

**Фазовая диаграмма  $^3\text{He}$  в “нематически упорядоченном” аэрогеле высокой плотности**

В.В. Дмитриев<sup>1</sup>, Д.В. Золотухин<sup>1,2</sup>, А.А. Солдатов<sup>1,2</sup>, А.Н. Юдин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физических проблем им. П.Л. Капицы Российской академии наук

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

В объемном сверхтекучем  $^3\text{He}$  в изотропном пространстве температура сверхтекучего перехода ( $T_c$ ) и свободная энергия вырождены по отношению к трем проекциям орбитального углового момента и трем проекциям спина. В теории возможны 18 сверхтекучих фаз, отличающихся параметром порядка. Но в действительности реализуются только те, которые имеют минимальную свободную энергию, а именно, А и В фазы. Вырождение по проекциям спина снимается магнитным полем. В этом случае реализуется  $A_1$  фаза в узком интервале температур рядом с  $T_c$  [1]. Вырождение по проекциям орбитального момента может быть снято введением в объем  $^3\text{He}$  высокопористого анизотропного аэрогеля, играющего роль анизотропных примесей. Примером такого аэрогеля является нафен (Рис. 1) – “нематически упорядоченный” аэрогель, состоящий из нитей диаметром  $\approx 9$  нм из кристаллического  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ориентированных вдоль одного направления [2] (коммерчески производится компанией ANF Technology Ltd). Нафен имеет плотность  $\approx 72\text{--}243$  мг/см<sup>3</sup>, пористость  $\approx 93.8\text{--}98.2\%$  и расстояние между нитями  $\approx 30\text{--}50$  нм. Теоретически предсказано, что в такого типа аэрогеле может стабилизироваться новая сверхтекучая фаза – полярная фаза [3]. В недавних экспериментах с жидким  $^3\text{He}$  в нафене это было подтверждено [4]. Нити нафена при этом необходимо покрывать  $\approx 2.5$  монослоями  $^4\text{He}$ , чтобы создать зеркальные граничные условия для отражения квазичастиц  $^3\text{He}$  от поверхности аэрогеля [5]. В итоге получено, что в нафене плотностью от 72 до 243 мг/см<sup>3</sup> вблизи  $T_c$  реализуется полярная фаза (Рис. 2).

Здесь мы представляем результаты экспериментов с  $^3\text{He}$  в сильно более плотном образце нафена (предварительно покрытом  $\approx 2.5$  монослоями  $^4\text{He}$ ). Он был получен из образца нафена плотностью  $\approx 72$  мг/см<sup>3</sup> в результате высыхания после погружения в воду (Рис. 3). Степень линейного сжатия поперек нитей данного образца составляет  $\approx 3.5$ , плотность  $\approx 880$  мг/см<sup>3</sup>, пористость  $\approx 77.7\%$ , а расстояние между нитями  $\approx 15$  нм. Было обнаружено, что  $^3\text{He}$  в этом образце нафена переходит в сверхтекучее состояние при значительно более низких температурах по сравнению со случаями менее плотных образцов нафена, причем единственной наблюдаемой сверхтекучей фазой  $^3\text{He}$  является полярная (Рис. 4). Стоит отметить, что в изотропном кремниевом аэрогеле (имеющем нити толщиной  $\sim 1\text{--}10$

нм, которые хаотически распределены по пространству)  $^3\text{He}$  остается нормальным при любых температурах и давлениях, если его пористость меньше  $\approx 96\%$ .

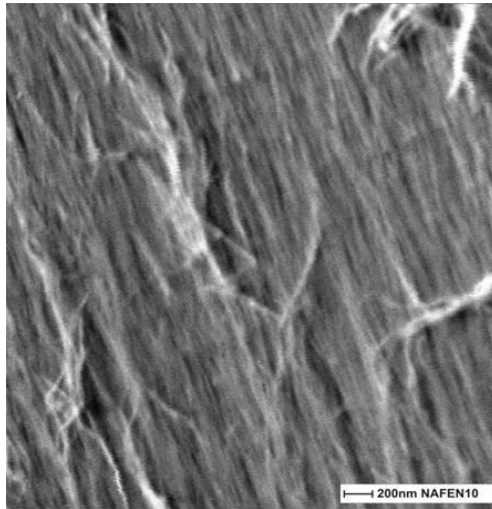


Рис. 1. Фотография поверхности нафена плотностью  $90 \text{ мг/см}^3$ , сделанная с помощью сканирующего электронного микроскопа.

