

ИЗУЧЕНИЕ ГЕЛИЯ II НИЖЕ 1 К МЕТОДОМ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

*Н.М.Благовещенский, И.В.Богоявленский, Л.В.Карнацевич,
Ж.А.Козлов, Ю.Я.Миленко, В.А.Парфенов, А.В.Пучков*

В работе обсуждаются результаты исследования температурных зависимостей плотности бозе-конденсата (БК) и средней кинетической энергии на атом в жидком гелии, полученные путем анализа спектров неупругого рассеяния нейтронов.

Возможность экспериментального исследования относительной плотности БК в жидком гелии-4 с помощью рассеяния нейтронов впервые обоснована в ¹. При передаче импульса нейтрона много больше обратного межатомного расстояния закон рассеяния можно представить в виде суперпозиции законов рассеяния нейтрона на атомах с ненулевым импульсом и на атомах, находящихся в состоянии бозе-конденсации (импульсная аппроксимация).

В результате математического разложения экспериментального спектра на две гауссовские кривые, отвечающие рассеянию нейтронов на атомах БК и на остальных атомах (двух-гауссовская модель ^{2,3}), можно оценить плотность БК. В работе ⁴ этим методом исследована температурная зависимость плотности БК $n_0(T)$ в области 1,2 – 4,2 К. Экспериментальные значения $n_0(T)$ аппроксимировались степенной зависимостью

$$n_0(T) = n_0^* [1 - (T/T_0)^m] \quad (1)$$

со следующими значениями свободных параметров:

$$n_0^* = 0,022 \pm 0,002; \quad T_0 = 2,24 \pm 0,04; \quad m = 9,0 \pm 4,0.$$

Аналогичный характер зависимости $n_0(T)$ в интервале температур $1 \text{ К} - T_\lambda$ получен в ⁵ из недавних исследований радиальной функции распределения $g(r)$ и распределения атомов гелия-4 по импульсам. При закреплённом параметре $T_0 = T_\lambda$, $n_0^* = 0,139 \pm 0,023$; $m = 3,6 \pm 1,4$. Различие значений n_0^* , вероятно связано с использованием различных методов определения плотности БК.

В работе ⁶ установлена связь между описанием сверхтекучего гелия в терминах двухжидкостной модели и микроскопическим описанием гелия, основанном на методе, изложенном в работе ⁷. Авторами получено выражение для $n_0(T)$ в интервале температур от 0 до T_λ , которое предсказывает значительное возрастание n_0 при $T \sim 0,6 \text{ К}$. В области 0,6 К качественно изменяются также температурные зависимости ряда макроскопических свойств гелия-4 (вязкость нормальной компоненты, скорость второго звука и др.). Это, вероятно, обусловлено изменением относительного вклада в термодинамику жидкого гелия ротонов и фононов.

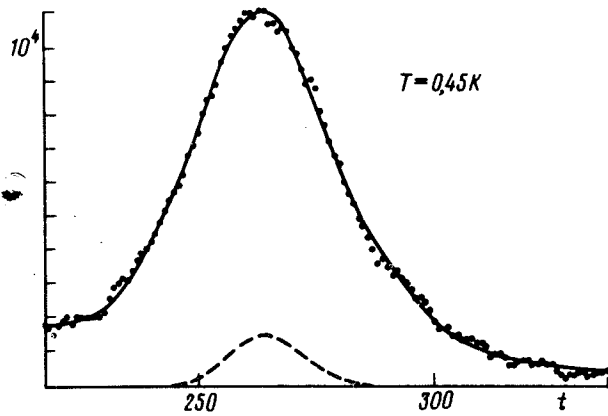


Рис. 1

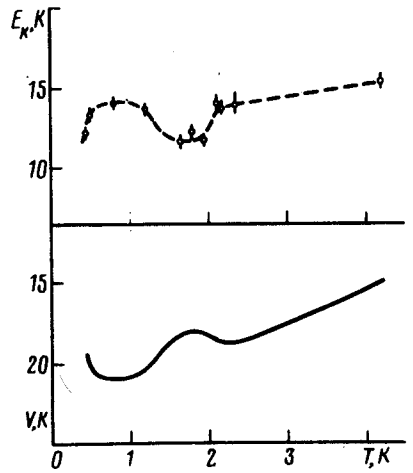


Рис. 3

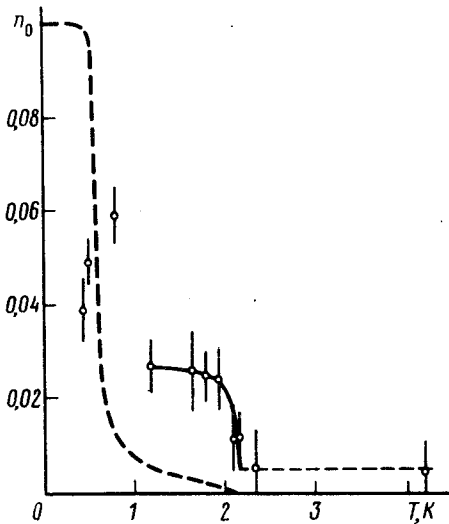


Рис. 2

Рис. 1. Экспериментальный спектр нейтронов, рассеянных жидким гелием при $T = 0,45 \text{ К}$ с передачей импульса $14,3 \text{ \AA}^{-1}$. Пунктирная линия – составляющая спектра, отвечающая рассеянию нейтронов на БК. Сплошная линия – результат описания спектра с помощью двухгауссовской модели. t – номер канала временного анализатора

