

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

536.7

ЭФФЕКТ ПОМЕРАНЧУКА И СВЕРХНИЗКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

В «Письмах в ЖЭТФ» (том I, вып. 6) опубликовано письмо Ю. Д. Ануфриева¹ о том, что получены сверхнизкие температуры с помощью эффекта Померанчука. Этот эффект был предсказан Померанчуком еще в 1950 г., он состоит в следующем. Как известно, все тела при затвердевании выделяют тепло. Поэтому если производить кристаллизацию в теплоизолированных условиях (например, повышая давление), вещество будет нагреваться. Так происходит обычно, но не таков He³ ниже некоторой критической температуры. Если He³ заставить кристаллизоваться при $T < 0,3^\circ \text{K}$, то он при этом поглощает тепло, а значит, в адиабатических условиях будет охлаждаться. Кривую плавления He³ можно нарисовать следующим образом—рис. 1. Из рис. 1 видно, что ниже точки T_0 кривая плавления ведет себя необычно. Это и есть эффект Померанчука². Теоретически его можно понять следующим образом.

Известно, что теплота плавления при заданной температуре определяется формулой³

$$Q = T(S_2 - S_1); \quad (1)$$

индексом 2 будем обозначать твердую фазу, а индексом 1 — жидкую. Если $Q > 0$, то это значит, что при переходе из жидкого состояния в твердое теплота поглощается. Для обычных тел $S_2 < S_1$, и потому $Q < 0$; для He³ при температурах ниже T_0 $S_2 > S_1$, и потому $Q > 0$. Почему же у He³ при этих условиях $S_2 > S_1$?

Как известно, энтропия любой системы при заданных условиях (заданы энергия и объем) определяется формулой

$$S = k \ln N, \quad (2)$$

где N — число возможных состояний при данной температуре. При стремлении температуры к нулю система переходит в основное состояние, которое не вырождено, поэтому $N = 1$, т. е. $S = 0$ — известная теорема Нерста. Но различные системы с разной скоростью переходят в основное состояние. Рассмотрим He³. Атомы его состоят из трех нуклонов и имеют спин $1/2$. Так как спин каждого атома может иметь два направления ориентации, то если бы спины не взаимодействовали друг с другом, они образовывали бы 2^n возможных ориентаций, где n — число атомов, т. е. энтропия была бы не меньше $k n \ln 2$ или $R \ln 2$ на 1 г-атом гелия. Однако между спинами существуют взаимодействия двух видов:

1) обменное — квантовомеханическое;

2) магнитное, так как атомы имеют магнитные моменты, ориентированные вдоль спина.

Оба эти взаимодействия достаточно слабы и почти не оказывают никакого влияния на хаотическую ориентацию спинов. Однако при очень низких температурах они вступают в действие. Первыми вступают в действие обменные силы. Уже при $T \sim 1^\circ \text{K}$ они начинают выстраивать спины антипараллельно друг другу, и в результате вместо 2^N возможных состояний мы получаем одно-единственное, т. е. энтропия начинает стремиться к нулю уже с $T \sim 1^\circ \text{K}$. Однако интересно то, что в кристаллическом состоянии эти обменные силы совсем никак не проявляются. Величина обменных сил определяется нулевыми колебаниями атомов, или, иначе говоря, размазыванием

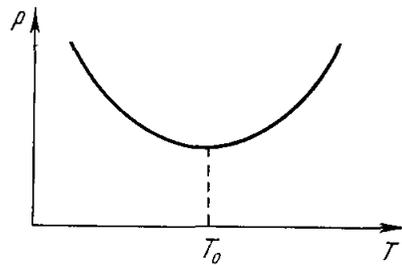


Рис. 1.

волновых функций. И в то время как в жидком состоянии это размазывание велико, в твердом, кристаллическом состоянии при низкой температуре атомы He III имеют четко фиксированные положения и амплитуда их нулевых колебаний около положения равновесия гораздо меньше расстояния между атомами. Следовательно, в жидкости энтропия будет стремиться к нулю, а в твердой фазе она остается не меньше $R \ln 2$ на 1 *г-атом*. Это можно представить на рис. 2.

Пунктирная кривая показывает ход изменения энтропии жидкости с температурой, а сплошная — твердой фазы. Видно, что эти кривые пересекаются в точке T_0 и ниже этой точки $S_{ТВ} > S_{Ж}$, а значит, будет наблюдаться эффект Померанчука. Из рис. 2 видно, что энтропия твердого тела тоже начинает в конце концов стремиться к нулю. Но это уже происходит за счет магнитного взаимодействия атомов, которое настолько слабо, что начинает сказываться только при $T = T^* \sim 10^{-7}^\circ \text{K}$. Теоретически адиабатический переход из некоторого состояния M вдоль волнистой кривой должен привести к температурам $\sim 10^{-7}^\circ$, но практически пока получены $T \sim 0,02^\circ \text{K}$.

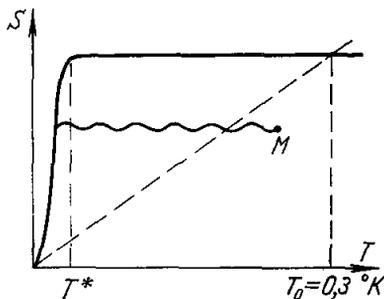


Рис. 2.

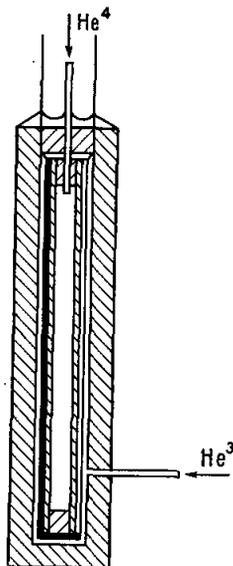


Рис. 3.

Прибор, описанный в письме Ануфриева, состоит из бронзовой камеры, в которой находится другая камера с мембранными стенками (рис. 3). Между камерами подается He³ под давлением 30 атм, охлаждаемый методом адиабатического размагничивания ниже 0,3° К. Во внутреннюю камеру под давлением подается He⁴. Давление He⁴ доводилось до 24 атм. При этом была получена температура порядка 0,02° К.

В. К. Игнатович

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Д. Ануфриев, ЖЭТФ, Письма в редакцию 1 (6), 1 (1965).
2. И. Померанчук, ЖЭТФ 20, 919 (1950).
3. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц, Статистическая физика, М., Изд-во «Наука», 1964.