

## ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА СПИНОВО ПОЛЯРИЗОВАННЫХ РАСТВОРОВ $^3\text{He} - ^4\text{He}$

А.Э.Мейерович

Обсуждаются возможность получения и свойств необычных фаз твердого и жидкого  $^3\text{He} - ^4\text{He}$ , находящегося в равновесии со спиново поляризованным  $^3\text{He}$ .

1. В настоящее время интенсивно проводятся экспериментальные и теоретические исследования спиново поляризованного  $^3\text{He}$ . С помощью изящного метода <sup>1</sup> удалось получить жидкий  $^3\text{He} \uparrow$ , поляризованный более чем на 20% <sup>2</sup>. Столь высокая степень поляризации должна приводить к заметному отличию фазовой диаграммы  $^3\text{He} \uparrow$  <sup>1,3</sup> (например, изменению растворимости  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  <sup>3</sup>) от неполяризованного  $^3\text{He}$  <sup>4</sup>. Целью работы является выяснение влияния поляризации  $^3\text{He}$  на фазовое равновесие  $^3\text{He} \uparrow / ^3\text{He} \downarrow - ^4\text{He}$  и описание различных возможных фаз.

В доступных стационарных полях  $H \lesssim 100$  кЭ энергия  $\beta H$  ( $\beta = 0,08$  мК/кЭ – магнитный момент ядра  $^3\text{He}$ ) намного меньше характерных значений энергии на частицу  $^3\text{He}$  в жидком  $^3\text{He}$  (более 1К) и находящемся с ним в равновесии растворе  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  (более 0,1К). Поэтому мы не будем учитывать возможное присутствие внешнего магнитного поля и будем считать, что поляризация создается, например, <sup>1</sup> плавлением спиново поляризованного кристалла  $^3\text{He} \uparrow$ .

Время релаксации  $\tau_d$ , за которое устанавливается равновесное распределение частиц по направлению спина, определяется в  $^3\text{He}$  слабым ядерным дипольным взаимодействием (или столкновениями со стенками) и превосходит в  $^3\text{He}$  и  $^3\text{He} - ^4\text{He}$  десятки минут. За времена меньшие  $\tau_d$  системы атомов  $^3\text{He}$  с различными проекциями спинов (+ и -) ведут себя как

две независимые компоненты с сохраняющимся числом частиц в каждой компоненте. Условия равновесия чистого  ${}^3\text{He}\uparrow$  и  ${}^3\text{He}\uparrow - {}^4\text{He}$  имеют вид  $\mu_1^+ = \mu_2^+$ ,  $\mu_1^- = \mu_2^-$  (индексы 1, 2 относятся к химическим потенциалам  $\mu$  атомов  ${}^3\text{He}$  в чистом  ${}^3\text{He}$  и растворе) при постоянных полном числе атомов  ${}^3\text{He}$  в системе  $N = N_1^+ + N_1^- + N_2^+ + N_2^-$  и степени поляризации  $P = (N_1^+ + N_2^+ - N_1^- - N_2^-) / N$ . Поскольку энергетические масштабы в обеих фазах значительно отличаются друг от друга, то и поляризация по-разному влияет на  $\mu_1^\pm$  и  $\mu_2^\pm$ . Условия равновесия  $\mu_1^\pm(P_1) = \mu_2^\pm(P_2)$  удовлетворяются при не равных степенях поляризации  $P_{1,2} = (N_{1,2}^+ - N_{1,2}^-) / N_{1,2}$  обеих фаз, а равновесная концентрация  ${}^3\text{He}$  в растворе  $N_2/N_2 + N_4$  также зависит от  $P_{1,2}$ . Влияние поляризации на фазовое равновесие легко проследить количественно при слабой поляризации, когда изменение энергии квадратично по  $P$ . При этом

$$P_{1,2} = P \frac{\chi_{1,2} N}{\chi_1 N_1 + \chi_2 N_2}, \quad P_1 / P_2 = \chi_1 / \chi_2,$$

где  $\chi_{1,2}$  — восприимчивости (на одну частицу  ${}^3\text{He}$ ) в чистом  ${}^3\text{He}$  и растворе. Поскольку распределение атомов  ${}^3\text{He}$  между чистой фазой и раствором  $N_1/N_2$  зависит от отношения числа атомов  ${}^3\text{He}$   $N$  и  ${}^4\text{He}$   $N_4$  в системе, то варьируя  $N/N_4$  можно легко менять  $P_{1,2}$ . Основная трудность решения уравнений фазового равновесия в сильно поляризованной системе связана с отсутствием информации о зависимости  $\mu_1^\pm(P_1)$  для жидкого  ${}^3\text{He}$ ; для разреженных фаз  ${}^3\text{He}$   $\mu(P)$  известно при любой поляризации.

2. Поскольку при низких температурах  $T$  восприимчивость твердого  ${}^3\text{He}$  намного больше, чем в жидкой фазе, плавление кристалла  ${}^3\text{He}$  происходит при давлении на несколько атмосфер ниже, чем в отсутствие поляризации  ${}^1, {}^3$ . Для фазовой диаграммы растворов принципиально важно, оказывается давление кристаллизации чистого  ${}^3\text{He}$  ниже или выше, чем у кристалла  ${}^4\text{He}$ . В обоих случаях возникают необычные фазы раствора. В первом случае в равновесии находились бы кристалл  ${}^3\text{He}\uparrow$  и жидкий раствор  ${}^3\text{He} - {}^4\text{He}$  (в неполяризованной системе твердый  ${}^3\text{He}$  не может находиться в равновесии с раствором  ${}^3\text{He} - {}^4\text{He}$ ), причем при полной поляризации  ${}^3\text{He}$  концентрация раствора примерно вдвое ниже, чем предельная концентрация  ${}^3\text{He}$  в неполяризованном растворе при повышенных давлениях. При частичной поляризации  ${}^3\text{He}$  поляризация кристалла  ${}^3\text{He}\uparrow$  будет намного выше, чем у  ${}^3\text{He} - {}^4\text{He}$  ( $\chi_1 / \chi_2 \sim 100$ ).

