

НЕРАВНОВЕСНАЯ СПИНОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЖИДКОГО ^3He И РАСТВОРОВ $^3\text{He} - ^4\text{He}$

А.Э.Мейерович

Обсуждаются нетрадиционные способы получения жидких фаз ^3He с сильной неравновесной спиновой поляризацией. Сделана оценка времени деполяризации таких систем.

Спиново поляризованные квантовые системы ^3He уже существенно изучены теоретически (см., например, обзоры ¹), но экспериментальная информация пока не очень обширна. Это связано с трудностью получения различных фаз $^3\text{He}\uparrow$. Внешним магнитным полем можно сильно поляризовать только твердый ^3He и разреженные растворы $^3\text{He} - ^4\text{He}$ при сверхнизких температурах. Для создания долгоживущих неравновесно поляризованных систем используется быстрое плавление твердого $^3\text{He}\uparrow$ ², оптическая накачка в газе ^3He ³ и динамическая поляризация жидкого ^3He ⁴. Ниже обсуждаются альтернативные методы поляризации ^3He , основанные на поляризации раствора $^3\text{He} - ^4\text{He}$ сильным магнитным полем с последующим быстрым выделением ^4He из смеси. Обсуждается также время жизни неравновесно поляризованных растворов $^3\text{He} - ^4\text{He}$.

1. Магнитным полем $H \lesssim 10$ Т сильно поляризуется раствор $^3\text{He} - ^4\text{He}$ с концентрацией ^3He $x \lesssim 0,1\%$ при $T \lesssim 10$ мК. После этого концентрацию ^3He можно заметно повысить практически при постоянной степени поляризации, быстро убрав значительную часть ^4He через сверхтекучую щель. Контроль концентрации и степени поляризации ^3He в растворе, а также измерение времени деполяризации, можно проводить по измерению осмотического давления. Разность осмотических давлений между двумя сообщающимися через сверхтекучую щель ячейками, содержащими вырожденные $T \ll T_0$ растворы $^3\text{He} - ^4\text{He}$ со степенями поляризации $\alpha_{1,2}$ и числом атомов ^3He в единице объема $n_{1,2}$ при не слишком больших концентрациях равна

$$P = P_0(n_1, \alpha_1) - P_0(n_2, \alpha_2), \quad P_0(n, \alpha) = (3\pi^2)^{2/3} (\hbar^2/10M)n^{5/3}.$$

$$\bullet [(1+\alpha)^{5/3} + (1-\alpha)^{5/3}] + (\pi a \hbar^2/M)n^2(1-\alpha^2),$$

где M и a — эффективная масса и длина s -рассеяния квазичастиц ^3He (при $T \gg T_0$ и $\pi a^3 \rightarrow 0$ $P_0(n, \alpha) \approx nT$ и практически не зависит от поляризации). При удалении ^4He из раствора через сверхтекучую щель температура раствора повышается; отношение конечной и начальной температур при $\alpha = \text{const}$ почти не зависит от α , $T_f/T_i \approx (x_f/x_i)^{2/3}$ ($x_{f,i}$ — конечная и начальная концентрации). Если при этом ^4He удаляется в емкость с концентрированным ^3He , то в этой емкости аналогичным образом происходит охлаждение.

2. Описанный выше метод создания неравновесной поляризации можно видоизменить, поляризовав в начале магнитным полем раствор с концентрацией ^3He x близкой к концентрации расслаивания на чистый ^3He и раствор с предельной концентрацией $x_c(\alpha)$ (в полях $H \lesssim 10$ Т исходная поляризация $\alpha \ll 1$). Если затем через сверхтекучую щель быстро убирать

^4He , то с достижением концентрации $\chi_c(\alpha)$ начинается расслаивание, причем поляризации обеих возникающих фаз связаны с исходной поляризацией α соотношением (при $\alpha_{1,2} \ll 1$)

$$\alpha_{1,2} = \alpha \chi_{1,2} N / (\chi_1 N_1 + \chi_2 N_2), \quad \alpha_1 / \alpha_2 = \chi_1 / \chi_2,$$

где индексы (1, 2) относятся к чистому ^3He и раствору, $\chi_{1,2}$ — восприимчивости на одну частицу ^3He , $N_{1,2} = n_{1,2} V_{1,2}$ — число атомов ^3He в каждой из фаз, $N = N_1 + N_2 = \text{const}$. Поскольку $\chi_1 \ll \chi_2$, то при удалении ^4He поляризация остающегося раствора растет, и в пределе $N_2 \ll N$, $N_1 \rightarrow N$ может достигнуть значения $\alpha_2 = \alpha \chi_2 / \chi_1 \gg \alpha$, а предельное значение поляризации чистой фазы $\alpha_1 (N_2 \rightarrow 0) = \alpha$ в $\chi_2 / \chi_1 \gg 1$ раз превосходит свое равновесное значение в том же поле. Поляризация ведет также к изменению предельной растворимости ^3He в ^4He ($\alpha_{1,2} \ll 1$):

$$\delta \chi_c(\alpha) = (\alpha^2 N^2 / 2) (\chi_2 - \chi_1) / (\chi_1 N_1 + \chi_2 N_2)^2 (\partial \mu_2 / \partial x)_P \quad (\alpha_{1,2} \ll 1).$$

Производную химического потенциала ^3He в растворе по его концентрации можно определить либо в теории слабых растворов ($\partial \mu / \partial x \sim (2/3) T_0 / x$), либо по экспериментальным данным о зависимости $\chi_c(P, T)$ (P — давление). Указанный сдвиг кривой расслаивания заметно превышает сдвиг кривой при равновесной поляризации в том же поле.

