

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ БОЗЕ-КОНДЕНСАТА В ЖИДКОМ $^4\text{He}$

*Е.Б.Докукин, Ж.А.Козлов, В.А.Парфенов,  
А.В.Пучков*

С помощью неупругого рассеяния нейтронов измерена температурная зависимость плотности бозе-конденсата в жидком гелии. Характер зависимости совпадает с температурной зависимостью плотности сверхтекучей компоненты. Температура бозе-конденсации  $T_0 = T_\lambda$ . Относительная плотность бозе-конденсата  $\xi_0 (p = 0, T = 0) = 0,024 \pm 0,004$ .

В работе [1] обсуждались результаты исследований количества бозе-конденсата в жидком гелии-4 при температурах 1,2; 4,2К с помощью анализа спектров неупругого рассеяния нейтронов при передачах импульса  $\bar{k} = 14,1 \text{ \AA}^{-1}$ .

Представленные в данной работе результаты получены при температурах жидкого гелия  $T = 1,2; 1,8; 2,11; 2,17; 2,35; 4,2\text{К}$ . Эксперименты проводились на спектрометре ДИН-1М [2] на импульсном реакторе ИБР-30 в режиме работы с линейным ускорителем. Спектры рассеянных нейтронов измерялись для трех углов рассеяния, для которых  $k = 14,1; 13,4; 12,6\text{Å}^{-1}$ , соответственно.

Для описания экспериментальных данных использовалась двухгауссовская математическая модель

$$\phi(n) = E^2 A_1 \exp(P_1) + E^2 A_2 \exp(P_2) + (A_7 + nA_8), \quad (1)$$

где 
$$P_{1,2} = - (E - E_x + A_{3,6})^2 A_{2,5}^{-1} k^{-2}.$$

Второй член в (1) описывает рассеяние на бозе-конденсате.

Экспериментальные спектры были получены при постоянном угле рассеяния  $\theta$ , поэтому энергия свободной частицы  $E_x$ , а также  $k$  связаны с начальной энергией ( $E_0$ ) и конечной энергией ( $E$ ) нейтрона соотношениями

$$E_x = \frac{\hbar^2 k^2}{2M_{\text{He}}},$$

$$k = \frac{\sqrt{2M_n}}{\hbar} (E_0 + E - 2\cos\theta\sqrt{E_0 E})^{1/2}.$$

Связь между  $E$  и номером канала временного анализатора  $n$  имеет вид

$$E = c(a + bn)^{-2},$$

где  $a, b, c$  – постоянные, определяемые из условий эксперимента.

Обработка экспериментальных данных проводилась на основе регуляризованного итерационного процесса Гаусса – Ньютона, предложенного в работе [3]. Независимыми параметрами выбирались амплитуды гауссовских кривых  $A_1$  и  $A_4$ , квадраты ширин  $A_2$  и  $A_5$ , сдвиги искомым гауссианов относительно энергии свободной частицы  $A_3 = A_6$  и параметры прямой линии  $A_7$  и  $A_8$ . Статистические ошибки параметров были получены с применением теории ошибок метода наименьших квадратов.

Возможными причинами возникновения третьего члена в (1) являются присутствие в спектре распределения атомов гелия по импульсам либо максимума с  $p \sim 2,5\text{Å}^{-1}$  [4], либо монотонно спадающей части спектра в области больших импульсов.

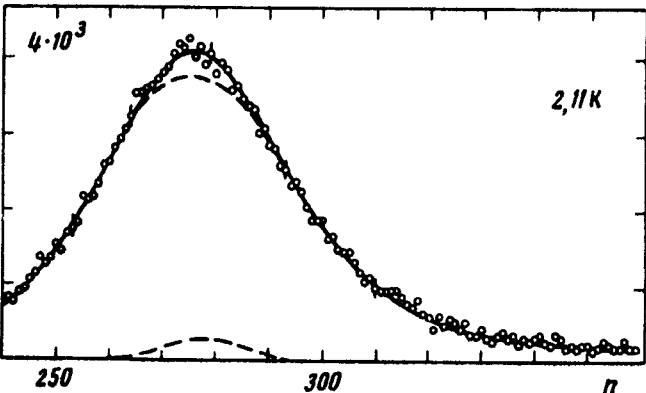
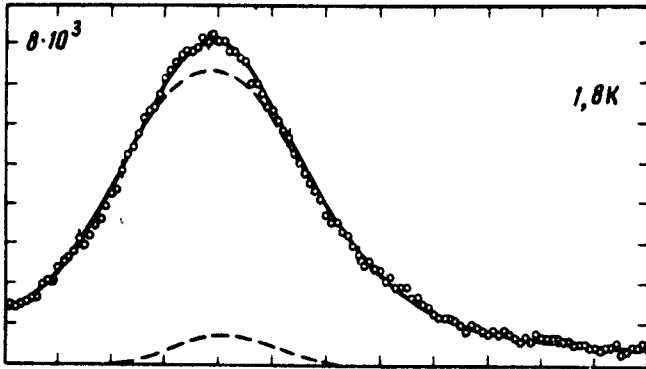
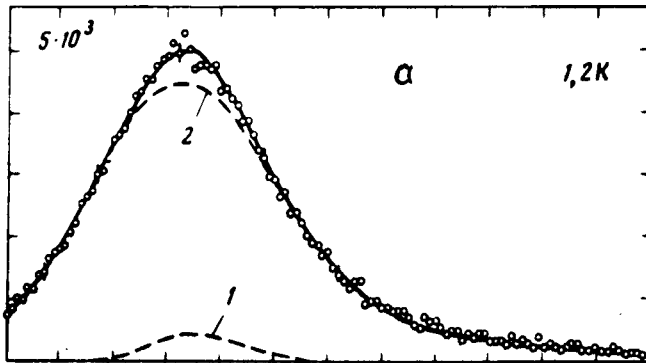
Относительное количество бозе-конденсата рассчитывалось по формуле

