

Академик Л. ЛАНДАУ и И. ПОМЕРАНЧУК

О ДВИЖЕНИИ ПОСТОРОННИХ ЧАСТИЦ В ГЕЛИИ II

В последнее время было высказано предположение, что имеющийся в гелии в небольшом количестве (10^{-6} — 10^{-7}) изотоп гелия с массой 3 не участвует в сверхтекучем движении гелия II⁽¹⁾. Цель настоящей заметки показать, что любые посторонние атомы или молекулы (включая изотопы гелия He³ и He⁶, а также и электроны, попавшие извне в массу гелия II), когда их концентрация мала, не могут участвовать в сверхтекучем движении.

Рассмотрим для доказательства энергетический спектр гелия II, содержащего малое количество посторонних атомов. При этом можно не учитывать взаимодействия посторонних атомов друг с другом и рассматривать только их взаимодействие с атомами основного изотопа гелия. Получаемый таким образом энергетический спектр содержит в себе, кроме фононного и ротонного спектра чистого гелия II^(2,3), дополнительные энергетические уровни, обязанные наличию посторонних атомов. Каждый такой атом не может находиться в определенном месте жидкого гелия II, а должен будет, подобно электронам в металлах, двигаться через весь гелий II (существование локальных уровней в кристаллах связано с квазиклассичностью кристаллической решетки, которая не имеет места в гелии II).

Движению каждого постороннего атома через гелий сопоставляется определенный вектор импульса, от которого непрерывным образом зависит энергия. Мы получаем непрерывный энергетический спектр, характеризуемый для каждого сорта посторонних атомов определенной зависимостью энергии от импульса. Эта зависимость может быть различной для различных сортов атомов. Наинизшему энергетическому состоянию может соответствовать либо импульс P , равный нулю, либо имеющий некоторое конечное значение P_0 . Разлагая энергию в ряд по степеням $P - P_0$ вблизи минимума энергии, получаем:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{(P - P_0)^2}{2\mu}. \quad (1)$$

Здесь μ — эффективная масса, как правило, равная по порядку величины массе постороннего атома, исключая электрон, для которого эффективная масса может быть значительно больше электронной.

Если $P_0 = 0$, то вместо (1) мы имеем:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + P^2/2\mu.$$

При малых P разложение энергии в ряд по степеням импульса начинается с квадратичного члена, а не с линейного, как в случае фононов.

Как известно, наличие линейного члена в случае фононов вызвано специальными причинами, не имеющими места при рассматриваемых сейчас условиях.

В силу законов сохранения импульса и энергии, возбуждение фононов посторонним атомом с энергией (1) становится невозможным, как только скорость атома $(P - P_0)/\mu$ оказывается меньшей, чем скорость звука. Что касается возбуждения ротонов, то оно требует энергии большей, чем $\Delta = 9,6^\circ \text{K}$ ⁽³⁾. Когда скорость атома меньше определенной скорости, зависящей от приведенной массы, возбуждение ротонов невозможно. В случае He^3 эта критическая скорость оказывается порядка скорости звука. Таким образом, практически все посторонние атомы,двигающиеся со скоростью меньше некоторой критической скорости, не могут передавать свою энергию сверхтекучей части гелия II. Пробег таких атомов определяется их столкновениями с фононами и ротонами. При не очень низких температурах вероятность столкновения с фононами меньше, чем с ротонами, так как ротонное сечение — порядка атомных сечений, а фононное сечение мало ввиду большой длины волны фононов, имеющих в гелии II (рассеяние фононов примесями пропорционально четвертой степени частоты). Благодаря столкновениям с фононами и ротонами атомы примеси будут двигаться вместе с нормальной частью гелия II и не смогут участвовать в сверхтекучем движении. Таким образом, в нормальную часть гелия II, кроме массы, связанной с ротонами и фононами, будет входить также дополнительная масса, обязанная посторонним атомам. Величина этой массы, содержащейся в 1 см^3 , равна:

$$\frac{nP_0^2}{3kT}$$

(n — число атомов примеси, заключенных в 1 см^3). Если $P_0 = 0$, то дополнительная масса равна $n\mu$.

Так как He^3 должен двигаться с нормальной частью гелия II, то при сверхтекучем вытекании гелия He^3 должен будет оставаться в исходном сосуде. Именно такой результат был получен недавно Доунтом и др. ⁽⁴⁾, которые смогли уменьшить концентрацию He^3 в вытекающей сверхтекучим образом массе He II в 50 раз. При этом неучастие He^3 в сверхтекучем движении Доунт и др. пытаются связать с вопросом о свойстве сверхтекучести чистого He^3 . Однако, согласно вышеизложенным теоретическим соображениям, вопрос о том, сверхтекуч или не сверхтекуч чистый He^3 , не имеет никакого отношения к его неучастию в сверхтекучем движении He II. Любые посторонние атомы, содержащиеся в He II, не будут участвовать в сверхтекучем движении He II. В частности, это относится и к He^6 , хотя сам по себе He^6 , возможно, обладает свойством сверхтекучести.

Поступило
12 XII 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ J. Frank, Phys. Rev., 70, 561 (1946). ² Л. Ландау, ЖЭТФ, 11, 592 (1941).
³ L. Landau, J. of Phys., 11, 91 (1947). ⁴ J. G. Daunt et al., Phys. Rev., 72, 502 (1947).