

# Эффект близости в тонкопленочном бислое сверхпроводник/ферритмагнетик

А.В. Корнев<sup>1</sup>, И.В. Бобкова<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>К(П)ФУ, Казань, Россия; <sup>2</sup>МФТИ, Долгопрудный, Россия; <sup>3</sup>ВШЭ, Москва, Россия

## Введение

В тонкопленочных бислоях сверхпроводник/ферромагнетик и сверхпроводник/антиферромагнетик обменные поля индуцируют триплетные корреляции в сверхпроводнике и тем самым подавляют сверхпроводимость [1,2]. Несмотря на нулевую суммарную намагниченность антиферромагнетика, в граничащем с ним сверхпроводнике так же, как в случае ферромагнетика образуются триплетные пары [3]. Такие триплетные пары называют Неелевскими, поскольку их амплитуда меняет знак от узла к узлу так же, как спин в антиферромагнетике. Формирование триплетных пар происходит за счет разрушения синглетных пар, что в свою очередь снижает критическую температуру. Подавление критической температуры в тонкопленочных AF/S бислоях может быть даже сильнее подавления в F/S бислоях за счет открытия антиферромагнитной щели.

В данной работе рассматривается тонкопленочный бислой сверхпроводник/ферритмагнетик. Ферритмагнитный тип магнитного упорядочения является промежуточным между ферромагнитным и антиферромагнитным и представляет собой две подрешетки, обычно с противоположенными и разными по величине обменными полями на них. Неэквивалентность подрешеток приводит к необычным результатам, среди которых, например, неравный параметр порядка на двух подрешетках.

## Модель и методы

Гамильтониан в приближении сильной связи:

$$\hat{H} = -t \sum_{\langle ij \rangle \nu \sigma} \hat{c}_{i\sigma}^{\nu \dagger} \hat{c}_{j\sigma}^{\nu} + \sum_{i\nu} \left( \Delta_i^{\nu} \hat{c}_{i,\uparrow}^{\nu \dagger} \hat{c}_{i,\downarrow}^{\nu \dagger} + \Delta_i^{*\nu} \hat{c}_{i,\uparrow}^{\nu} \hat{c}_{i,\downarrow}^{\nu} \right) - \mu \sum_{i\nu\sigma} \hat{n}_{i\sigma}^{\nu} + \sum_{i\nu,\alpha\beta} \hat{c}_{i\alpha}^{\nu \dagger} (\mathbf{m}_i^{\nu} \boldsymbol{\sigma})_{\alpha\beta} \hat{c}_{i\beta}^{\nu},$$

$$\hat{n}_{i\sigma}^{\nu} = \hat{c}_{i\sigma}^{\nu \dagger} \hat{c}_{i\sigma}^{\nu}, \quad \nu = \{A, B\}, \quad \sigma = \{\uparrow, \downarrow\} = \pm \frac{1}{2}, \quad \boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)^T.$$

Уравнения Боголюбова – де Женна:

$$-\mu v_{n,\sigma}^{\nu,i} - t \sum_{\langle i,\nu \rangle} v_{n,\sigma}^{\nu,j} + \sigma \Delta_i^{\nu} v_{n,-\sigma}^{\nu,i} + (\mathbf{m}_i^{\nu} \boldsymbol{\sigma})_{\sigma\alpha} u_{n,\alpha}^{\nu,i} = \varepsilon_n u_{n,\sigma}^{\nu,i},$$

$$-\mu v_{n,\sigma}^{\nu,i} - t \sum_{\langle i,\nu \rangle} v_{n,\sigma}^{\nu,j} + \sigma \Delta_i^{*\nu} u_{n,-\sigma}^{\nu,i} + (\mathbf{m}_i^{\nu} \boldsymbol{\sigma}^*)_{\sigma\alpha} v_{n,\alpha}^{\nu,i} = -\varepsilon_n v_{n,\sigma}^{\nu,i}.$$

Уравнение самосогласования:

$$\Delta_i^{\nu} = \lambda \sum_n \left( u_{n,\downarrow}^{\nu,i} v_{n,\uparrow}^{\nu,i*} (1 - f_n) + u_{n,\uparrow}^{\nu,i} v_{n,\downarrow}^{\nu,i*} f_n \right),$$