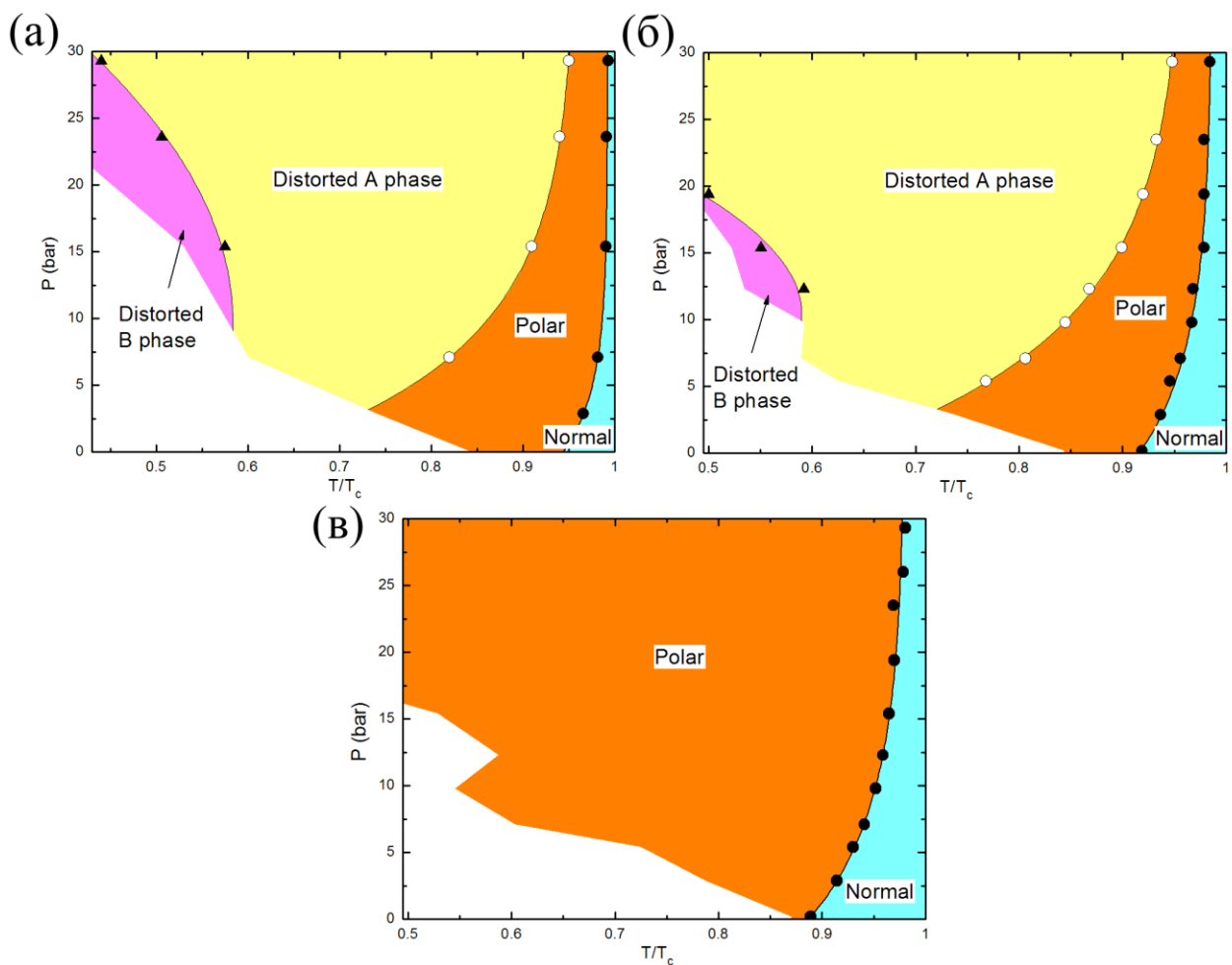


Рис. 2. Фазовые диаграммы сверхтекучего  $^3\text{He}$  в нафене: а) плотностью  $72 \text{ мг/см}^3$ , б) плотностью  $90 \text{ мг/см}^3$ , в) плотностью  $243 \text{ мг/см}^3$ . Нити аэрогеля предварительно покрывались  $\approx 2.5$  монослоями  $^4\text{He}$ . Заполненными кружками обозначен сверхтекучий

переход  $^3\text{He}$  в нафене, открытыми кружками – переход из полярной фазы в А фазу с полярным искажением, заполненными треугольниками – начало перехода из А фазы с полярным искажением в В фазу на охлаждении.

