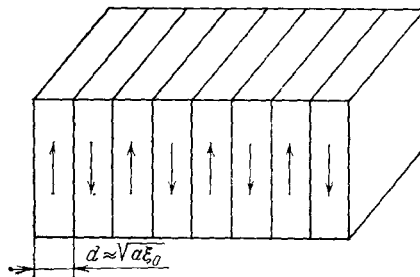


вания. Первый из них, более популярный, основан на использовании функционала Гинзбурга — Ландау, и в рамках этого описания учитывалось электромагнитное взаимодействие сверхпроводящих электронов и локализованных моментов (ЛМ). Во втором подходе в рамках микроскопической теории БКШ учитывалось обменное взаимодействие электронов и ЛМ. Между тем для описания реальных соединений было необходимо учесть оба этих механизма взаимодействия в рамках микроскопической теории, и при расчете должна была быть принята во внимание также и магнитная анизотропия. Такой подход был развит в работах ^{4,5} и ряде других работ этих же авторов, находящихся в печати.

Теоретический анализ показывает, что в реальных соединениях свойства фазы сосуществования определяются в основном обменным механизмом взаимодействия

Магнитная структура доменного типа в фазе сосуществования ферромагнитных сверхпроводников типа ErRh_4B_4 и HoMo_6S_8 (теоретическое предсказание).

Стрелками показано направление намагниченности внутри доменов. Толщина доменов d мала по сравнению со сверхпроводящей корреляционной длиной ξ_0 , но велика по сравнению с магнитной корреляционной длиной a .



электронов и ЛМ. Магнитное упорядочение в фазе сосуществования должно иметь вид одномерной поперечной доменной структуры (см. рисунок) с толщиной доменов $d \approx \sqrt{a\xi_0}$, где a — магнитная жесткость порядка атомной длины и ξ_0 — сверхпроводящая корреляционная длина. В грязных сверхпроводниках магнитная структура доменного типа действует на сверхпроводимость аналогично магнитным примесям в режиме со щелью ⁶. В чистых кристаллах в области сильных обменных полей (по крайней мере вблизи температуры T_{C2}) сверхпроводимость в фазе с доменной магнитной структурой оказывается бесщелевой, причем щель отсутствует для тех направлений скорости электронов на поверхности Ферми, которые примерно перпендикулярны волновому вектору доменной структуры.

Полученные теоретические результаты объясняют существующие сейчас экспериментальные данные для ErRh_4B_4 ⁷ и HoMo_6S_8 ⁸, включая особенности рассеяния нейтронов в фазе сосуществования и переход из нее в нормальную ферромагнитную фазу. Однако основной вывод теории о доменном типе магнитной структуры в фазе сосуществования еще не подтвержден экспериментально из-за отсутствия совершенных монокристаллов (пока получены только поликристаллические образцы HoMo_6S_8 и два монокристалла ErRh_4B_4 , которые, по-видимому, неоднородны по параметрам T_M и T_{C2} из-за внутренних напряжений).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург В. Л. — ЖЭТФ, 1956, т. 31, с. 202.
2. Maple M. B. — In: Proc. ICM-82. — Kyoto, 1982.
3. Anderson P. W., Suhl H. — Phys. Rev., 1959, v. 116, p. 898.
4. Bulaevskii L. N., Rusinov A. I., Kulic M. L. — Sol. State. Comm., 1979, v. 30, p. 59; J. Low Temp. Phys., 1980, v. 39, p. 256.
5. Bulaevskii L. N., Buzdin A. I., Panjukov S. V. — Sol. State. Comm., 1982, v. 43, p. 135; ЖЭТФ, 1982, т. 83, с. 768.
6. Абрикосов А. А., Горьков Л. П. — ЖЭТФ, 1960, т. 39, с. 1781.
7. Sinha S. K., Mook H. A., Hinks D. G., Crabtree G. W. — Phys. Rev. Lett., 1982, v. 48, p. 950.
8. Lynn J. W., Shirane G., Thomlinson W., Shelton R. N., Monoton D. E. — Phys. Rev. Ser., 1981, v. 24, p. 3817.

533.132 (048)

В. И. Панов, А. А. Собянин, В. А. Хвостиков. Экспериментальное исследование сверхтекучести гелия-II вблизи λ -точки. В докладе представлены результаты прецизионных измерений вблизи λ -перехода температурной зависимости плотности и коэффициента теплового расширения жидкого ^4He , содержащегося в большом объеме ¹, а также разности плотностей гелия, содержащегося в большом объеме и в узкой плоско-параллельной щели ².

