

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ^4He В УЗКИХ ЩЕЛЯХ ВБЛИЗИ λ -ТОЧКИ

В.И.Панов, А.А.Собянин

Проведены количественные измерения температурной зависимости вблизи λ -точки плотности жидкого ^4He в тонкой плоско-параллельной щели с хорошо контролируемой геометрией и толщиной $d \approx 3,3 \cdot 10^{-5}$ см. Полученные результаты сравниваются с теоретическими предсказаниями.

Экспериментальное изучение температурного хода полной плотности гелия в пленках или щелях позволяет получить сведения о характере изменения λ -перехода в условиях ограниченной геометрии ¹. В настоящем сообщении приводятся результаты количественного исследования температурной зависимости вблизи λ -точки разности плотностей $\Delta\rho = \rho_d(T) - \rho_b(T)$ жидкого ^4He , содержащегося в широкой (с толщиной $d_0 = 5,2 \cdot 10^{-3}$ см) и узкой ($d \approx 3,3 \cdot 10^{-5}$ см) щели.

С теоретической точки зрения к изменению плотности гелия в щели, по сравнению с большим объемом (bulk), приводят три эффекта: 1) смещение температуры λ -перехода $\Delta T_\lambda(d) = T_\lambda - T_\lambda(d)$, обусловленное граничным условием $\Psi = 0$ для параметра порядка (макроскопической волновой функции $\Psi = \eta e^{i\varphi}$) на твердых стенках; 2) неоднородность при $T < T_\lambda(d)$ пространственного распределения плотности $\rho_d(z)$ гелия в направлении z поперек щели, отражающая неоднородность плотности сверхтекучей части $\rho_s = m |\Psi(z)|^2$; 3) изменение, за счет граничного условия $\Psi = 0$, спектра длинноволновых флуктуаций Ψ , приводящее к "обрезанию" для гелия в щели логарифмической аномалии коэффициента теплового расширения $\beta \equiv \rho^{-1} (\partial\rho/\partial T)_p$.

Первые два эффекта можно количественно рассчитать на основе феноменологической Ψ -теории сверхтекучести гелия II вблизи λ -точки ². Результаты такого рода расчетов, выполненных для ряда значений фигурирующего в теории ² параметра M , показаны на рис. 1 кривыми 1, 2, 3. Опуская детали вычислений, которые будут изложены в более подробной статье, отметим, что в интервале от T_λ до $T_\lambda(d)$ вычисленная из теории ² зависимость $\Delta\rho_\Psi(T)$ описывается прямой линией $\Delta\rho_\Psi = \rho_\lambda \Delta\beta_b (T_\lambda - T)$ с наклоном $\rho_\lambda \Delta\beta_b = 5,3 \cdot 10^{-3}$ г/см³ · К, где $\Delta\beta_b = \beta_{b,II} - \beta_{b,I}$ – разность значений коэффициентов теплового расширения "массивных" HeII и HeI на одинаковом расстоянии от T_λ . Резкое изменение наклона кривой $\Delta\rho_\Psi(T)$ при $T = T_\lambda(d)$ определяется скачком коэффициента β_d при λ -переходе гелия в щели ².

$$\Delta\beta_d = \Delta\beta_b \frac{32}{9(3+M)(1-M)}$$

При $T < T_\lambda(d)$ разность $\Delta\rho_\Psi(T)$ вначале несколько уменьшается, а затем увеличивается с удалением от $T_\lambda(d)$ по закону ²

$$\Delta\rho_\Psi = Cd^{-1} (T_\lambda - T)^{1/3},$$

где коэффициент пропорциональности C лишь слабо зависит от параметра M и равен $C = 3,08 \cdot 10^{-10}$ г/см² · К^{1/3} при $M = 0$.

