

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОАТОМНОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ И ВЕТВИ ДВУХРОТОННОГО СВЯЗАННОГО СОСТОЯНИЯ В HeII

Н.М.Благовещенский, Е.Б.Докукин, Ж.А.Козлов,  
В.А.Парфенов

Обсуждаются результаты эксперимента по исследованию одноатомного рассеяния нейтронов в области фонон-ротонного спектра и ветви двухротонного связанного состояния в HeII при  $T = 1,2$  и  $1,9$  К.

Цель настоящего эксперимента — продолжение исследования особенностей спектров неупругого рассеяния нейтронов в HeII вблизи  $\epsilon = q^2/2M_{\text{He}}$  и  $\epsilon \sim 2\Delta$  [1] ( $\epsilon$  и  $q$  — передача энергии и импульса,  $\Delta$  — ротонная щель,  $M_{\text{He}}$  — масса атома гелия). Эксперимент осуществлялся на спектрометре ДИН-1М на импульсном реакторе ИБР-30 [2]. Начальная энергия нейтронов  $E_0 = 3,230 \pm 0,001$  мэВ. Углы рассеяния составляли  $45 \pm 122^\circ$ . Измерения производились при двух температурах образца HeII,  $T = 1,2$  и  $T = 1,9$  К.

Типичный спектр рассеянных нейтронов представлен на рис. 1. На всех углах рассеяния при температуре образца  $T = 1,2$  К отчетливо просматриваются пики, соответствующие одноатомному рассеянию (показано жирной стрелкой) и двухротонному связанному состоянию (отмечены верхними стрелками). Полный результат обработки с использованием гауссовских распределений представлены на диаграмме  $\epsilon(q)$ , рис. 2.

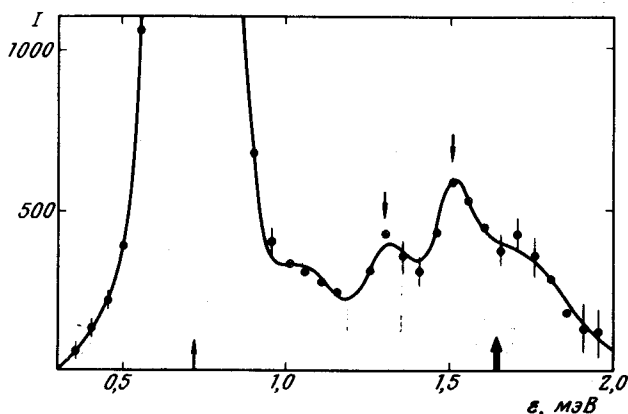


Рис. 1. Спектр рассеянных нейтронов.  $E_0 = 3,230$  мэВ,  $T = 1,2$  К. Угол рассеяния  $109^\circ$

**Одноатомное рассеяние.** Из рис. 2 видно, что экспериментальные данные в пределах ошибок соответствуют зависимости  $\epsilon = q^2/2M_{\text{He}}$ . Минимальная энергия атома отдачи в настоящем эксперименте,  $\epsilon = 0,47$  мэВ, существенно меньше  $\Delta$ . Площадь под пиком одноатомного рассеяния для обеих температур HeII монотонно возрастает с ростом  $q$ . Среднее отношение площадей для двух температур составляет  $\langle S_0(1,2\text{К})/S_0(1,9\text{К}) \rangle = 1,84 \pm 0,55$ , в то время, как площадь под ротонным пиком в пределах погрешностей с ростом  $T$  не изменилась:  $S_r(1,2\text{К})/S_r(1,9\text{К}) = 0,97 \pm 0,02$ . Отношение плотностей сверхтекучей компоненты для этих двух температур  $\rho_s(1,2)/\rho_s(1,9\text{К}) = 1,67$ .

