

ОБ ЭФФЕКТЕ ДЖОЗЕФСОНА ДЛЯ НЕИДЕАЛЬНОГО БОЗЕ-ГАЗА

А.В.Маркелов

Институт физических проблем РАН
117334, Москва

Поступила в редакцию 5 марта 1992 г.

В работе показано, что джозефсоновский контакт для слабонеидеального бозе-газа хорошо описывается идеальной синусоидальной зависимостью тока от разности фаз. Обсуждаются возможности экспериментального наблюдения эффекта Джозефсона.

Теоретически нет никаких сомнений в том, что эффект Джозефсона, то есть периодическая зависимость тока от разности фаз имеет место в слабонеидеальном бозе-газе. Однако детальные формы и численные значения этой зависимости должны определяться структурой и геометрией джозефсоновского контакта. Простейшая мыслимая конструкция состоит из узкого короткого канальчика, соединяющего два сосуда. Однако практически получить на таком приборе однозначную зависимость тока от разности фаз чрезвычайно трудно. Действительно, для корреляционной длины ξ в слабонеидеальном бозе-газе при $T = 0$ мы имеем соотношение

$$\xi = \hbar/mv.$$

Оценивая это выражение для ${}^4\text{He}$, мы получаем $\xi \sim (Na)^{-1/2} \sim a$, где a - длина рассеяния совпадающая в ${}^4\text{He}$ с межатоомным расстоянием. Для однозначной зависимости тока от разности фаз необходимо, чтобы размеры канальца l были меньше корреляционной длины: $l < \xi$. Учитывая, что $\xi \sim a$ мы приходим к выводу, что практически наблюдать сочный эффект Джозефсона на такой структуре при достаточно низкой температуре невозможно. Возможности, однако, остаются и в данной конструкции, ибо ξ при приближении к λ -точке растет, обращаясь в самой λ -точке в бесконечность.

В данной статье мы более подробно рассмотрим другую возможную конструкцию: туннельный контакт. Практически такая конструкция может быть осуществлена для ${}^4\text{He}$ в следующем виде. Между двумя объемами, содержащими ${}^4\text{He}$, помещается капля ${}^3\text{He}$, либо пузырек с газообразным ${}^4\text{He}$. Возможны и другие способы подавить параметр порядка ${}^4\text{He}$. Ясно, что адекватное описание такой системы будет состоять в описании с помощью метода туннельного гамильтониана. Такой подход широко применяется для описания сверхтекучих ферми-систем и сводится к гамильтониану ¹

$$H = H_L(a, a^+) + H_R(b, b^+) + H_t$$

$$H_t = \sum_{k,q} [T_{kq} a_k^+ b_q + T_{kq}^* b_q^+ a_k], \quad (1)$$

здесь $H_L(a, a^+)$, $H_R(b, b^+)$ - гамильтонианы, описывающие слабонеидеальный бозе-газ соответственно в правом и левом сосудах, H_t - гамильтониан туннелирования, T_{kq} - амплитуда туннелирования. Ток конденсатных частиц I определяется через изменение числа частиц в одном из сосудов

$$I = \dot{N}_L = \frac{i}{\hbar} [H, N_L] = \frac{i}{\hbar} T_{00} (a_0^+ b_0 - b_0^+ a_0). \quad (2)$$

Взяв среднее от I по основному состоянию невозмущенного гамильтониана мы сразу получаем:

$$I = I_c \sin(\varphi_L - \varphi_R) \quad I_c = \frac{2}{\hbar} T_{00} \sqrt{N_L N_R}. \quad (3)$$

Помимо конденсата при нулевой температуре в слабонеидеальном бозе-газе существуют частицы находящиеся над конденсатом. Они также вносят вклад в сверхтекучий ток. Действительно, основное состояние слабонеидеального бозе-газа будет содержать истинные частицы газа $\phi_k = v_k a_k^+ |0\rangle$, где v_k - коэффициенты $u-v$ -преобразования. Известно, что коэффициенты $u-v$ -преобразования зависят от фазы $v_k \sim v_k e^{i\varphi}$. Усредняя I по основному состоянию ϕ_k , получаем

$$I_2 = \frac{2}{\hbar} \sum_k T_{kk} v_k^{L*} v_k^R \sin(\varphi_L - \varphi_R). \quad (4)$$

В случае, когда левый и правый сосуды заполнены одним и тем же газом, а амплитуда туннелирования T_{kk} практически не зависит от k , мы складывая (3) и (4), получаем простую зависимость для амплитуды джозефсоновского тока

$$I = I_c \sin(\varphi_L - \varphi_R); \quad I_c = \frac{2}{\hbar} TN, \quad (5)$$

где N - полное число истинных частиц газа. При ненулевой температуре к бездиссипативному джозефсоновскому току добавится диссипативный ток, обусловленный тепловыми квазичастицами и пропорциональный разности химических потенциалов между сосудами.

Как и для ферми-газа в методе туннельного гамильтониана для бозе-газа мы получаем идеальную синусоидальную зависимость тока от разности фаз. Однако интересный факт состоит в том, что в отличие от сверхтекучего ферми-газа ненулевое значение сверхтекучего тока в методе туннельного гамильтониана для бозе-газа имеет место уже в нулевом порядке теории возмущения по T . Квазичастичный диссипативный ток при ненулевой температуре оказывается величиной второго порядка по амплитуде туннелирования. Таким образом, для того, чтобы получить сочный эффект Джозефсона на туннельной структуре, целесообразно взять разумно низкую температуру или разумно малое значение амплитуды туннелирования.

В заключение автору приятно выразить благодарности А.С.Боровику-Романову, А.Я.Паршину, Л.П.Питаевскому, И.М.Суслову за полезные обсуждения.

1. А.Бароне, Дж.Патерно, Эффект Джозефсона, М.: Мир, 1984.