Что касается зависимости от d логарифмически расходящейся части коэффициента теплового расширения $\beta_{d,fl}$, то относительно нее в настоящее время нельзя сделать сколько-нибудь детальных количественных предсказаний. Из теории масштабной инвариантности можно лишь ожидать ³, что логарифмический рост $\beta_{d,fl}$ прекращается в некотором интервале температур вблизи T_λ , где объемная корреляционная длина для параметра порядка $\xi_b(T) \gtrsim d$. Руководствуясь этим предположением, величину флуктуационного вклада в $\Delta\rho(T)$ можно грубо оценить, приняв, что вне интервала $|T_\lambda - T| < a\Delta T_\lambda(d)$ (здесь a – некото-

рый численный фактор порядка 1) величина $\beta_{d, fl}$ — такая же, как в большом объеме ($\beta_{d, fl} = \beta_{b, fl} = A \ln |T_\lambda - T|^{-1}$ с $A = 8,1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; см. ⁴), тогда как внутри этого интервала $\beta_{d, fl} = \text{const} = A \ln [a \Delta T_\lambda(d)]^{-1}$. Оцененные таким образом температурные зависимости величины $\Delta \rho_{fl}(T)$ вклада в $\Delta \rho$ длинноволновых флуктуаций Ψ приведены на рис. 1 пунктирными линиями для значений параметра $a = 1, 2/3$ и $1/3$. Конкретное значение $a = 2/3$ выбиралось из условия наилучшего согласия суммарной теоретической кривой $\Delta \rho_{th} = \Delta \rho_\Psi + \Delta \rho_{fl}$ (кривая 4 на рис. 1) с экспериментом при $T > T_\lambda(d)$. Отметим, что вклад $\Delta \rho_{fl}$ мал по сравнению с $\Delta \rho_\Psi$ даже при $a = 1$, что связано с малостью отношения $A/\Delta \beta_b \approx 0,2$.

Для экспериментального исследования зависимости $\Delta \rho(T)$ была применена та же методика, что и использованная ранее ¹ для количественного определения сдвига λ -точки. Усовершенствование этой методики (детали настоящих и предшествующих опытов будут описаны в более подробной статье) дало возможность провести количественные измерения $\Delta \rho$ и выявить особенности ее температурной зависимости вблизи λ -перехода (рис. 2). В эксперименте регистрировалась разность диэлектрических проницаемостей гелия $\Delta \epsilon$ в широкой и узкой щелях, изготовленных в виде плоских электрических конденсаторов C_0 и C_1 , параллельность и расстояние между пластинами которых контролировалось с точностью $1,5 \div 2\%$. Измерения проводились как при давлении насыщающих паров, так и при постоянном давлении ($p \lesssim 1,5$ атм). Точность регистрации температуры, давления и диэлектрической проницаемости составляли $\Delta T \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ K}$, $\Delta p \lesssim 1 \cdot 10^{-5}$ атм, $\Delta \epsilon \lesssim 3 \cdot 10^{-10}$. Скорость изменения температуры при регистрации $\Delta \rho$ не превышала $1 \cdot 10^{-3} \text{ K/мин}$. Для зависимости $\Delta \rho(T)$ не наблюдалось каких-либо гистерезисных эффектов при прямом и обратном ходе температуры. При выбранной методике основную ошибку в измеряемую величину разности $\Delta \rho(T)$ давало различие в емкостях измерительных конденсаторов. Дело в том, что при $C_0 \neq C_1$ к $\Delta \rho(T)$ добавляется нескомпенсированная монотонная ошибка $\Delta \rho_{ош} \sim \delta \epsilon (\Delta C/C_0)$, искажающая вид зависимости $\Delta \rho(T)$ (здесь $\Delta C \equiv C_0 - C_1 \ll C_0$, $\delta \epsilon = \epsilon(T_\lambda) - \epsilon(T)$ — изменение диэлектрической проницаемости ⁴Не на расстоянии $T_\lambda - T$ от λ -точки). В условиях эксперимента $\Delta C/C_0 \approx 0,2\%$, что приводило к ошибке лишь в 8% в регистрируемой величине $\Delta \rho$ на расстоянии $\sim 10 \Delta T_\lambda(d)$ от λ -точки.