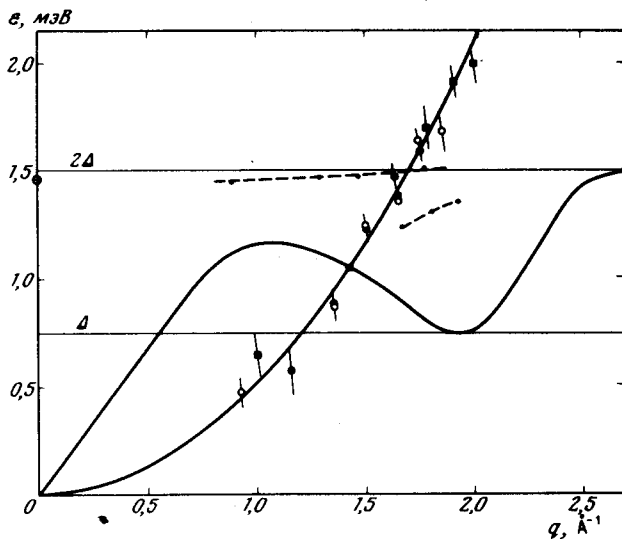


Рис. 2. Диаграмма одноатомного рассеяния нейтронов в HeII при  $T = 1,2\text{K}$  (o) и  $T = 1,9\text{K}$  (●); ■ — данные работы [1]. Пунктиром показана ветвь двухроторного связанного состояния

Наблюдаемая ширина на половине высоты пика в пределах погрешностей не зависит от угла рассеяния нейтронов и равна

$$\langle \Gamma_0(1,2\text{K}) \rangle = 0,21 \pm 0,03 \text{ мэВ}; \quad \langle \Gamma_0(1,9\text{K}) \rangle = 0,15 \pm 0,03 \text{ мэВ}.$$

Характерно, что с ростом температуры наблюдается некоторое уменьшение ширины пика одноатомного рассеяния.<sup>1</sup>

Одноатомное рассеяние можно интерпретировать как локальное нарушение сверхтекучести, связанное с искусственной заселенностью спектра одноатомных движений во время акта рассеяния нейтронов на атомах  $^4\text{He}$ , находящихся в конденсатном состоянии. Для точной количественной оценки корреляции между плотностями бозе-конденсата (БК) и сверхтекучей компоненты необходим эксперимент по температурной зависимости площади под пиком одноатомного рассеяния в области спектра элементарных возбуждений HeII. Однако совпадение отношения площадей  $S_0$  в пределах статистической ошибки с отношением плотностей  $\rho_s$  при двух исследованных температурах может служить еще одним указанием на связь между явлениями сверхтекучести и бозе-эйнштейновской конденсации в  $^4\text{He}$ , наряду с результатами эксперимента [4] по изучению рассеяния нейтронов атомами БК при  $\epsilon \gg \Delta$ .

**Двухроторное связанное состояние.** Данные работы [1] по нейтронному рассеянию показали существование в гелии II двухроторного связанного состояния с отличным от нуля полным импульсом. Однако наличие эффекта многократного рассеяния нейтронов в области  $\epsilon \sim 2\Delta$  не позволило дать оценку энергии связи  $E_B$  и константы ротор-роторного взаимодействия  $g_4$ . В настоящем эксперименте вкладом многократного рассеяния при передачах энергии порядка  $2\Delta$  можно пренебречь из-за сильной анизотропии первично рассеянных нейтронов. Как видно из рис. 2, ветвь двухроторного связанного состояния достигает  $2\Delta$  при  $q = 1,65 \text{ \AA}^{-1}$ ; при больших импульсах роторы отталкиваются. Можно предположить, что наблюдаемая при  $T = 1,2\text{K}$  двухроторная ветвь является продолжением ветви, начало которой исследовано в эксперименте по рассеянию света [5]. На это указывает также близкое значение энер-

$$|E_B(q)|_{max} = 0,038 \pm 0,006 \text{ мэВ } (0,44 \pm 0,07\text{К});$$

$$|E_B(0)| = 0,032 \pm 0,009 \text{ мэВ } (0,37 \pm 0,1\text{К}).$$

Константу ротон-ротонного взаимодействия можно оценить по формуле (3.30) теории [6].