Актуальность таких исследований определяется большим вниманием, которое проявляется в настоящее время к вопросу о характере аномалий термодинамических свойств веществ вблизи точек фазовых переходов второго рода (критические эффекты) и о влиянии на эти аномалии различных факторов, в том числе — ограниченности размеров системы в одном или нескольких направлениях (критические размерные эффекты). Кроме того, непосредственной задачей исследования являлась количественная проверка предсказаний феноменологической Ψ -теории сверхтекучести $^{3-9}$ ($\Psi = \eta e^{i\varphi}$ — макроскопическая волновая функция, играющая роль параметра порядка) о величине сдвига λ -точки в условиях ограниченной геометрии и определение фигурирующего в этой теории 5,6 параметра M , в зависимости от значения которого фазовый переход гелия в щели должен быть фазовым переходом первого ($M > 1$) или второго рода ($M < 1$).

В первых экспериментах 1 на основании детального измерения температурной зависимости диэлектрической проницаемости чистого жидкого ^4He с высокой точностью вычислены значения молярного объема V , коэффициента теплового расширения при давлении насыщенных паров β_s и изобарического коэффициента теплового расширения β_p , а также исследован вид расходимости этих коэффициентов вблизи температуры λ -перехода. Измерения проводились с помощью сверхпроводящего СВЧ резонатора, который размещался в камере с чистым жидким ^4He . При измерениях относительные вариации температуры регистрировались с точностью $\approx 1 \cdot 10^{-6}\text{K}$. Вариации диэлектрической проницаемости жидкого гелия измерялись с точностью $\sim 10^{-9}$. Скорость изменения температуры при определении зависимости $\beta_s(T)$ составляла $\sim 1 \cdot 10^{-4}\text{K/мин}$. Результаты измерения молярного объема показали, что полученные значения V для ^4He хорошо соответствуют прямым dilatометрическим измерениям 7 лишь в области $T \lesssim T_\lambda$. При $T > T_\lambda$ имеется значительное ($\sim 0,3\%$) расхождение между результатами 7 и настоящими измерениями.

Коэффициент теплового расширения β_s вблизи λ -перехода с высокой точностью описывается логарифмической зависимостью:

$$10^8 \beta_s = (8,21 \pm 0,02) \ln |\tau| + (47,75 \pm 0,15), \quad T > T_\lambda,$$

$$10^8 \beta_s = (7,98 \pm 0,02) \ln |\tau| + (11,83 \pm 0,12), \quad T < T_\lambda,$$

где

$$\tau = \frac{T - T_\lambda}{T_\lambda}.$$

Общий вид расходимости $\beta_s(T)$ в широком диапазоне температур показан на рис. 1.

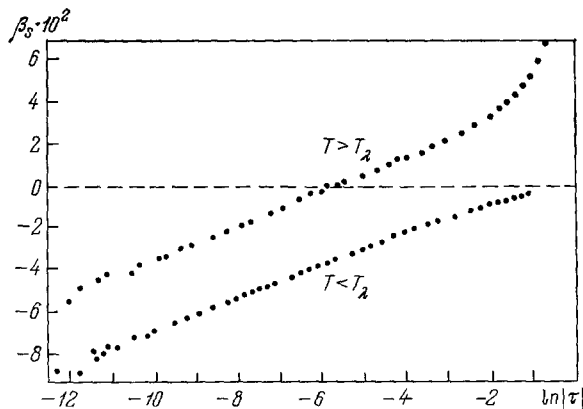


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента теплового расширения ^4He при давлении насыщенных паров.

* При изучении характера расходимости вблизи T_λ коэффициента β_p было проведено также сравнение экспериментальных результатов со степенной зависимостью $\beta_p = (A/\alpha) |\tau|^{-\alpha} + B$ и вычислены критические индексы α , α' и коэффициенты A , A' и B , B' . Из анализа экспериментальных данных следует, что с достоверностью 0,95 эти величины равны

$$T > T_\lambda, \quad \alpha = -0,006 \pm 0,0025, \quad A = (7,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-3}, \quad B = 1,35 \pm 0,5,$$

$$T < T_\lambda, \quad \alpha' = 0,000 \pm 0,0025, \quad A' = (7,95 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}, \quad B' = 4,86 \pm 0,3.$$

Полученные значения критических индексов с большой вероятностью указывают на то, что расходимость величин β_p и C_p для ^4He в области λ -перехода носит логарифмический характер. Этот результат отличается от результатов работ 8,9 (согласно которым $\alpha = -0,026$), но согласуется с недавними новыми измерениями теплоемкости 10 , из которых следует, что для ^4He индекс α близок к нулю или даже может иметь очень малое положительное значение.