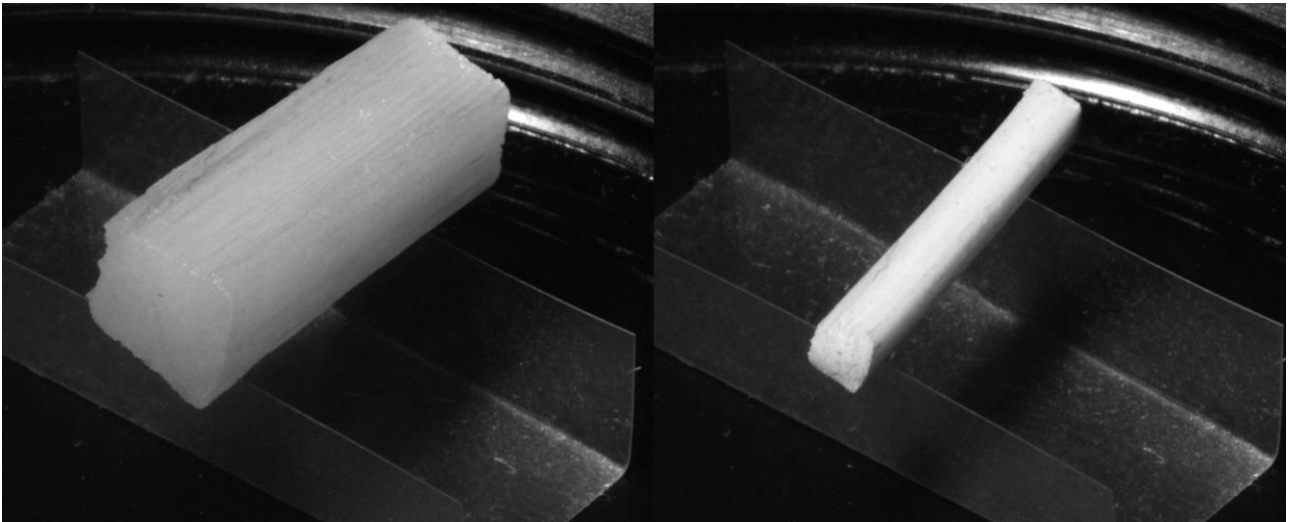


Рис. 3. Фотографии образца нафена, полностью смоченного водой, (слева) и после сушки (справа).

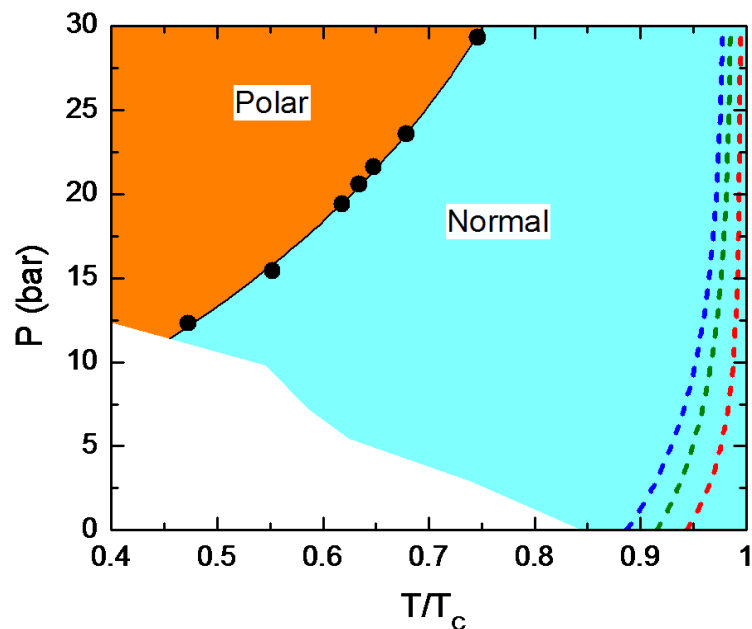


Рис. 4. Фазовая диаграмма сверхтекучего  $^3\text{He}$  в нафене плотностью  $880 \text{ мг/см}^3$ : а) плотностью  $72 \text{ мг/см}^3$ , б) плотностью  $90 \text{ мг/см}^3$ , в) плотностью  $243 \text{ мг/см}^3$ . Нити аэрогеля предварительно покрывались  $\approx 2.5$  монослоями  $^4\text{He}$ . Заполненными кружками и черной сплошной кривой обозначен сверхтекучий переход  $^3\text{He}$  в данном образце. Красной, зеленой

и синей пунктирными линиями показан сверхтекучий переход в нафене плотностью 72, 90 и 243 мг/см<sup>3</sup> соответственно.

#### Литература

1. *Vollhardt D., Wölfle P.* The Superfluid Phases of Helium 3. – London: Taylor & Francis, 1990. – 560 p.
2. *Асадчиков В.Е. [et al.]* Структура и свойства "нематически упорядоченных" аэрогелей. – Письма в ЖЭТФ. – 2015. – V. 101. – P. 613.
3. *Aoyama K., Ikeda R.* Anisotropic strong coupling effects in superfluid <sup>3</sup>He in aerogel. – Phys. Rev. B. – 2006. – V. 73. – P. 060504.
4. *Dmitriev V.V. [et al.]* Polar phase of superfluid <sup>3</sup>He in anisotropic aerogel. – Phys. Rev. Lett. – 2015. – V. 115. – P. 165304.
5. *Freeman M.R., Richardson R.C.* Size effects in superfluid <sup>3</sup>He films. – Phys. Rev. B. – 1990. – V. 41. – P. 11011.