\kappa_i = x \left(\frac{m_i}{m_3} + \frac{p_i^2 f}{3kT} \right) (1 + f)^{-1}, \quad (1)$$

где m_3 – масса атома He^3 , p_i – импульс, соответствующий минимуму, k – постоянная Больцмана, T – температура, m_i – эффективная масса квазичастиц He^3 с малыми импульсами, связанная с процессом макроскопического движения газа элементарных возбуждений. Зависимость m_i от концентрации (при $x \leq 0,256$) может быть выражена эмпирической формулой [3]:

$$m_i = m^* \left[1 + \left(\frac{m^*}{m_3} - 1 \right) x \right]^{-1} \quad (2)$$

m^* – значение эффективной массы при $x \rightarrow 0$,

$$f = 2p_i^2 (\mu_i)^{1/2} (m^*)^{-3/2} (kT)^{-1} \exp\left(-\Delta_i / T\right) \quad (3)$$

Δ_i и μ_i – соответственно энергия и эффективная масса квазичастицы He^3 с импульсом p_i .

Поскольку в растворах параметры ротоннов не зависят от концентрации [6 – 8], то естественно предположить, что имеется некоторая невозмущенная He^3 область He^4 с относительной плотностью нормальной компоненты κ_0 такой же, как и в чистом He^4 . Будем также считать, что He^3 и возмущенная им часть He^4 полностью входят в нормальную компоненту, являясь ее примесной частью.

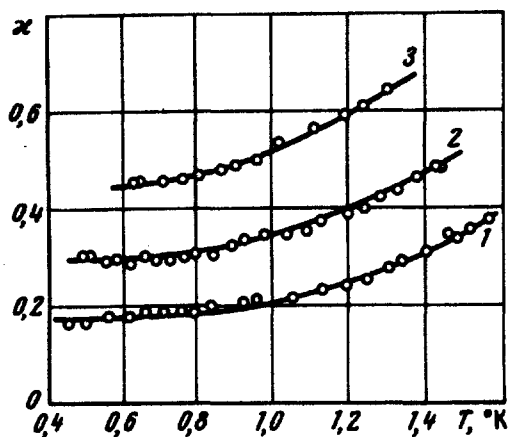


Рис. 2. Зависимость κ от температуры: \circ – экспериментальные данные [3], сплошная линия – расчет по формулам (1), (3) и (6). Кривые 1, 2, 3 соответствуют весовым концентрациям He^3 0,085, 0,156, 0,256

При сформулированных выше предположениях, массу нормальной компоненты раствора можно представить в виде

$$\kappa \rho V = \kappa_0 \rho_0 V_0 + \kappa_i \rho V, \quad (4)$$

где κ – относительная плотность нормальной компоненты раствора, ρ и ρ_0 – соответственно плотности раствора и чистого He^4 , V – объем раствора, V_0 – объем невозмущенной He^3 части He^4 в растворе. Учитывая, что:

$$\rho V = \rho_0 V_0 + \kappa_i \rho V \quad (5)$$

получим

$$\kappa = \kappa_i + \kappa_0 - \kappa_i \kappa_0. \quad (6)$$

В настоящей работе соотношение (6) использовалось для обработки экспериментальных значений κ [3] методом наименьших квадратов.

На рис. 2 приведены кривые, построенные по формулам (1), (3) и (6) и данные работы [3]. Наблюдается хорошее согласие между расчетными значениями и экспериментальными данными, причем среднеквадратичный разброс составляет 0,8% при точности измерений κ [3] 1,1 – 1,2%.

Это свидетельствует о возможности реализации в растворах закона дисперсии, предложенного Л.П. Питаевским. При этом важно было установить верхнюю температурную границу применимости описанного рассмотрения. С этой целью при вычислениях последовательно отбрасывались точки, соответствующие высоким температурам, до тех пор, пока параметры не переставали изменяться. Максимальная температура, при

которой это имело место, составляла $\sim 0,8 T_\lambda$ (T_λ температура λ -перехода в растворе).

Было установлено, что параметры спектра практически не зависят от концентрации вплоть до $x = 0,256$.

Поэтому наряду с вычислениями для каждой концентрации в отдельности, была проведена обработка одновременно для трех концентраций: 0,085, 0,156, 0,256. В результате были найдены параметры энергетического спектра квазичастиц He^3 : $\Delta_i = 6,6^\circ\text{K}$; $\rho_i = 1,95\text{\AA}^{-1}$; $\mu_i = 0,07 m_3$; $m^* = 2,3 m_3$.

Минимум на дисперсионной кривой, по-видимому соответствует связанному состоянию ротон-примесь с энергией связи $\sim 2^\circ\text{K}$ (назовем эту квазичастицу i -ротонем). Одно из возможных объяснений такого связанного состояния заключается в том, что в растворах кроме обычных ротонов, существующих в невозмущенной области He^4 , имеются также ротоны в возмущенной He^3 области с меньшей характерной энергией, которые, вследствие этого, локализуются вблизи He^3 .

В заключение необходимо отметить, что вопрос о характере энергетического спектра находится в стадии развития, и рассмотренная возможность может способствовать его решению.

Пользуемся случаем поблагодарить Л.П.Питаевского за плодотворное обсуждение результатов изложенных в этой статье.

Физико-технический институт
низких температур
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
30 октября 1973 г.

Литература

- [1] Н.Е.Дюмин, Б.Н.Есельсон, Э.Я.Рудаковский, И.А.Сербин. ЖЭТФ, 56, 747, 1969.
- [2] Б.Н.Есельсон, Ю.З.Ковдря, В.Б.Шикин. ЖЭТФ, 59, 64, 1970.
- [3] В.И.Соболев, Б.Н.Есельсон. ЖЭТФ, 60, 240, 1971.
- [4] И.Я.Померанчук. ЖЭТФ, 19, 42, 1949.
- [5] Н.Г.Березняк, Б.Н.Есельсон. ДАН СССР, 111, 322, 1956; ЖЭТФ, 31, 902, 1956.
- [6] C.M.Surko, R.E.Slusher. Phys. Rev. Lett., 30, 1111, 1973.
- [7] R.L.Woerner, D.A.Rockwell, T.J.Greytak. Phys. Rev. Lett., 30, 1114, 1973.
- [8] J.M.Rowe, D.L.Price, G.E.Ostrowski. Phys. Rev. Lett., 31, 510, 1973.