3. Еще один метод увеличения концентрации ^3He в растворе при постоянной поляризации связан с увеличением давления до величины, превышающей давление кристаллизации чистого ^4He , но меньшей давления кристаллизации ^3He . При этом кристаллизуется только ^4He , и, если граница раздела жидкость — кристалл движется медленнее скорости диффузии ^3He в жидком растворе, но быстрее скорости деполяризации, то весь ^3He остается в жидкой фазе и его концентрация растет при практически неизменной поляризации. В данном случае остается открытым вопрос, не приведет ли сильная поляризация к пороговому проникновению атомов ^3He в твердый ^4He даже при низких температурах⁵.

4. Возможность проведения описанных экспериментов ограничена временем деполяризации спиновой системы. Основным механизмом деполяризации слабых растворов при низких температурах является магнитная релаксация на стенках ячейки. В отсутствие конвекции соответствующее время определяется спиновой диффузией $\tau \sim L^2 / Dw$ или, при большой длине пробега, временем пролета (L — характерный размер ячейки, w — вероятность переворота спина при столкновении со стенкой). Численно коэффициент спиновой диффузии $D \sim 10^2 x^{2/3} / a^2 T^2$ см²/с, а длина пробега $l \sim 10^{-1} x^{1/3} / a^2 T^2$ см (здесь a измеряется в Å, T — в мК); при сильной поляризации длина пробега еще заметно больше.

Оценим нижний предел τ . Наименьшие времена τ отвечают случаю $T < 1$ мК, когда $l \gg L$. Нас интересует высокая неравновесная степень поляризации $T/T_0 \ll \alpha \lesssim 1$, когда для неупругого рассеяния на стенке не возникают множители T/T_0 . Переворот спина квазичастицы ^3He может произойти в результате магнитного дипольного взаимодействия с электронным парамагнитным центром на стенке. При атомной концентрации таких центров время деполяризации в баллистическом режиме $T \lesssim 1$ мК является величиной секундного масштаба, если не учитывать наличие узкого барьера (слоя практически чистого ^4He) на стенке. Возможны также косвенные процессы, связанные с наличием небольшого числа подвижных атомов ^3He в затвердевшем тонком слое гелия на стенке. Такие атомы сильно магнитно связаны с парамагнитными центрами на стенке (или ядрами ^{19}F) и обменным образом эффективно взаимодействуют с квазичастицами ^3He в объеме. Число таких атомов убывает с температурой как $\exp(-\Delta/T)$; если $\Delta \gtrsim 0,1$ К, то соответствующие процессы при $T \lesssim 1$ мК несущественны. При $\Delta \lesssim 10$ мК косвенные процессы становятся определяющими, τ резко падает и экспоненциально зависит от температуры.

Таким образом, больших значений τ следует ожидать либо при не очень низких температурах $T \gtrsim 10$ мК (малые пробеги) в отсутствие заметной конвекции, либо, что лучше, при

надежной магнитной защите стенок. Для этого, по-видимому, наиболее удобна конденсация на стенках нескольких слоев молекулярного водорода.

Выражаю благодарность Ю.Ануфриеву, Ф.Лале¹⁾ (F.Laloë) и М.Шапелье (M.Chapellier) за конструктивные обсуждения.

Литература

1. *Meyerovich A.E.* Spin-Polarized $^3\text{He} - ^4\text{He}$ Solutions. In: Prog. Low Temp. Phys., ed. D.F.Brewer (North Holland, Amsterdam) 1987, v.11, p. 1; *Meyerovich A.E.* Spin-Polarized Phases of ^3He . In: Anomalous Phases of ^3He , eds. W.P.Halperin, L.P.Pitaevski (North Holland, Amsterdam) to be published.
2. *Castaing B., Nozieres P.* J. Phys. (Paris), 1979, **40**, 257; *Shumacher G., Thoulouze D., Castaing B., Chabre Y., Segransan P., Joffrin J.* J. Phys. (Paris) Lett., 1979, **40**, L143; *Chapellier M., Frossati G., Rasmussen F.B.* Phys. Rev. Lett., 1979, **42**, 904; *Godfrin H., Frossati G., Greenberg A.S., Hebral B., Thoulouze D.* Phys. Rev. Lett., 1980, **44**, 1695; *Bonfait G., Puech L., Greenberg A.S., Eska G., Castaing B., Thoulouze D.* Phys. Rev. Lett., 1984, **53**, 1092; *Dutta A., Archie C.N.* Phys. Rev. Lett., 1985, **55**, 2949.
3. *Leduc M., Nacher P.J., Crampton S.B., Laloë F.* Nuclear Polarization of ^3He Gas at Low-Temperatures by Optical Pumping. In: Quantum Fluids and Solids, eds. E.D.Adams, G.G. Ihas (Amer. Inst. Phys., New York), 1983, p. 179.
4. *Schuhl A., Maegawa S., Meisel N.M., Chapellier M.* Phys. Rev. Lett., 1985, **54**, 1952; *Saito S., Okuyama M., Satoh T.* Phys. Rev. Lett., 1985, **55**, 1757.
5. *Meyerovich A.E.* J. Low Temp. Phys., 1983, **53**, 487.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
4 июня 1987 г.