$$\xi = \frac{S_{\text{БК}}}{S_{\text{БК}} + S_{\text{НК}}},$$

где  $S_{\text{БК}}$  и  $S_{\text{НК}}$  – площади спектров для бозе-конденсатной и надконденсатной частей соответственно.

На рис. 1, *a, b* показаны экспериментальные спектры рассеянных гелием нейтронов для шести различных температур при  $k = 14,1 \text{ \AA}^{-1}$ .

На рис. 2 показаны результаты измерений температурной зависимости количества бозе-конденсата в жидком гелии. Измеренная зависимость имеет особенность при температуре  $T_0$ . При  $T < T_0$  с уменьшением  $T$  наблюдается увеличение количества бозе-конденсата, а при  $T \geq T_0$  до точки кипения жидкого гелия  $T = 4,2 \text{ K}$  полученная величина бозе-конденсата в пределах ошибки не меняется. Можно предположить, что величина бозе-конденсатной фракции при  $T > T_0$  определяется систематической ошибкой исследований, связанной с используемой экспериментальной методикой и методом анализа спектров рассеянных нейтронов.



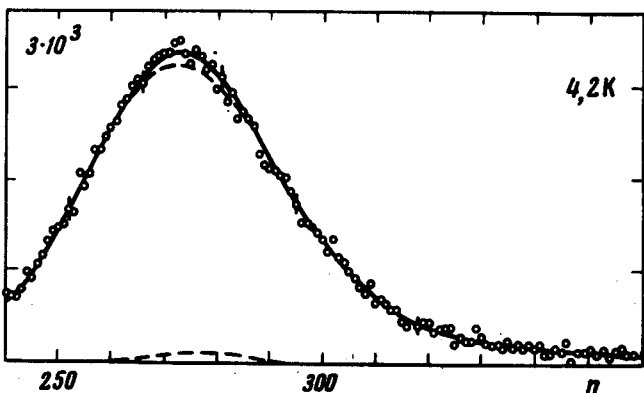
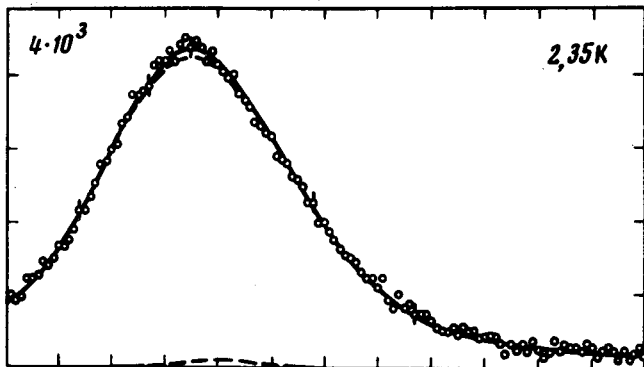
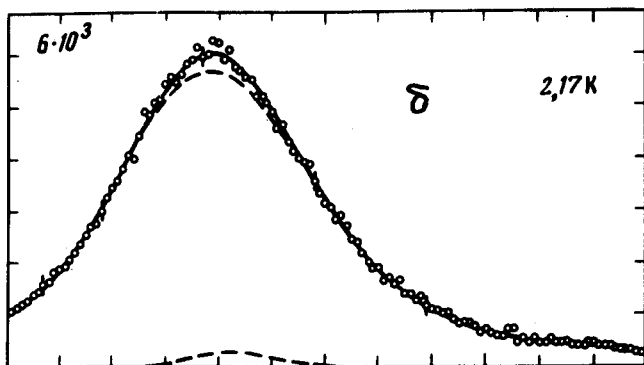