Однако существенно больший интерес представляет вторая возможность, являющаяся также и более вероятной. В отсутствие поляризации кристалл  ${}^3\text{He} - {}^4\text{He}$  полностью расслаивается на чистые компоненты при  $T_c \sim 0,1\text{K}$ . Поляризация жидкого  ${}^3\text{He}$  приводит к очень значительному (по сравнению с  $T_c$ ) увеличению  $\mu_1^+$ . Это означает, что при достижении некоторого критического значения степени поляризации (пороговое значение  $\delta\mu_1^+ \sim 0,1\text{K}$ ) на кривой равновесия жидкий  ${}^3\text{He}\uparrow -$  кристалл  ${}^4\text{He}$  расслаивание на чистые фазы пропадает, и оказывается возможным существованием твердого раствора  ${}^3\text{He}\uparrow - {}^4\text{He}$  с конечной концентрацией  ${}^3\text{He}$  при сколь угодно низких температурах. Простейшая оценка порогового значения поляризации, полученная экстраполяцией данных о восприимчивости жидкого  ${}^3\text{He}$  в слабых полях, дает значение  $P_c \sim 0,2 - 0,3$ . При этом примесная компонента в кристалле  ${}^3\text{He}\uparrow - {}^4\text{He}$  полностью поляризована, а концентрация  ${}^3\text{He}$  в твердом  ${}^4\text{He}$  задается значениями  $P - P_c$ ,  $N/N_4$  и взаимодействием примесных атомов  ${}^3\text{He}$  между собой. Наблюдение конечной растворимости  ${}^3\text{He}\uparrow$  в твердом  ${}^4\text{He}$  позволит впервые исследовать примесные квазичастицы в квантовых кристаллах в условиях, когда температура окажется сравнимой с шириной зоны примесных квазичастиц  $\Delta_f$  (для квазичастиц  ${}^3\text{He}$  в твердом  ${}^4\text{He}$   $\Delta_f \sim 10^{-3} - 10^{-4}\text{K}$ ) и может дать возможность для изучения упорядочения в примесной системе.

3. При дальнейшем понижении давления жидкий  ${}^3\text{He}\uparrow$  будет находиться в равновесии с жидким раствором  ${}^3\text{He}\uparrow - {}^4\text{He}$ . Зависимость  $\mu_2(P_2)$  вплоть до предельных концентраций раство-

ра хорошо описывается разложением <sup>5</sup>

$$\mu_2^{\pm}(P_2) = -\Delta + \frac{(6\pi^2 \hbar^3)^{2/3} \left( \frac{N_2}{2V_2} \right)^{2/3}}{2M} (1 \pm P_2)^{2/3} + \frac{4\pi a \hbar^2}{M} \frac{N_2}{2V_2} (1 \mp P_2) + \dots$$

Значения входящих сюда параметров ( $V_2$  — объем раствора,  $\Delta$  — энергия связи,  $M$  — эффективная масса,  $a$  — длина  $s$ -рассеяния) таково, что для отношения степеней поляризации получается оценка  $P_2/P_1 \sim 3$ . Явление усиления поляризации при растворении может оказаться весьма существенным для эксперимента: уже при современных возможностях поляризации  $^3\text{He}^2$  в равновесии с  $^3\text{He}$  можно получить практически полностью поляризованный раствор, что дает возможность экспериментальной проверки теории <sup>5</sup>. Поляризация  $^3\text{He}$  меняет и предельную растворимость  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ , находящемся в равновесии с  $^3\text{He}$ . Оценка предельной концентрации полностью поляризованного раствора на основе концентрационного разложения для  $\mu_2$  дает  $c/c_0 \sim 3 \div 4$ , где  $c_0$  — предельная концентрация в отсутствие поляризации. В результате оказывается возможным существование довольно концентрированного раствора  $^3\text{He}$  —  $^4\text{He}$ , представляющего собой ферми-жидкость со свойствами, принципиально отличающимися как от чистого  $^3\text{He}$ , так и от слабых растворов  $^3\text{He}$  —  $^4\text{He}$  <sup>5</sup>. Температура перехода  $^3\text{He}$  в таком концентрированном растворе в сверхтекучее состояние в случае  $p$ -спаривания (в поляризованном растворе  $s$ -спаривание невозможно) должна превышать  $10^{-5}$  К.

#### Литература

1. *Castaing B., Nozieres P.* J. Phys. (Paris), 1979, **40**, 257.
2. *Chapellier M., Frossati G., Rasmussen F.B.* Phys. Rev. Lett., 1979, **42**, 1904. *Schumacher G., et al.* Phys. Lett.(Paris) 1979, **40**, L143.
3. *Lhuillier C., Laloë F. J.* Phys. (Paris), 1979, **40**, 239.
4. *Есельсон Б.Н., Григорьев В.Н., Иванцов В.Г., Рудаковский Э.Я., Санкидзе Д.Г., Сербин И.А.* Растворы квантовых жидкостей  $\text{He}^3$  —  $\text{He}^4$ . М.: Наука; 1973; *Trickey S., Kirk W., Adams E.* Rev. Mod. Phys. 1972, **44**, 668.
5. *Bashkin E.P., Meyerovich A.E.* Adv. Phys. 1981, **30**, 1.