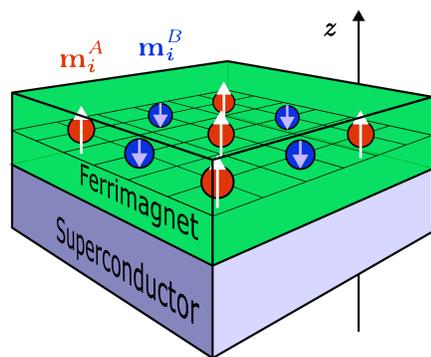
$$f_n = \frac{1}{1 + e^{\varepsilon_n/T}}.$$

Обменные поля на подрешетках:

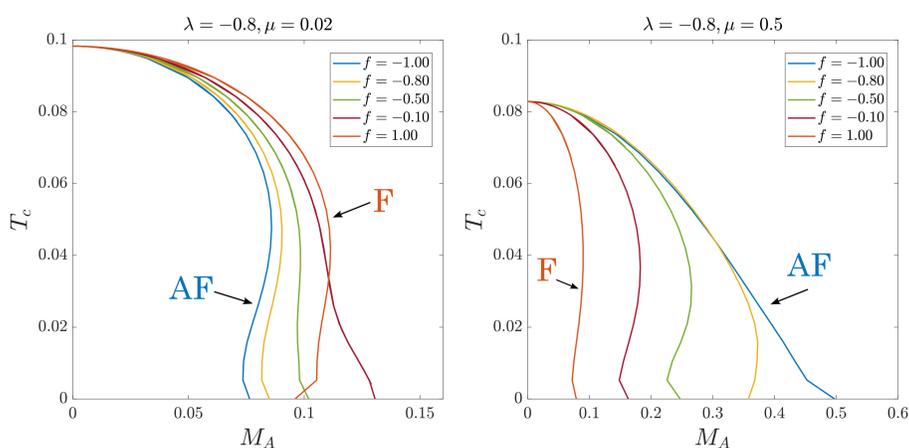
$$\mathbf{m}_i^B = f \cdot \mathbf{m}_i^A, \quad \mathbf{m}_i^A = M_A \cdot \mathbf{e}_z,$$

$$f = \begin{cases} 1, & \text{ферромагнетик} \\ -1, & \text{антиферромагнетик} \\ \in (-1, 1), & \text{ферритмагнетик.} \end{cases}$$

Тонкопленочный бислой:



## Критическая температура



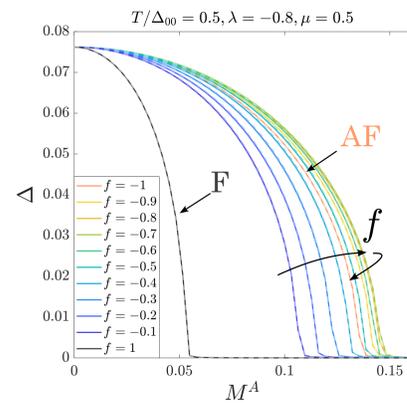
Критическая температура сверхпроводника в контакте с ферромагнетиком ( $f = 1$ ), антиферромагнетиком ( $f = -1$ ) и ферритмагнетиком (для различных  $f$ ). Порядок кривых меняется при изменении величины химического потенциала  $\mu$ . Существует два режима для каждой кривой, отвечающей ферритмагнетике с величиной неэквивалентности подрешеток  $f$ , отличающиеся положением, относительно кривой для ферромагнетика.

## Литература

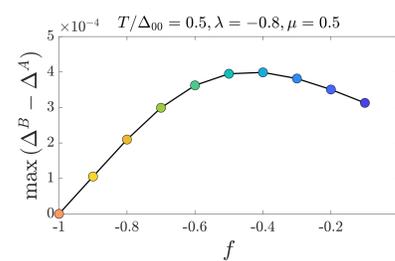
- [1] G. Sarma, J. Phys. Chem. Solids **24**, 1029 (1963).
- [2] A. I. Buzdin, Rev. Mod. Phys. **77**, 935 (2005).
- [3] G. A. Bobkov, I. V. Bobkova, A. M. Bobkov, and Akashdeep Kamra, Phys. Rev. B **106**, 144512 (2022).

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ №22-22-00522

## Параметр порядка



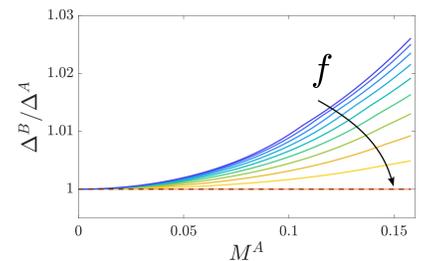
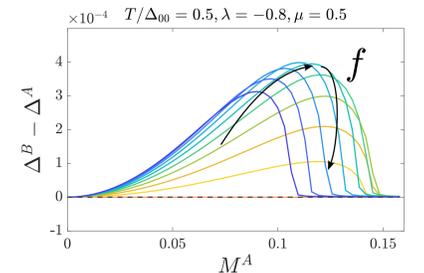
Зависимость ПП от величины обменного поля на подрешетке A. Сплошная линия – подрешетка A, штриховая линия – подрешетка B.



