

Обнаружение сверхтекучей фазы в твердом гелии

И. В. Калинин¹⁾, Е. Кац⁺, М. Коза⁺, В. В. Лаутер*, Х. Лаутер⁺, А. В. Пучков

Физико-энергетический институт, 249033 Обнинск, Россия

⁺Institut Laue-Langevin, 38042 Grenoble, France

*Spallation Neutron Source, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee 37831, USA

Поступила в редакцию 6 мая 2008 г.

С помощью метода неупругого рассеяния нейтронов получены доказательства существования сверхтекучей жидкой фазы в поликристаллическом гелии, находящемся под давлением 51 бар при температуре ниже 0.2 К. При том же давлении и температуре 0.6 К сверхтекучая компонента отсутствует. Таким образом, обнаружен фазовый переход “твердый гелий – сверхтекучий гелий”. Исследованный образец твердого гелия получен в пористой среде (кремниевый аэрогель) методом блокировки капилляра. Форма структурного фактора сверхтекучей фазы свидетельствует о наличии кластеров или влиянии эффектов ограниченной геометрии. Полученные результаты могут быть использованы для объяснения явления потери момента инерции в твердом гелии (явление supersolidity, Nature, 2004).

PACS: 61.12.Ex, 67.40.–w

Возможность существования сверхтекучести в квантовом кристалле была обоснована теоретически более 30 лет назад [1, 2]. С тех пор не прекращались попытки обнаружить это явление экспериментально, и в 2004 г. они увенчались успехом [3]. С помощью классической методики с использованием торсионного осциллятора [4] было установлено изменение момента инерции твердого гелия, находящегося в пористом стекле (викор), происходившее скачком при температуре 0.2 К [3]. Твердый гелий в викоре находился под давлением 62 бар, что, по словам авторов, надежно обеспечивало отсутствие жидкой фазы. Объяснение обнаруженного эффекта supersolidity, основанное на предположении о бозе-конденсации вакансий и возникновении сверхтекучести в твердом состоянии, предложенное авторами [3], было встречено неоднозначно и в настоящее время является лишь одним из возможных. Подтверждение эффекта в последующих измерениях [5–7] и независимых экспериментах [8, 9], включая объемный поликристаллический и монокристаллический твердый гелий, не добавило ясности в вопросе о природе эффекта. Исследование микро- и макрохарактеристик твердого гелия при сверхнизких температурах другими методами [10–14] и расчетно-теоретические исследования [15–17] также не решили проблемы [18]. По-прежнему непонятны ни механизм возникновения сверхтекучести, ни ее носители. Новые экспериментальные результаты, полученные в настоящей ра-

боте, могут существенно сократить количество возможных вариантов объяснения эффекта supersolidity и дать ключ к его пониманию.

Использование метода рассеяния нейтронов для исследования жидкого гелия [19, 20] стало классическим примером эффективности метода и, в частности, блестяще подтвердило вид дисперсионной кривой, предложенной Ландау [21]. С того времени наши представления о природе спектра возбуждений жидкого гелия и его связи с явлениями сверхтекучести и бозе-конденсации претерпели значительные изменения, но по-прежнему наличие в системе возбуждений с дисперсией типа кривой Ландау означает наличие в системе сверхтекучести. К настоящему времени хорошо исследована температурная зависимость структурного динамического фактора жидкого гелия [см. например, 22], а, также гелия, помещенного в различные пористые среды [23], определены параметры поверхностных возбуждений в тонких пленках гелия, адсорбированных различными поверхностями [24, 25]. Поэтому закономерно возникло предложение использовать метод рассеяния нейтронов для исследования твердого гелия в supersolid-состоянии на наличие в нем бездиссипативного движения.

Эксперимент выполнен на спектрометре неупругого рассеяния нейтронов ИН6 [26] (ИЛЛ, Гренобль). В качестве пористой среды вместо викора был использован более удобный с методической точки зрения кремниевый аэрогель с 95%-ной пористостью. Пористая среда была использована для усиления возможных поверхностных эффектов, и ее влияние на