$$g_4 = \left[ 2\rho_0(q) \ln \frac{E_B}{2D} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $\rho_0(q)$  — невозмущенная плотность двухротонных состояний,  $\rho_0(q) = \mu q_r^2 / 4\pi q$ ,  $\mu = 0,16 M_{He}$  — эффективная масса ротона при  $T = 1,2\text{К}$ ,  $q_r = 1,93\text{Å}^{-1}$  — импульс ротона,  $D = \Delta_1 - \Delta = 0,4 \text{ мэВ}$  — разность энергий первого максимума и ротонного минимума спектра элементарных возбуждений. Подставляя в (1) экспериментальные значения энергии связи  $E_B$  и импульса  $q$ , получаем для части ветви, соответствующей притяжению между ротонами

$$g_4(q = 0,885 \text{ Å}^{-1}) = -0,51 \cdot 10^{-38} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3,$$

$$g_4(q = 1,287 \text{ Å}^{-1}) = -0,52 \cdot 10^{-38} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3,$$

$$g_4(q = 1,467 \text{ Å}^{-1}) = -0,70 \cdot 10^{-38} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3.$$

Относительная ошибка в определении  $g_4$  порядка 0,08. При полном нулевом импульсе пары  $g_4 = -0,12 \cdot 10^{-38} \text{ эрг} \cdot \text{см}^3$  [5]. Отметим, что в настоящем эксперименте при  $T = 1,2\text{К}$  в области  $1,65 \text{ Å}^{-1} < q < 1,95 \text{ Å}^{-1}$  наблюдались пики, также соответствующие, по-видимому, двухротонному связанному состоянию и имеющие энергию  $\epsilon = 1,228 \text{ мэВ}$ ;  $\epsilon = 1,313 \text{ мэВ}$  и  $\epsilon = 1,352 \text{ мэВ}$ , меньшую  $2\Delta$  (см. [3]).

При  $T = 1,9\text{К}$  пики двухротонного связанного состояния сильно уширяются, и для их надежного математического выделения из спектров статистика данных измерений недостаточна.

Наконец, отметим следующее. Экспериментально наблюдаемый спектр элементарных возбуждений достигает порогового значения при  $q \sim 3\text{Å}^{-1}$  имея энергию, чуть большую  $2\Delta$ . В связи с тем, что продолжение ветви двухротонного связанного состояния в сторону больших импульсов имеет энергию  $\epsilon > 2\Delta$ , можно предположить, что при  $q \sim 3\text{Å}^{-1}$  эта ветвь идет рядом с затухающей при этом импульсе одноквазичастичной ветвью, имеющей энергию  $\epsilon = 2\Delta$  и "замешивается" в нее, приводя к эффективному завышению наблюдаемой передачи энергии. Более детальное исследование двухротонной ветви в области  $2 < q < 3 \text{ Å}^{-1}$  позволит проверить справедливость этого предположения.

Авторы благодарны Л.Н.Питаевскому за участие в обсуждении результатов, С.Н.Смольникову за техническую помощь во время эксперимента.

Поступила в редакцию

2 октября 1979 г.

## Литература

- [1] Н.М.Благовещенский, Е.Б.Докукин, Ж.А.Козлов, В.А.Парфенов. Письма в ЖЭТФ, 30, 14, 1979.
  - [2] V.G.Liforov et al. Res. Appl. Nucl. Pulsed Syst, Vienna 196, 1966.
  - [3] Л.П.Питаевский. Письма в ЖЭТФ, 12, 118, 1970; Л.П.Питаевский, И.А.Фомин. ЖЭТФ, 65, 2516, 1973.
  - [4] Е.Б.Докукин, Ж.А.Козлов, В.А.Парфенов, А.В.Пучков. Письма в ЖЭТФ, 23, 497, 1976; ЖЭТФ, 6, 2273, 1978.
  - [5] T.I.Greytak et al. Phys. Rev. Lett., 25, 1547, 1970.
  - [6] A.Zawadowski, J.Ruvalds, J.Solana. Phys. Rev., A5, 399, 1972.
-