Зависимость величины максимальной разности ПП на подрешетках A и B от степени неэквивалентности подрешеток  $f$ .

Обменные поля на подрешетках:

$$\mathbf{m}_i^B = f \cdot \mathbf{m}_i^A$$



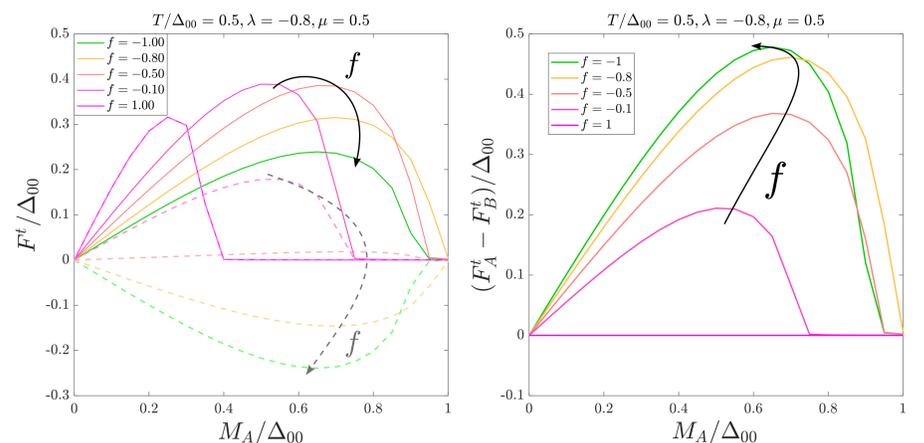
Зависимость разности и отношения ПП на подрешетках A и B от величины обменного поля на подрешетке A.

## Триплетные корреляции

$$F_{ii,\alpha\beta}(\tau) = -\langle T_{\tau} \hat{c}_{i\alpha}(\tau) \hat{c}_{i\beta}(0) \rangle, \quad \hat{c}_{i\alpha}(\tau) = \sum_n u_{n\alpha}^i \hat{b}_n e^{-\varepsilon_n \tau} + v_{n\alpha}^{i*} \hat{b}_n^{\dagger} e^{\varepsilon_n \tau},$$

$$F_{ii,\alpha\beta}(\omega_m) = \sum_n \left\{ \frac{u_{n,\alpha}^i v_{n,\beta}^{i*}}{i\omega_m - \varepsilon_n} + \frac{v_{n,\alpha}^{i*} u_{n,\beta}^i}{i\omega_m + \varepsilon_n} \right\}, \quad F_{ii,\alpha\beta} = \sum_{\omega_m > 0} F_{ii,\alpha\beta}(\omega_m),$$

$$F_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} F_{\uparrow\uparrow} & F_{\uparrow\downarrow} \\ F_{\downarrow\uparrow} & F_{\downarrow\downarrow} \end{pmatrix} = (F^s + F^t \boldsymbol{\sigma}) \cdot i\sigma_y.$$



Аномальные функции Грина триплетных корреляций. Сплошная линия – подрешетка A, штриховая линия – подрешетка B. Разность аномальных функций Грина на двух подрешетках – иллюстрирует появление неелевских триплетных пар.

## Заключение

В результате численного решения уравнений Боголюбова – де Женна в тонкопленочных бислоях сверхпроводник/ферритмагнетик были обнаружены следующие эффекты:

- Существует два разных режима зависимости  $T_c(M_A)$ , различающиеся характером влияния изменения  $f$  на эффективность подавления сверхпроводимости. Режимы реализуются при разных значениях химического потенциала  $\mu$ .
- Неэквивалентность подрешеток ферритмагнетика приводит к необычному, меняющемуся на межатомных масштабах ("гофрированному") параметру порядка. Разница ПП на подрешетках ведет себя немонотонно по отношению к степени неэквивалентности  $f$  и имеет максимум при некотором ее значении. (Однако отношение ПП на подрешетках – монотонно.)
- По мере приближения ферритмагнетика к антиферромагнитному типу упорядочения (т.е. при уменьшении  $f$ ) концентрация неелевских триплетных пар увеличивается.