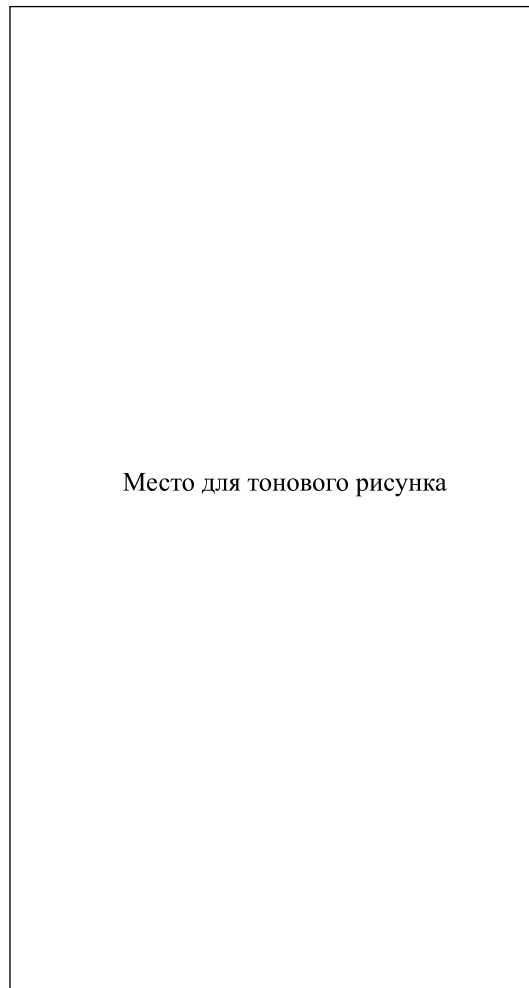
¹⁾e-mail: kaliv@ippe.ru

обнаруженный эффект еще предстоит выяснить. Газообразный гелий высокой чистоты конденсировался в медный цилиндрический контейнер объемом 50 см^3 , заполненный аэрогелем. Известно, что для затвердевания гелия, помещенного в пористую среду, необходимо приложить значительно большее давление, чем для затвердевания объемного гелия. Давление, созданное методом блокировки капилляра, составляло $P = 51$ бар. Величина давления определялась по положению дифракционных пиков ГПУ-решетки твердого гелия. Измерения были проведены при $T = 0.05; 0.1; 0.2$ и 0.6 К. Экспериментальные спектры в представлении карты интенсивности показаны на рис.1. Такое представление несет в себе всю информацию о структурном динамическом факторе $S(\mathbf{Q}, \epsilon)$ в доступном в эксперименте диапазоне динамических переменных – передачи импульса нейтрона \mathbf{Q} и энергии ϵ при рассеянии. Оттенками серого цвета показана интенсивность рассеяния. Спектры рассеянных нейтронов, полученные при температурах $0.05\text{--}0.2$ К, идентичны в пределах экспериментальных ошибок, поэтому для сравнения с $T = 0.6$ К на рис.1 использован только спектр, полученный при $T = 0.2$ К. Результаты анализа спектров не оставляют сомнения в том, что при $T \leq 0.2$ К в образце присутствует сверхтекучий гелий, свидетельством чему являются четко определенные возбуждения с дисперсией, характерной для сверхтекучей жидкости (кривая Ландау). При $T = 0.6$ К сверхтекучая фаза полностью отсутствует. Таким образом, обнаружен фазовый переход “твердый гелий – сверхтекучий гелий” в интервале температур²⁾ $0.2\text{--}0.6$ К.

Подробный анализ спектров при фиксированных значениях передачи импульса \mathbf{Q} позволяет проследить наличие “сверхтекучих” возбуждений при $T \leq 0.2$ К и их полное отсутствие при $T = 0.6$ К во всем доступном в эксперименте диапазоне \mathbf{Q} (рис.2).

На рис.3 приведен результат вычитания спектра, полученного при $T = 0.6$ К из спектра при $T = 0.2$ К. Разностный спектр удобно использовать для дальнейшего анализа обнаруженной фазы, так как из него автоматически удалено рассеяние, не связанное со сверхтекучим гелием. Обращает на себя внимание отсутствие поверхностного ротона, возбуждения, хорошо наблюдаемого в эксперименте при $0.05 \text{ К} \leq T \leq 0.6 \text{ К}$. Это означает, что поверхностный ротон не меняется с температурой и, соответственно, исчезает

²⁾ Недавно на сайте <http://arxiv.org> появился материал о наблюдении жидкостно-подобной ветви в монокристаллическом гелии, которую авторы связали с делокализованной вакансионной модой. Информация о наличии точки фазового перехода и анализ структурного фактора не приводятся [30].



Место для тонового рисунка

Рис.1. Экспериментальные спектры нейтронов, рассеянных твердым гелием в аэрогеле при давлении 51 бар и температуре 0.6 К (а) и 0.2 К (б), представленные в виде карт интенсивности. 1 – рассеяние на твердом гелии, 2 – рассеяние на сверхтекучем гелии, соответствующее кривой Ландау. Точечное рассеяние на поверхностном ротоне, существующем на границе “подложка (аэрогель) – гелий” и хорошо наблюдаемом в эксперименте

ет при вычитании спектров. Это указывает на то, что граница раздела “аэрогель – гелий” не изменяется в процессе возникновения сверхтекучей фазы.

