

Статья SUPERCONDUCTIVITY WITH LINES OF GAP NODES: DENSITY OF STATES IN THE VORTEX"1993 г.

Работа [1] была написана непосредственно после публикации экспериментов по разрешенной по углу фотоэмиссии (ARPES) на высокотемпературном сверхпроводнике $Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$, показавших, что электронный спектр в этом купратном сверхпроводнике является бесщелевым [2]. В спектре были обнаружены линии узлов (nodal lines). Возник вопрос о том, какими могли бы быть наблюдаемые следствия бесщелевого спектра в сверхпроводниках.

Ответ пришел из физики сверхпроводников с тяжелыми фермионами и бесщелевым электронным спектром, которая в свою очередь базировалась на физике сверхтекучих жидкостей, в частности, сверхтекучего $^3He - A$, где фермионные возбуждения также являются бесщелевыми. В отличие от сверхпроводников, в сверхтекучей жидкости фермионные квазичастицы - Боголюбовские возбуждения- являются электронейтральными. Тем не менее их свойства весьма похожи. Если спектр квазичастиц имеет щель, то плотность состояний (*DOS*) равна нулю для всех состояний в пределах щели $|E| < \Delta$. Если же щель местами схлопывается (имеет узлы), то плотность состояний остается равной нулю при $E = 0$, но не равна нулю для любой энергии $|E| > 0$.

Последнее означает, что разного рода возмущения энергетического спектра могут приводить к появлению конечной плотности состояний при $E = 0$. В частности, в сверхтекучих жидкостях это может быть вызвано потоком массы, который приводит к допплеровскому сдвигу квазичастичного спектра.

Что же происходит в заряженной электронной жидкости в сверхпроводниках? При наложении на сверхпроводник внешнего магнитного поля B в сверхпроводящем материале появляется решетка вихрей Абрикосова. В каждом вихре имеется циркулярный электрический ток, который затухает пропорционально обратному расстоянию до центра (кора) вихря, $j \propto 1/r$,

и производит допплеровский сдвиг энергии электронов. Таким образом, если в спектре сверхпроводника есть зануление энергетической щели, то в вихревом состоянии сверхпроводник должен иметь конечную плотность состояний при нулевой энергии. Принтегрировав по всем вихрям получим, что, если в электронном спектре сверхпроводника имеются линии узлов, то плотность состояний должна быть пропорциональна \sqrt{B} , а теплоемкость пропорциональна $T\sqrt{B}$. Для сверхпроводников с точками узлов в спектре плотность состояний и теплоемкость пропорциональны $Bln(1/B)$ и $TBln(1/B)$, соответственно. Наконец, в обычных сверхпроводниках со щелью в спектре возбуждений ненулевая плотность состояний обусловлена только квазичастицами в коре вихря, где квазичастицы бесщелевые. В этом случае плотность состояний пропорциональна плотности вихрей и, тем самым, линейна по B . Все это было коротко упомянуто в ранней работе [3], посвященной сверхпроводникам с тяжелыми фермионами. В статье, опубликованной в Письмах в ЖЭТФ, представлено подробное обсуждение.

Теплоемкость, линейная по T и пропорциональная \sqrt{B} , впервые была обнаружена в Стэнфорде в экспериментах на $YBa_2Cu_3O_6$ [4]. В настоящее время пропорциональность плотности состояний \sqrt{B} служит для идентификации линии узлов в сверхпроводниках и известна как эффект Воловика.

-
- [1] G E Volovik, JETP Lett. 58 ,469 (1993).
 - [2] Z.-X. Shen, et al., Phys. Rev. Lett. 70, 1553 (1993).
 - [3] G E Volovik, J. Phys. C: Solid State Phys. 21 L221 (1988).
 - [4] K. A. Moler, et al., Phys. Rev. Lett. 73, 27442747 (1994).