Решение уравнений Узаделя для контакта ферромагнитный изолятор–сверхпроводник–ферромагнитный изолятор в линейном приближении

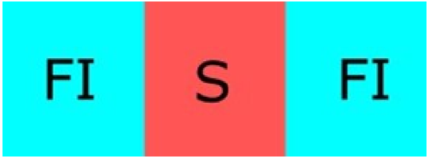
Сеидов С.С., Селезнёв Д.В., Пугач Н.Г.

НИУ ВШЭ

10.04.2024

Работа выполнена в рамках НУГ 24-00-038
“Квазиклассическая динамика квантовых систем: хаотических и пространственно-неоднородных, типа гетероструктур сверхпроводник-магнетик”.

Спиновый вентиль



FI — ферромагнитный изолятор
S — сверхпроводник

- Применение в сверхпроводящей спинтронике
- Контроль спинового тока
- Эффект близости с ферромагнетиком
- Генерация триплетных корреляций

Уравнения Узаделя и граничные условия

Матричная функция Грина:

$$\hat{g}(x) = \begin{pmatrix} g_{\uparrow\uparrow} & g_{\uparrow\downarrow} & f_{\uparrow\uparrow} & f_{\uparrow\downarrow} \\ g_{\downarrow\uparrow} & g_{\downarrow\downarrow} & f_{\downarrow\uparrow} & f_{\downarrow\downarrow} \\ -f_{\uparrow\uparrow} & -f_{\uparrow\downarrow} & -g_{\uparrow\uparrow} & -g_{\uparrow\downarrow} \\ -f_{\downarrow\uparrow} & -f_{\downarrow\downarrow} & -g_{\downarrow\uparrow} & -g_{\downarrow\downarrow} \end{pmatrix} \; g_{\alpha\beta} \propto \langle c_\alpha^\dagger c_\beta \rangle \; f_{\alpha\beta} \propto \langle c_\alpha^\dagger c_\beta^\dagger \rangle$$

Уравнения Узаделя:

$$\mathcal{F}(x) = \frac{|\Delta|^2}{2} + \int \mathrm{Tr}\left[\frac{i\hbar}{4} D(\partial_x \hat{g})^2 + (\varepsilon\tau_3 \otimes \sigma_0 - \hat{V})\hat{g}\right] d\varepsilon$$

$$\hat{V} = \hat{\Delta} = \mathrm{antidiag}(+\Delta, -\Delta, +\Delta^*, -\Delta^*)$$

$$iD\partial_x(\hat{g}\partial_x \hat{G}) = [\varepsilon\tau_3 \otimes \sigma_0 + \hat{\Delta}, \hat{g}]$$

Уравнения Узаделя и граничные условия

Наложение граничных условий на уравнения Узаделя нетривиально! Их общий вид

$$G_L L_L(\hat{g}_L \partial_x \hat{g}_L) = -G_R L_R(\hat{g}_R \partial_x \hat{g}_R) = I.$$

Ферромагнетный изолятор это не проводящий спин–активный интерфейс, для него матричный ток I известен точно *[Linder, Scientific reports, 2017]*:

$$I = -NG_Q \left[1 - \frac{i}{4}\sin(\varphi)\hat{a} + \frac{1}{2}\sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)\hat{a}\hat{m}\right]^{-1} \times \left[-i\sin(\varphi)\hat{g}\hat{a} + \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)[\hat{m}, \hat{a}]\right] \times$$

$$\times \left[1 - \frac{i}{4}\sin(\varphi)\hat{a} + \frac{1}{2}\sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)\hat{m}\hat{a}\right]^{-1} \quad \hat{a} = \hat{g}\hat{m}\hat{g} - \hat{m}$$

$$\hat{m} = \begin{pmatrix} m_z & m_x - im_y & 0 & 0 \\ m_x + im_y & -m_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_z & m_x + im_y \\ 0 & 0 & m_x - im_y & -m_z \end{pmatrix}.$$

Линеаризация

Вблизи T_c матричную функцию Грина можно линеаризовать:

$$\hat{g} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & f_{\uparrow\uparrow} & f_{\uparrow\downarrow} \\ 0 & 1 & f_{\downarrow\uparrow} & f_{\downarrow\downarrow} \\ -f_{\uparrow\uparrow} & -f_{\uparrow\downarrow} & -1 & 0 \\ -f_{\downarrow\uparrow} & -f_{\downarrow\downarrow} & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Уравнения Узаделя для аномальных компонент становятся тривиальными:

$$\left.\begin{aligned} iDf''_{\uparrow\downarrow}(z) - 2|\varepsilon| f_{\uparrow\downarrow}(z) - 2\Delta = 0 \\ iDf''_{\downarrow\uparrow}(z) - 2|\varepsilon| f_{\downarrow\uparrow}(z) + 2\Delta = 0 \\ iDf''_{\uparrow\uparrow}(z) - 2|\varepsilon| f_{\uparrow\uparrow}(z) = 0 \\ iDf''_{\downarrow\downarrow}(z) - 2|\varepsilon| f_{\downarrow\downarrow}(z) = 0 \end{aligned}\right\} \Rightarrow f_j(z) = A_j e^{ik_j z} + B_j e^{-ik_j z} + \frac{\Delta}{|\varepsilon|}(\delta_{j,\downarrow\uparrow} - \delta_{j,\uparrow\downarrow}).$$

Линеаризация, граничные условия

Параллельная ориентация

$$
\begin{aligned}
&dG_s f_{\uparrow\downarrow}{}' = \pm 2NG_Q(e^{i\varphi}-1)f_{\uparrow\downarrow}\\
&dG_s f_{\downarrow\uparrow}{}' = \mp 2NG_Q(e^{-i\varphi}-1)f_{\downarrow\uparrow}\\
&f'_{\uparrow\uparrow} = f'_{\downarrow\downarrow} = 0
\end{aligned}
$$

Перпендикулярная ориентация

$$
\begin{aligned}
dG_s f'_{\downarrow\uparrow} &= NG_Q\left[(1-\cos\varphi)(f_{\downarrow\uparrow}-f_{\uparrow\downarrow}) + i\sin\varphi(f_{\uparrow\uparrow}-f_{\downarrow\downarrow})\right]\\
dG_s f'_{\downarrow\uparrow} &= NG_Q\left[(1-\cos\varphi)(f_{\uparrow\downarrow}-f_{\downarrow\uparrow}) + i\sin\varphi(f_{\uparrow\uparrow}-f_{\downarrow\downarrow})\right]\\
dG_s f'_{\uparrow\uparrow} &= NG_Q\left[(1-\cos\varphi)(f_{\uparrow\uparrow}-f_{\downarrow\downarrow}) + i\sin\varphi(f_{\downarrow\uparrow}-f_{\uparrow\downarrow})\right]\\
dG_s f'_{\downarrow\downarrow} &= NG_Q\left[(1-\cos\varphi)(f_{\downarrow\downarrow}-f_{\uparrow\uparrow}) + i\sin\varphi(f_{\downarrow\uparrow}-f_{\uparrow\downarrow})\right]
\end{aligned}
$$

Выводы

- Выбраны граничные условия соответствующие интерфейсу с ферромагнитным изолятором
- В линейной приближении получены “разумные” выражения для граничных условий
- В линейном приближении найдены аномальные функции Грина в сверхпроводнике

Спасибо за внимание!