Ширина пиков, отвечающих рассеянию на фоновых возбуждениях, соответствует ширине функции разрешения спектрометра, это означает, что время жизни возбуждений велико, что характерно только для сверхтекучей жидкости. Положение пиков, то есть энергия возбуждений, соответствует характерным значениям для сверхтекучего гелия под давлением и показано на рис.4.

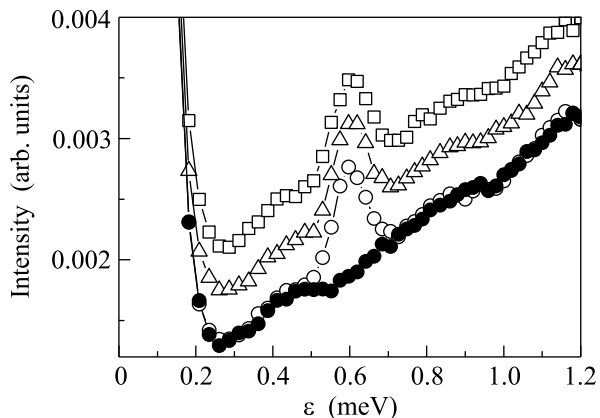


Рис.2. Спектры нейтронов, рассеянных твердым гелием при передаче импульса $Q = 2.1 \text{ \AA}^{-1}$. Светлыми символами показаны спектры для $T = 0.05; 0.1$ и 0.2 К (для наглядности разнесены на постоянную величину), а черными – при $T = 0.6 \text{ К}$. Слева – крыло упругого пика, связанного с рассеянием на твердом гелии и контейнере

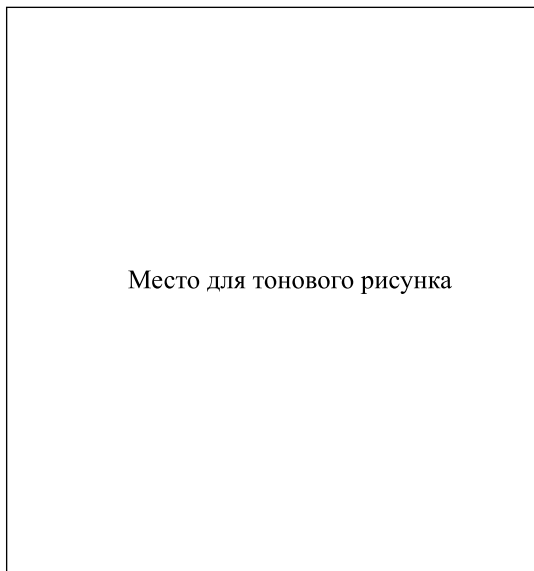


Рис.3. Результат вычитания спектра, полученного при $T = 0.6 \text{ К}$ из спектра при $T = 0.2 \text{ К}$. Фон из черных и белых точек состоит из нулевых (черные) и отрицательных (белые) значений интенсивности

Наконец, амплитуда пиков, или интенсивность рассеяния, прямо связанная со структурным фактором, несет информацию о пространственной организации флуктуаций плотности (рис.5).

Структурный фактор обнаруженной сверхтекучей фазы, как и следовало ожидать [29], смещен в сторону больших значений переданного импульса по сравнению с жидким гелием при давлении насыщенных паров. Примечательно, что он имеет немоно-

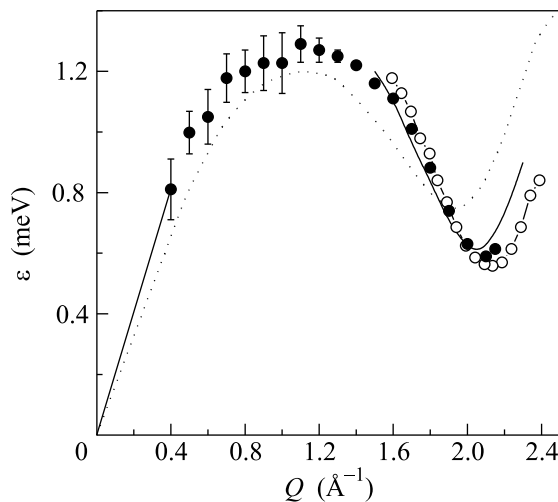


Рис.4. Сравнение дисперсионной кривой сверхтекучей фазы (черные кружки) с данными для: 1) жидкого объемного гелия при давлении насыщенных паров и $T = 1 \text{ К}$ (точечная линия) [27]; 2) жидкого объемного гелия под давлением 24 бар и $T = 1.3 \text{ К}$ (сплошная кривая) [22]; 3) гелия в пористом стекле гелсил при давлении 37.9 бар и $T = 0.4 \text{ К}$ (светлые кружки) [28]

