

НАБЛЮДЕНИЕ ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ СВЕРХТЕКУЧЕГО ^4He ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

В.Л.Цымбаленко

Экспериментально обнаружено переохлаждение сверхтекучего гелия-4 при кристаллизации. Среднее время жизни метастабильной жидкости растет с понижением температуры; переход от кубической к гексагональной фазе резко уменьшает время жизни.

Исследования кинетики кристаллизации в гелии представляют особенный интерес, т. к. этот фазовый переход существует вплоть до абсолютного нуля. С понижением температуры вероятность W появления критического зародыша вследствие термических флуктуаций экспоненциально убывает $W \rightarrow 0, T \rightarrow 0$ ¹. Поэтому, согласно теоретическим предсказаниям Кагана и Лифшица², при $T = 0$ кристаллизация должна происходить за счет туннельного появления закритического зародыша. Позже этот подход был развит в ряде теоретических работ³⁻⁵. В данной статье приведены первые экспериментальные результаты изучения переохлаждения гелия при довольно высоких температурах 1,25 – 1,75 К.

Метастабильный жидкий гелий получался при монотонном охлаждении контейнера, установленного в вакуумной рубашке на ванне ^3He . Прогиб одной из стенок контейнера толщиной 0,55 мм использовался для определения давления (точность измерения $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ атм). Сквозь противоположную стенку из нержавеющей стали был пропаян медный холодопровод, на котором располагался термометр сопротивления. Температура определялась с точностью ~ 5 мК. Регистрация значений давления и температуры, управление нагревателем осуществлялось компьютером IBM PC, связанным через контролер АКК-83⁶ с кризисом САМАС. Цикл измерений начинался с установки температуры холодной точки (ванны ^3He) на ~ 20 мК ниже температуры кристаллизации T_m . Температура контейнера нагревателем поднималась до значения на ~ 20 мК выше T_m затем нагрев выключался и контейнер начинал монотонно охлаждаться со скоростью $T = 10^{-3} - 10^{-4}$ К/с. По достижению зародышем критического размера начинается его стремительный рост, сопровождающийся уменьшением давления в контейнере. На записи это выглядит как скачок (см. рис. 1). Величина скачка Δp определялась с точностью $7 \cdot 10^{-4}$ атм. Затем образец расплавляли и повторяли цикл измерений. В каждой температурной точке общее число зарегистрированных скачков лежало в интервале от ~ 100 до 690. Разность химпотенциалов жидкого гелия $\delta\mu$ перед кристаллизацией определялась по величине скачка давления соотношением: $\delta\mu = k(T) \times (V_l - V_s) \Delta p$, где V_l и V_s – объемы на один атом соответственно в жидкой и твердой фазах, $k(T)$ – поправка, обусловленная теплотой кристаллизации; $k(1,75) = 1,47, k(1,53) = 1,09, k \rightarrow 1 T \rightarrow 0$. Скорость изменения $\delta\mu$ вычислялась по измеренным скоростям изменения давления и температуры; разброс $\sim 30\%$. Гистограммы распределения величин скачков в координатах $\delta p = \delta\mu / (V_l - V_s)$ приведены на рис. 2.

Количество скачков g , зарегистрированных в единицу времени в момент t , связано с вероятностью появления критического зародыша в контейнере W следующим соотношением:

$$g(t) = N_0 W [\delta\mu(t)] \exp \left[- \int_0^t W [\delta\mu(t')] dt' \right],$$

где N_0 – общее число событий. Обращая это выражение с учетом линейной связи $\delta\mu$ и t

получим:

$$W(\delta\mu) = \delta\mu \cdot g / \left[\int_{\delta\mu}^{\infty} g(\delta\mu') d(\delta\mu') \right] .$$

Однако, поскольку полуширины гистограмм (см. рис. 2) близки к среднеквадратичной ошибке измерения, такая обработка дает большую ошибку в зависимости $W(\delta\mu)$. Поэтому на рис. 3 приведены обратные значения времени жизни метастабильного состояния $\langle t \rangle$, усредненного по всем событиям. Оно пропорционально вероятности возникновения критического зародыша при среднем значении $\langle \delta\mu \rangle$. Для объемноцентрированной фазы (ОЦК) $\langle \delta\mu \rangle / (V_l - V_s) = 0,014 - 0,017$ атм; для гексагональной (ГПУ) соответствующие значения $0,055 - 0,06$ атм. Как видно из рисунка, в обеих фазах понижение температуры приводит к росту среднего времени жизни метастабильной жидкости. При переходе от кубической к гексагональной фазе наблюдается скачок скорости зародышеобразования, причем в низкотемпературной фазе скорость выше даже при вдвое меньших переохлаждениях.

