



Милютин Дмитрий
Павлович

Пугач Наталья
Григорьевна

Москва
2024

Спиновое рассеяние в гетероструктурах сверхпроводник-ферромагнетик

Национальный Исследовательский Университет «Высшая школа экономики»

- Проблематика
- Модель
- Результаты
- Выводы

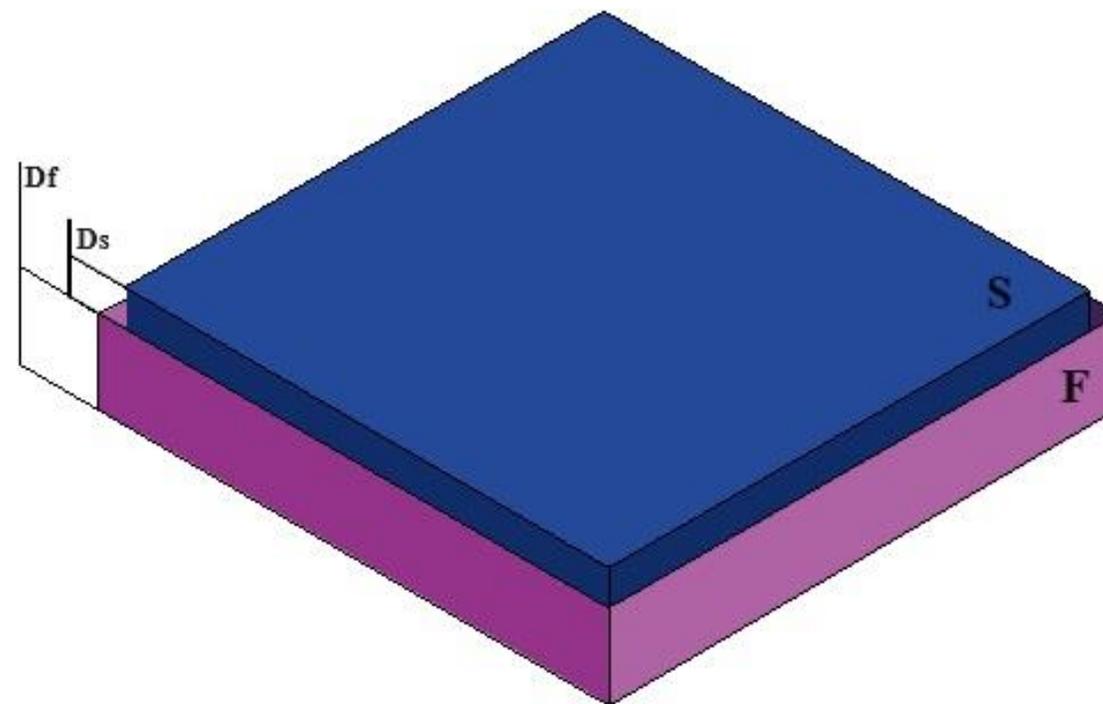


Рис. S/F Гетероструктура

S/F гетероструктура обещает расширить наши знания о взаимодействии сверхпроводимости и магнетизма, что может привести к разработке новых устройств с контролируемыми свойствами и более эффективными технологиями. Кроме того, исследование эффекта близости в этом контексте может улучшить болометры на холодных электронах, повысив их чувствительность и применимость в астрономии для регистрации субмиллиметровых волн.

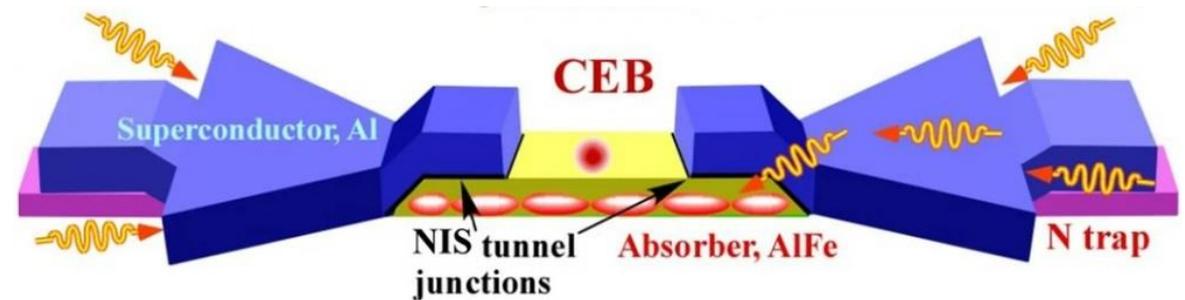


Рис. 3D – схема болометра на холодных электронах. Слой абсорбера из алюминия показан желтым цветом с подслоем из железа

A. V. Gordeeva, A. L. Pankratov, N. G. Pugach, A. S. Vasenko, V. O. Zbrozhek, A. V. Blagodatkin, D. A. Pimanov & L. S. Kuzmin Record electron self-cooling in cold-electron bolometers with a hybrid superconductor-ferromagnetic nanoabsorber and traps. Scientific Reports volume 10, Article number: 21961 (2020) .