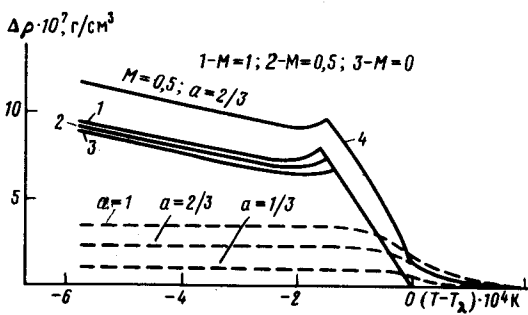


Рис. 1

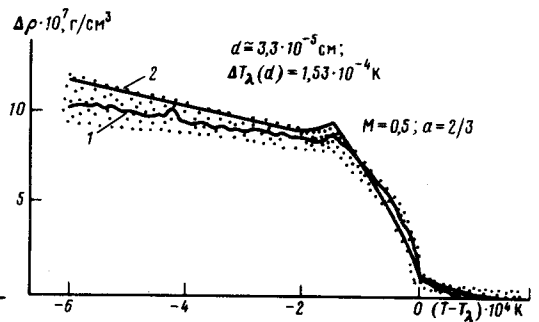


Рис. 2

Заметим, что в опытах ¹, имевших целью лишь количественное определение сдвига $\Delta T_\lambda(d)$, для повышения точности регистрации λ -переходов в измерительной системе имелась переходная RC-цепочка, которая отсекала постоянную и медленно меняющуюся часть сигнала, связанного с изменением избыточной плотности. В результате, приведенная в 1 на рис. 2 запись экспериментального сигнала отражает качественно ход $\Delta \rho(T)$ внутри интервала $T_\lambda(d) < T < T_\lambda$, но оставляет неопределенным монотонное изменение $\Delta \rho(T)$ за границами этого интервала. В настоящих экспериментах этот недостаток был в значительной мере устранен за счет ряда усовершенствований методики измерений и уменьшения вклада паразитных эффектов, об одном из которых было сказано выше.

Одна из зависимостей $\Delta\rho(T)$ вблизи T_λ , полученная в настоящем эксперименте с учетом поправок на дрейф, показана на рис. 2 кривой 1, а точками на этом рисунке изображена полоса, в которую попадает 8% всех полученных экспериментальных кривых. Усредненное по этим кривым с учетом влияния пристенного потенциала и электрострикционных эффектов (напряжение на обкладках конденсаторов $\sim 0,2$ В) значение параметра M составило $M \approx 0,5$, что согласуется с ранее приведенным ¹ значением $M = 0,6 \pm 0,3$, оцененным по величине сдвига λ -точки.

Близкое соответствие экспериментальной и теоретической зависимостей $\Delta\rho(T)$ с учетом вклада длинноволновых флуктуаций свидетельствует о хорошей применимости теории ¹ к пленкам и слоям гелия. Вместе с тем, для детального ответа на вопрос о влиянии длинноволновых флуктуаций Ψ на ход термодинамических функций гелия в условиях ограниченной геометрии необходимы дальнейшие исследования.

Авторы благодарят В.Л.Гинзбурга за интерес к работе и полезные обсуждения и А.А.Стратонникова за помощь в количественной обработке экспериментальных данных.

Литература

1. *Панов В.И., Собянин А.А.* Письма в ЖЭТФ, 1982, **35**, 329.
2. *Гинзбург В.Л., Собянин А.А.* УФН, 1976, **120**, 153; J. Low Temp Phys., 1982, **49**, 507.
3. *Barber M.N.* In: Phase Transitions and Critical Phenomena. Edited by C. Domb and L.J. Lebowitz. Vol. 8, Academic Press, London, 1983, p. 145.
4. *Панов В.И., Хвостиков А.А.* ЖЭТФ, 1982, **83**, 183.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию
2 июля 1986 г.