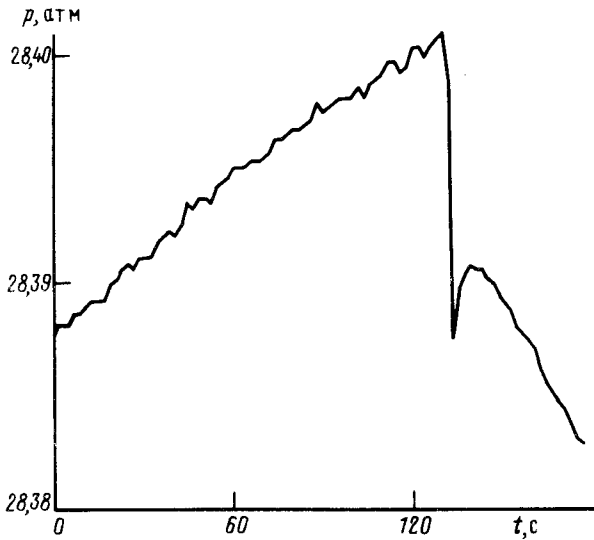


Рис. 1. Пример записи скачка давления при образовании зародыша твердой фазы (ОЦК)

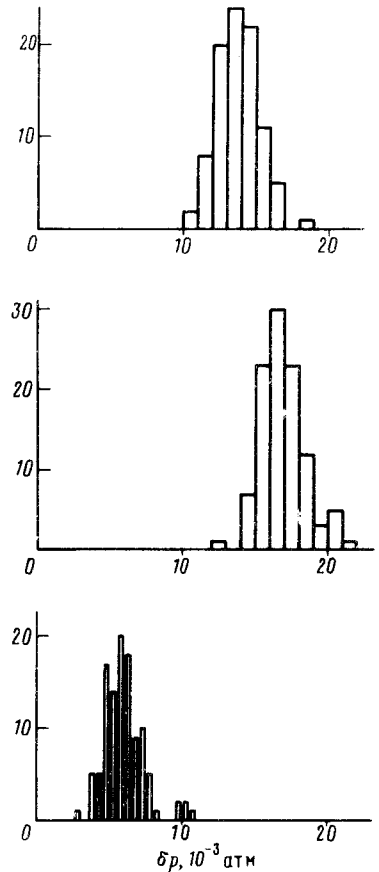


Рис. 2. Гистограммы распределения числа рождения критических зародышей от переохлаждения. Сверху вниз: ОЦК, $T = 1,73$ К, $T = 6,1 \cdot 10^{-4}$ К/с, 93 события; ОЦК, $T = 1,53$ К, $T = 4,3 \cdot 10^{-4}$ К/с, 105 событий; ГПУ, $T = 1,4$ К, $T = 2,6 \cdot 10^{-4}$ К/с, 110 событий

Аналогичные эксперименты были проведены и с несверхтекучим гелием при давлениях $30,5 - 36$ атм. Скачки давления, типа приведенного на рис. 1, зарегистрированы не были. Воз-

возможные причины: наличие градиента температур в контейнере; малое время жизни метастабильной жидкости; низкий кинетический коэффициент роста кристалла.

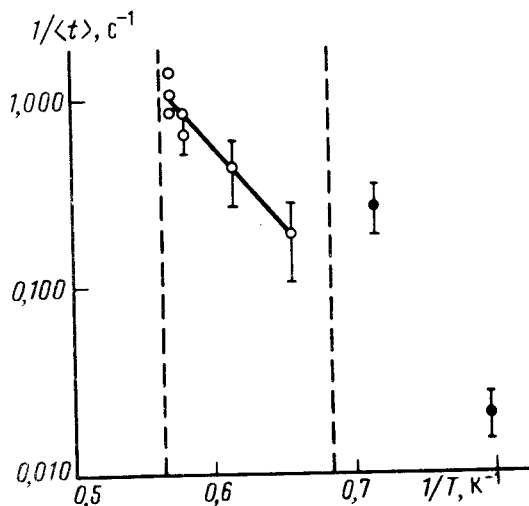


Рис. 3. Температурная зависимость обратного времени жизни метастабильного состояния. Вертикальными штриховыми чертами выделена ОЦК фаза. Прямая линия, проведенная в кубической фазе, соответствует энергии активации ~ 25 К

На основании полученных результатов можно сделать следующие качественные выводы. Уменьшение скорости зародышеобразования с температурой в каждой из фаз свидетельствует, по-видимому, о том, что при $T = 1,25 - 1,75$ К наблюдается классическое термоактивированное появление критического зародыша. Скачок при переходе к гексагональной фазе, вероятно, связан с изменением поверхностного натяжения. Количественное сравнение полученных результатов с теоретическими предсказаниями затруднено по ряду причин. Например, недостаточно известны используемые в теории параметры, такие как поверхностное натяжение твердых фаз и краевой угол с поверхностью контейнера. Последнее условие особенно существенно, т. к. зародыш, как следует из эксперимента (см., например, ⁷), в большинстве случаев возникает на стенке. Наличие зарядов в жидкости, образовавшихся вследствие естественной радиоактивности стенок контейнера, также уменьшает потенциальный барьер для возникновения критического зародыша.

Автор благодарен С.Н.Бурмистрову, Л.Б.Дубовскому, Ю.М.Кагану и Л.А.Максимову за ценные и конструктивные обсуждения, Е.П.Красноперову и Н.А.Черноплекову за поддержку и интерес к работе.

Литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964, с. 556.
2. Каган Ю.М., Лифшиц И.М. ЖЭТФ, 1972, 62, 385.
3. Uehara M. J. Low Temp. Phys. 1983, 52, 15.
4. Бурмистров С.Н., Дубовский Л.Б. ЖЭТФ, 1987, 93, 733.
5. Коршунов С.Е. ФНТ, 1988, 14, 575.
6. Данцевич Г. А. и др. Препринт ИФВЭ № 84-41. Серпухов, 1984.
7. Кешишев К.О. и др. ЖЭТФ, 1981, 80, 716.