В экспериментах 2 проведено исследование сдвига температуры λ -перехода $\Delta T_\lambda = T_\lambda - T_\lambda(d)$ в тонких щелях с ширинами $d_1 = 2,85 \cdot 10^{-5}$ см, $d_2 = 3,60 \cdot 10^{-5}$ см, $d_3 = 5,90 \cdot 10^{-5}$ см с целью сопоставления с теоретической формулой 5,6

$$\Delta T_\lambda = 2,53 \cdot 10^{-11} \left(\frac{M+3}{3} \right)^{3/4} d^{-3/2} \text{ К}, \quad (1)$$

(где d измерено в см) и определения содержащегося в теории 5,6 свободного параметра M .

Исследование сдвига температуры λ -перехода производилось по наблюдению изломов на кривой зависимости от температуры разности плотности $\Delta \rho(T)$ жидкого ^4He в щели $\rho_d(T)$ и в объеме $\rho_\infty(T)$. Для этого измерялась температурная зависимость разности диэлектрической проницаемости $\Delta \varepsilon(T)$ гелия в широкой ($d = 5 \cdot 10^{-3}$ см) и узких щелях, изготовленных в виде плоских электрических конденсаторов с надежно контролируемой параллельностью пластин.

Измеренные значения сдвига температуры λ -точки для каждой щели таковы: $\Delta T_\lambda(d_1) = 0,62 \cdot 10^{-4}$ К, $\Delta T_\lambda(d_2) = 1,33 \cdot 10^{-4}$ К, $\Delta T_\lambda(d_3) = 1,97 \cdot 10^{-4}$ К. Как видно из рис. 2, все три экспериментальные точки ложатся на одну и ту же прямую, отвечающую степенной зависимости $\Delta T_\lambda(d) \sim d^{-n}$ с показателем $n = 1,58 \pm 0,09$, практически совпадающим с теоретическим значением $n = 1,5$. Если принять, что $n = 1,5$, то среднее значение M , вычисленное по этим данным, составляет $0,6 \pm 0,3$.

В заключение подчеркнем, что в ходе настоящих экспериментов при λ -переходе гелия в узких щелях с точностью $\Delta \rho/\rho$, лучшей, чем 10^{-7} , не наблюдалось скачка плотности или каких-либо гистерезисных эффектов. Это свидетельствует о том, что λ -переход гелия в щели остается фазовым переходом II рода, и, следовательно, параметр M , во всяком случае, должен быть меньше 1.

Заметим, наконец, что, как указано в 6 и Л. П. Питаевским (не опубликовано), переход в сверхтекучее состояние гелия в щелях может наступить при более низкой температуре, чем та, при которой, как описано выше, наблюдаются аномалии термодинамических величин. Для экспериментального решения этого вопроса следовало бы провести дополнительные измерения в тех же самых щелях теплопроводности или скорости распространения четвертого звука.

Материалы доклада опубликованы: ЖЭТФ, 1982, т. 83, с. 183; Письма ЖЭТФ, 1982, т. 35, с. 329.

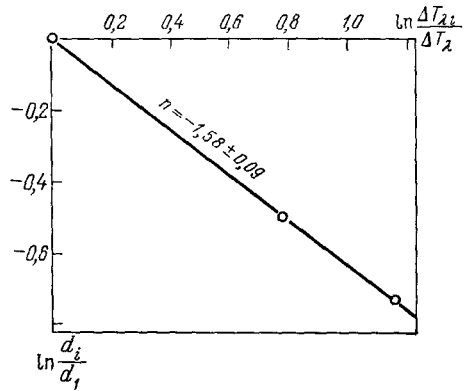


Рис. 2. Зависимость сдвига температуры λ -точки от толщины щели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панов В. И., Хвостиков В. А.— ЖЭТФ, 1982, т. 83, с. 183.
2. Панов В. И., Собянин А. А.— Письма ЖЭТФ, 1982, т. 35, с. 329.
3. Гинзбург В. Л., Питаевский Л. П.— ЖЭТФ, 1958, т. 34, с. 1240.
4. Мамаладзе Ю. Г.— ЖЭТФ, 1967, т. 52, с. 729.
5. Гинзбург В. Л., Собянин А. А.— УФН, 1976, т. 120, т. 153.
6. Ginzburg V. L., Sobyanin A. A.— J. Low Temp. Phys., 1982, v. 49, p. 507.
7. Kerr E. C., Taylor R. D.— Ann of Phys., 1964, v. 26, p. 292.
8. Ahlers G.— Phys. Rev. Ser. A, 1971, v. 3, p. 696; 1973, v. 8, p. 530.
9. Mueller K. H., Ahlers G., Pöbbell F.— Phys. Rev. Lett., 1975, v. 34, p. 513.
10. L'ippa J. A.— Physica. Ser. B, 1981, v. 107, p. 343.