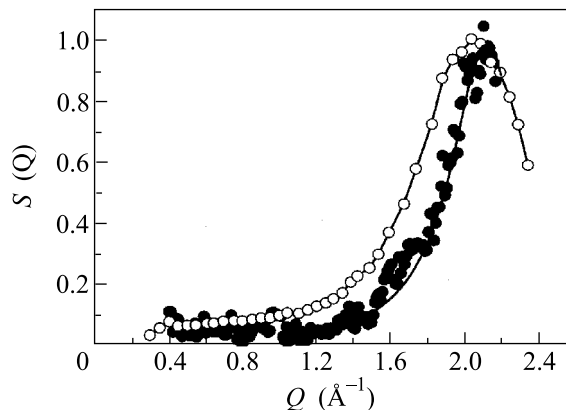


Рис.5. Сравнение структурного фактора обнаруженной сверхтекучей фазы (черные кружки) и $S(Q)$ жидкого гелия при температуре 0.5 К и давлении насыщенных паров [29]. Максимумы спектров нормированы на единицу. Сплошная кривая проведена по заполненным кружкам на глаз, чтобы подчеркнуть немо-

нотонный характер в области $Q \sim 1.6 \text{ \AA}^{-1}$, что в прямом пространстве соответствует величине $\sim 4 \text{ \AA}$. Такое поведение структурного фактора может быть вызвано либо наличием кластеров, среднее расстояние между которыми имеет такой характерный размер, либо влиянием ограниченной геометрии, в данном случае формируемой аэрогелем.

Таким образом, методом неупругого рассеяния нейтронов установлено, что в твердом гелии, созданном в пористой среде и находящемся при давлении 51 бар, при температурах $0.05 \text{ К} < T < 0.2 \text{ К}$ существует сверхтекучая фаза жидкого гелия. При температуре 0.6 К сверхтекучая фаза отсутствует и гелий находится в твердом состоянии. Обнаруженное явление имеет место при сходных с явлением supersolidity давлением и температуре, что может быть использовано для объяснения последнего.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект # 07-02-96401).

1. A. F. Andreev and I. M. Lifshitz, *Sov. Phys JETP* **29**, 1107 (1969).
2. A. J. Leggett, *Phys. Rev. Lett.* **25**, 2543 (1970).
3. E. Kim and M. H. W. Chan, *Nature (London)* **427**, 225 (2004).
4. E. L. Andronikashvili, *Zh. eksp. Fiz.* **16**, 780 (1946).
5. E. Kim and M. H. W. Chan, *Science* **305**, 1941 (2005).
6. A. C. Clark and M. H. W. Chan, *J. Low Temp. Phys.* **138**, 853 (2005).
7. E. Kim and M. H. W. Chan, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 115302 (2006).
8. M. Kondo et al., *J. Low Temp. Phys.* **148**, 695 (2007).
9. A. Penzev, Y. Yasuta, and M. Kubota, *J. Low Temp. Phys.* **148**, 677 (2007).
10. E. Blackburn et al., *Phys. Rev. B* **76**, 024523 (2007).
11. I. A. Todoshchenko et al., *JETP Lett.* **85**, 454 (2007).
12. A. S. Rittner and J. D. Reppy, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 175302 (2007).
13. V. N. Grigor'ev, et al., *Phys. Rev. B* **76**, 224524 (2007).
14. Y. Mukharsky, O. Avenel, and E. Varoquaux, *J. Low Temp. Phys.* **148**, 689 (2007).
15. M. Boninsegni, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 80401 (2006).
16. A. F. Andreev, *JETP Lett.* **85**, 585 (2007).
17. N. Prokof'ev and B. Svistunov, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 155302 (2005).
18. S. Balibar and F. Caupin, *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 173201 (2008).
19. H. Palevsky, K. Otnes, and K. E. Larsson, *Phys. Rev.* **112**, 11 (1958).
20. M. Cohen and R. P. Feynman, *Phys. Rev.* **107**, 13 (1957).
21. L. D. Landau, *J. Phys. USSR* **11**, 91 (1947).
22. O. W. Dietrich et al., *Phys. Rev. A* **5**, 1377 (1972).
23. H. R. Glyde et al., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 2646 (2000).
24. H. J. Lauter, H. Godfrin, and V. L. P. Frank, *NATO ASI B* **257**, 419 (1991), (Plenum).
25. I. V. Kalinin et al., *Crystallography Rep.* **52**, 466 (2007).
26. <http://www.ill.eu/in6/home/>.
27. I. V. Kalinin, H. Lauter, and A. V. Puchkov, *JETP* **105**, 138 (2007).
28. J. V. Pearce et al., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 145303 (2004).
29. M. R. Gibbs et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **11**, 603 (1999).
30. E. Blackburn et al., *Cond. Mat.-Stat.-Mech*, arXiv: **3587**, 0802 (2008).