Рис. 2. Зависимость плотности БК от температуры

Рис. 3. Температурные зависимости средних кинетической и потенциальной энергий на атом жидкого гелия

В настоящей работе впервые проведены исследования плотности БК ниже 1 К. Использовался криостат, позволяющий охлаждать образец гелия-4 объемом $\sim 4 \text{ л}$ до температур $\sim 0,4 \text{ К}$ с помощью откачки пара гелия-3 адсорбционным насосом, расположенным внутри

криостата. Точность поддержания температуры — 0,01 К. Измерения выполнены на спектрометре ДИН-1М на реакторе ИБР-30 при температурах образца 0,45; 0,5 и 0,8 К. На рис.1 показан характерный экспериментальный спектр нейтронов, рассеянных жидким гелием-4. Полученные значения относительной плотности БК в области температур 0,45 — 4,2 К приведены на рис.2. Сплошной кривой показан результат аппроксимации данных ⁴ степенной зависимостью (1). Пунктиром обозначена теоретическая кривая из работы ⁶. Из рисунка видно, что при $T \approx 1$ К наблюдается возрастание плотности БК. Этот результат качественно согласуется с теорией ⁶ и не противоречит оценкам $n_0 \sim 0,1$ при $T = 0$ К ⁸.

Ширина гауссовской кривой, отвечающей рассеянию нейтронов на атомах БК, как и ожидалось, в пределах ошибок, во всем интервале температур 0,45 — 4,2 К соответствует функции разрешения спектрометра.

Измерение ширины „надконденсатного” гауссиана позволяет вычислить среднюю кинетическую энергию на атом гелия в жидкости ²:

$$\langle E_{\kappa} \rangle = \frac{3}{8} \left[\frac{\gamma_2 (1 - n_0)}{\omega_0} + n_0 \gamma_0^{1/2} \right], \quad (2)$$

где γ_2 и γ_0 — квадраты ширин „надконденсатного” и „конденсатного” гауссианов за вычетом функции разрешения (в нашем случае $\gamma_0 = 0$), ω_0 — энергия ядра отдачи.

Потенциальная энергия взаимодействия, отнесенная к 1 атому жидкого гелия, определяется выражением ⁹:

$$V = \frac{5}{2} kT - E_{\kappa} - L - P/\rho, \quad (3)$$

где L — скрытая теплота испарения, P — давление, ρ — плотность. Зависимость $E_{\kappa}(T)$ и $V(T)$ приведены на рис.3. Наблюдаемый максимум на кривой $V(T)$ в области 1,2 — 2,17 К связан с уменьшением плотности гелия-4 ниже T_{λ} и появлением бозе-конденсата.

Авторы благодарят С.Т.Беляева, О.Д.Казачковского, В.С.Когана, Б.Г.Лазарева, Ю.М.Остаевича, Л.П.Питаевского за внимание к работе и полезные обсуждения.

Литература

1. Hohenberg P.C., Platzman P.M. Phys. Rev., 1966, 152, 198.
2. Puff R.D., Tenn J.S. Phys. Rev., 1970, A1, 125.
3. Александров Л., Загребнов В.А., Козлов Ж.А., Парфенов В.А., Приезжев В.Б. ЖЭТФ, 1975, 68, 1825.
4. Докукин Е.Б., Козлов Ж.А., Парфенов В.А., Пучков А.В. Письма в ЖЭТФ, 1976, 23, 497; ЖЭТФ, 1978, 75, 2273.
5. Sears V.F., Svensson E.C. Phys. Rev. Lett., 1979, 43, 2009; Sears V.F., Svensson E.C., Martel P., Woods A.D.B. Phys. Rev. Lett., 1982, 49, 279.
6. Hyland G.J., Rowlands G. J. of Low Temp. Phys., 1972, 7, 271.
7. Frölich H. Phys. Cond. Mat., 1969, 9, 350.
8. Penrose O., Onsager L. Phys. Rev., 1956, 104, 576; Lam P.M., Ristig M.L. Phys. Rev., 1979, B20, 1960.
9. Gibbs A.G., Harling O.K. Phys. Rev., 1971, A3, 1713.