ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

LXVI 1978 5

УДК [548.0 : 53] + 530.145

ФИЗИКА

О. П. Анисимова, Г. А. Варданян

О структуре вакансий в растворе He^3-He^4

(Представлено чл.-корр. АН Армянской ССР Г. С. Саакяном 23/II 1978)

Поведение вакансий в твердом растворе He^3-He^4 при температурах T, удовлетворяющих условию $J \ll T \ll \Delta$ (где J — величина энергии обменного взаимодействия, Δ — ширина зоны) во многом аналогично поведению этих же квазичастиц в кристаллах He^3 ([1]). Если речь идет о слабом растворе He^4 частиц в He^3, то легко видеть, что каждая вакансия должна порождать в растворе макроскопическую область, в которой ядерные спины He^3 поляризованы и частицы He^4 из этой области вытеснены, в результате чего происходит делокализация вакансий. При том же термодинамическом состоянии на кривой расслоения соответствующая другой концентрации He^3 (т. е. в слабом растворе He^3-He^4) вакансия порождает область, из которой частицы He^3 вытеснены.

Картина здесь похожа ситуации об изменении термодинамического состояния при внесении в систему электрона ([2,3]), или растворяемого вещества в растворителе ([4]).

Пусть в объеме V имеется N_3 He^3 частиц и N_4 He^4. Число узлов $N = N_3 + N_4$. Концентрацию раствора назовем отношение $c = n_4/n_3$; предположим, что $c \ll 1$. Свободная энергия такой системы, когда вакансия порождает область объема v, в которой она делокализуется, будет:

$$F = \varepsilon_0 + \frac{\pi^2\hbar^2}{2mR^2} + n_3 v T \ln 2 + n_4(V-v)\left[T\ln\frac{n_4(V-v)}{e(n_3+n_4)V} + \psi(p, T)\right]. \qquad (1)$$

Функция $\psi(p, T)$ — описывает свойства твердого раствора. При небольших давлениях зависимость ψ от p не играет роли.

Свободная энергия раствора, в которой пока еще не существует делокализованная вакансия можно представить в виде:

$$F' = n_3\mu_3 + n_4 V T \ln\frac{n_4}{e n_3} + n_4\psi. \qquad (2)$$

В другой точке кривой расслоения $(1-c \ll 1)$, с тем же p и T, свободная энергия раствора, в которой вакансия вытесняет из объема v He^3 и делокализуется, будет:

$$F_1 = n_4\mu_4 + \frac{\pi^2\hbar^2}{2mR_1^2} + n_3(V-v)T\ln\frac{n_3(V-v)}{en_4V} + n_3(V-v)\psi_1, \quad (3)$$

а до образования такой области v:

$$F_1 = n_4\mu_4 + n_3VT\ln\frac{n_3}{en_4} + n_3V\psi_1. \quad (4)$$

Из условия минимальности написанных выражений (1) и (3) находим радиусы сферы.

В предположении, что $v \ll V$, $(n_3 + n_4 = 1/a^3)$:

$$R = \left(\frac{\pi\hbar^2a^3}{4mT\left|n_3a^3\ln 2-(1-n_3a^3)\right|\left|\ln\frac{1-n_3a^3}{e}\right| + n_4\psi^1}\right)^{1/5} \quad (5)$$

и

$$R_1 = \left(\frac{\pi\hbar^2}{4mTn_3\left|\ln\frac{n_3}{n_4}\right| - n_3\psi}\right)^{1/5}, \quad (6)$$

Магнитный момент M ферромагнитной области, окружающей вакансию, определяется выражением $M = vn_3\mu$, а равновесное число вакансий $N_v \sim \exp(-F/T)$, где F получается путем подстановки (5) и (6) в (1) и (3).

Для образования этих областей необходимо произвести работу для того, чтобы вытеснить в первом случае, например He^4 из области радиуса R.

Минимальная работа, которая необходима для вытеснения атомов He^4, равна

$$\delta R = \Phi(n) - \Phi(0), \quad \delta R\, cn_4T$$

$$\Phi(n) = n\mu^0 + nT\ln\frac{n}{eN} + \psi(p, T),$$

где

$$\Phi(0) = n\mu_0 + \mu^1 n,$$

μ^1 — химический потенциал растворенного вещества,

$$\mu^1 = T\ln\frac{n}{N}\psi(p, T).$$

Для вытеснения n_3 атомов He^3, $\delta R = cn_4T$. Тогда в области сферы радиуса R возникает упорядоченное состояние, энергия которой

$$F=\varepsilon_0+\frac{\pi^2\hbar^2}{2mR^2}+\frac{4\pi}{3}R^3n_3T\ln 2+c\cdot\frac{4\pi}{3}R^3n_3T.$$

На другой ветви кривой расслоения, т. е. на ветви, на которой концентрация $cn_3 \ll 1$, энергия области радиуса R_1 равна

$$F=\varepsilon_0+\frac{\pi^2\hbar^2}{2mR_1^2}+c\cdot\frac{4\pi}{3}R_1^3n_4T.$$

Из условия минимальности написанных выражений (2, 3) найдем радиусы сферы:

$$R=\left(\frac{\pi\Delta}{4(\ln 2+c)}\right)^{1/5}a, \tag{7}$$

$$R_1=\left(\frac{\pi\Delta}{4Tc}\right)^{1/5}a, \tag{8}$$

где a — постоянная решетки.