Рис. 1, а, б Экспериментальные спектры нейтронов, рассеянных жидким гелием при  $k = 14,1 \text{ \AA}^{-1}$  для различных температур. Расчетные кривые, относящиеся к бозе-конденсатной (кривая 1) и надконденсатной (кривая 2) частям, показаны пунктиром

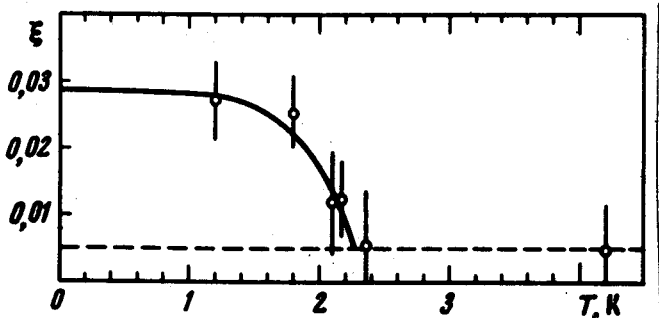


Рис. 2. Температурная зависимость бозе-конденсата в жидком гелии. Пунктирной линией показана величина систематической ошибки, сплошной линией обозначена зависимость (2)

Экспериментальное значение  $A_5$ , т. е. квадрата ширины гауссиана для бозе-конденсатной части, не зависит от температуры и угла рассеяния и, в пределах ошибок, равно квадрату ширины функции разрешения спектрометра.

Анализ экспериментальных данных проводился также и без учета в (1) бозе-конденсатной части ( $A_4 = 0$ ). С точки зрения статистического критерия качества аппроксимации  $\chi^2/s$  при  $T < T_0$  лучшей является двухгауссовая модель, а при  $T > T_0$  — одногауссовская.

Экспериментальные результаты температурной зависимости относительного количества бозе-конденсата описывались эмпирической формулой

$$\xi(p=0, T) = \xi_0(p=0, T=0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_0} \right)^m \right], \quad (2)$$

где  $\xi_0$  — относительная плотность бозе-конденсата при  $T = 0$ . Значения свободных параметров  $\xi_0$ ,  $T_0$ ,  $m$  определялись методом наименьших квадратов:

$$\xi_0 = 0,024 \pm 0,004; \quad T_0 = 2,29 \pm 0,12\text{K}; \quad m = 5,6 \pm 4.$$

Полученное значение температуры бозе-конденсации совпадает с температурой  $\lambda$ -перехода в жидком гелии:  $T_0 = T_\lambda$  [5], а характер температурной зависимости плотности бозе-конденсата совпадает с температурной зависимостью количества сверхтекучей компоненты [6,7] Первые результаты температурной зависимости плотности бозе-конденсата, полученные в настоящей работе, создают реальные предпосылки для исследований связи явлений бозе-конденсации и сверхтекучести.

В заключение авторы выражают благодарность М.С.Гусарову, О.Д.Казачковскому, Л.П.Питаевскому, И.М.Франку, Н.А.Черноплекову за постоянное внимание к работе и полезные дискуссии. Авторы сердечно благодарят Л.Александрова, В.А.Загребнова, В.Б.Приезжева за помощь в работе и обсуждения. Авторы признательны службе эксплуатации спектрометра ДИН-1М за техническую помощь в проведении экспериментов.

Объединенный институт  
ядерных исследований

Поступила в редакцию  
19 марта 1976 г.

### Литература

- [1] Л.Александров, В.А.Загребнов, Ж.А.Козлов, В.А.Парфенов, В.Б.Приезжев. ЖЭТФ, 68, 1825, 1975.
- [2] V.G.Liforov, M.N.Nikolaev, A.G.Novikov, V.Z.Nozik, V.V.Orlov, V.A.Parfenov, V.A.Semenov, V.I.Smirnov, V.F.Turchin. Research Appl. of Nuclear Pulsed Systems, Vienna, 1966, p. 196.
- [3] Л.Александров. ОИЯИ, P5-7259, Дубна, 1973.
- [4] W. Mc Millan. Phys. Rev., 138, A442, 1965.
- [5] Н.Н.Боголюбов. Избранные труды, 2, изд. Наукова думка, 1970.
- [6] E.Andronikashvili. J. Phys. (USSR), 10, 201, 1946.
- [7] Керзон Хуанг. Статистическая механика. М., изд. Мир, 1966.