Область концентраций, которая необходима для проявления указанного явления, найдена из условия, что радиус сферы достаточно большой по сравнению с расстоянием между атомами принадлежащих вытеснению:

$$R \gg ac^{-1/3}.$$

Из выражений (4), (5), и (6) легко видеть, что

$$(T/\Delta)^{3/2} \ll c < 1$$

на начальной ветви кривой расслоения, и

$$(T/\Delta)^{3/5} \ll c \ll 1$$

на другой ветви этой кривой, соответствующей температуре $T=0{,}4$ °K

Возникновение упорядоченности областей радиуса R и R_1 вокруг вакансий приводит к заметным изменениям магнитных и термодинамических свойств твердого раствора He^3-He^4.

Возникновение таких областей приводит к возможности дальнейшего охлаждения раствора He^3-He^4.

Действительно в расслоенном растворе в богатую на He^3 фазе вакансия из области R вытесняет He^4 и делокализуется. В объеме $V-\frac{4\pi}{3}R^3$ концентрация He^4 увеличивается и чтобы сохранилось равновесие, некоторое количество He^3 из верхней фазы перейдет в нижнюю, что будет сопровождаться поглощением тепла. В адиабатических условиях это приводит к понижению температуры. В изотермических условиях количество поглощаемого тепла равно

$$\frac{dQ}{dt}=\frac{dn_3}{dt}T\left|n_3\ln 2-n_3\ln\frac{n_3}{n_4}\right|,$$

$\frac{dn_3}{dt}$ — скорость изменения содержания He^3 в растворе.

Вышеуказанное неравенство не ограничивает значения T снизу, так как такие феромагнитные области возникают, как отмечалось, при любом знаке J.

В заключение укажем некоторые эффекты, которые могут быть использованы для экспериментального обнаружения предсказанных явлений.

1. Предположим, что два раствора, в одном из которых имеется вакансия, отделены друг от друга перегородкой, сквозь которую могут проникать атомы He^3-He^4. Тогда, хорошо известно, что возникает осмотическое давление, вследствие чего условию равновесия претерпевает изменение ([4]).

Легко убедиться, что осмотическое давление

$$\Delta p = \frac{n_4}{v_1} T \frac{x}{1-x}, \tag{9}$$

где $x = \frac{v}{V}$.

Таким образом, измеряя Δp, можно определить радиус R.

2. Рассмотрим поглощение звука в рассматриваемом случае. Пусть $R \ll \lambda$, где λ — длина звуковой волны. Под действием звука вакансия начнет колебаться и рассеивать энергию, взаимодействуя с решеткой.

Скорость движения вакансии $V_v \ll c$ (c—скорость звука). В ГПУ He^4 в поле продольной звуковой волны частоты ω и волновым вектором $\vec{k}$, направленным вдоль оси OX, действует сила:

$$F = \frac{4\pi}{3} R^3 n_4 \Lambda k E_0 \cos(\omega t - kr) \tag{10}$$

$r-x$ - координата вакансии, Λ — деформационный потенциал. Уравнение движения вакансии в поле силы F будет:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \nu \frac{dr}{dt} = \frac{\Lambda k E_0}{m} \cos(\omega t - kr). \tag{11}$$

Решение уравнения (3) ищем в виде:

$$r = V_v t + x(t),$$

$x(t)$ — малые колебания с амплитудой $x_0 \ll \lambda$.

Тогда

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \nu \frac{dx}{dt} + \nu V_v = \frac{\Lambda k E_0}{m} \cos \Omega t + \frac{\Lambda k^2 E_0}{m} x \sin \Omega t,$$

$$\Omega = \omega - k V_v. \tag{12}$$

Отсюда получим

$$V_v = \frac{\Lambda^2 E_0^2 k^3}{2m^2} [\Omega (\Omega^2 + \nu^2)]^{-1}. \tag{13}$$

$$x = \frac{\Delta k E_0}{m}\left(\frac{\nu}{\Omega}\sin\Omega t - \cos\Omega t\right)\left(\Omega^2+\nu^2\right)^{-1}. \qquad (14)$$

Энергия, поглощаемая вакансией за единицу времени при $V_r < c$ равна:

$$F\,\overline{\frac{dx}{dt}} = \frac{\frac{4\pi}{3}R^3 n_3 \Lambda^2 k^2 E_0 \nu}{2m(\nu^2+\omega^2)}.$$

Выражаем глубокую благодарность И. М. Лифшицу и А. Ф. Андрееву за обсуждение работы.

Ереванский государственный университет

Օ. Գ. ԱՆԻՍԻՄՈՎԱ, Գ. Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

He^3—He^4 լուծույթում վականսիոնի կառուցվածքի մասին

Ցույց է տրվում, որ He^3—He^4 լուծույթում վականսիոնները առաջացնում են R շառավղով տիրույթ, որտեղ նրանք դելոկալիզացվում են։ Նյութի սառցված վիճակը ձեռք է բերում մագնիսական նոր հատկություններ։ Առաջարկվում են փորձեր, որոնք կարող են օգտագործվել այդ տիրույթների հայտնաբերման համար։

ЛИТЕРАТУРА—ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

[1] *А. Ф. Андреев.* Письмо в ЖЭТФ, 24, 608 (1976). [2] *Н. М. Лифшиц, С. А. Гредескул.* ЖЭТФ, 57, 2209 (1969). [3] *М. А. Кривоглаз.* УФН, 111, 617 (1973). [4] *Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц.* Статистическая физика, М., 1977.