Линеаризованные уравнения Узаделя с граничными условиями выглядят следующим образом:

$$\left(|\omega| - \frac{D_s}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) F_{\uparrow\downarrow(\downarrow\uparrow),\omega}(x) = \Delta$$

для S слоя, и

$$\left(|\omega| - \frac{D_M}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \pm iE_{ex} \operatorname{sgn}(\omega) + \tau_z^{-1} + \right.$$

$$\left. + 2\tau_x^{-1} \right) F_{\uparrow\downarrow(\downarrow\uparrow),\omega}(x) + (\tau_{s0}^{-1} - \tau_x^{-1}) \left(F_{\uparrow\downarrow(\downarrow\uparrow),\omega}(x) - F_{\downarrow\uparrow(\uparrow\downarrow),\omega}(x) \right) = 0,$$

для F слоя.

Данные уравнения дополняются граничными условиями Куприянова-Лукичева.

$$\gamma \xi_s \left(\frac{\partial F_s}{\partial x} \right)_{d_s} = \xi_M \left(\frac{\partial F_M}{\partial x} \right)_{d_s},$$

$$F_S(d_s) = F_M(d_s) - \xi_M \gamma_B \left(\frac{\partial F_M}{\partial x} \right)_{d_s}$$

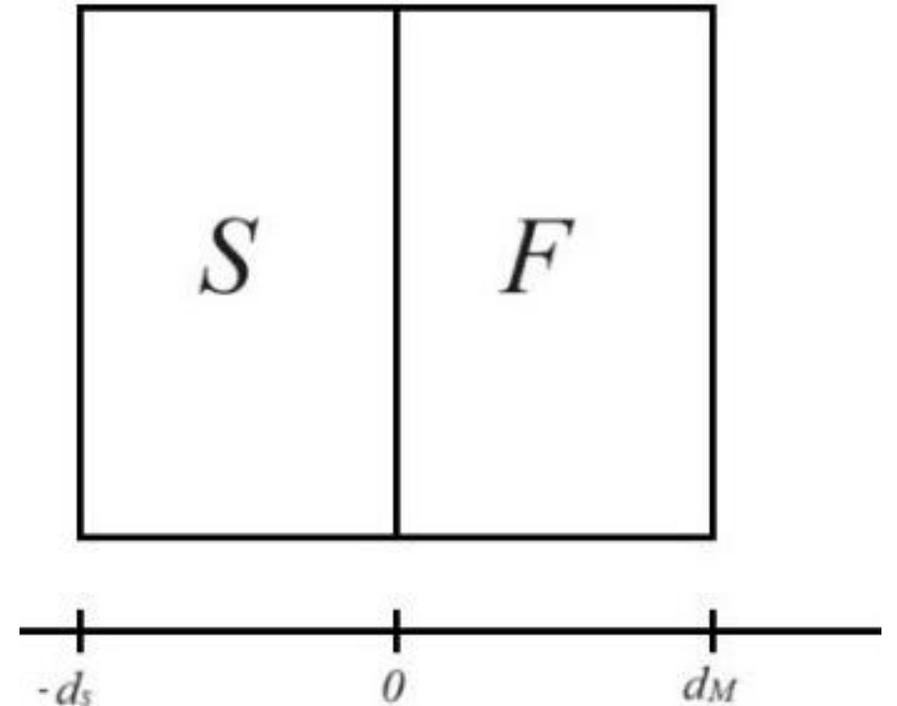


Рис. Модель гетероструктуры

Для начала рассмотрим уравнения без учета рассеяния:

$$\left(\omega - \frac{D_s}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) F_{\uparrow\downarrow(\downarrow\uparrow),\omega}(x) = \Delta$$

для S слоя, и

$$\left(\omega - \frac{D_M}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \pm iE_{ex} \right) F_{\uparrow\downarrow(\downarrow\uparrow),\omega}(x) = 0,$$

для F слоя.

Решения уравнений без рассеяния:

$$F_S = C_1 \exp(k_1 x) + \frac{\Delta}{\omega},$$

$$F_M = C_4 \exp(-k_2 x),$$

где $k_1 = \sqrt{\frac{2\omega}{D_s}}$, $k_2 = \sqrt{\frac{2(\omega+iE)}{D_M}}$, а константы

определяются из граничных условий и равны соответственно:

$$C_1 = -\frac{\Delta k_2 \xi_M}{\omega (k_2 \xi_M + \gamma k_1 \xi_s + \gamma_B \gamma k_1 k_2 \xi_M \xi_s)},$$

$$C_4 = \frac{\Delta k_1 \gamma \xi_s}{\omega (k_1 \gamma \xi_s + k_1 \gamma \xi_s \xi_M \gamma_B k_2 + \xi_M k_2)}.$$

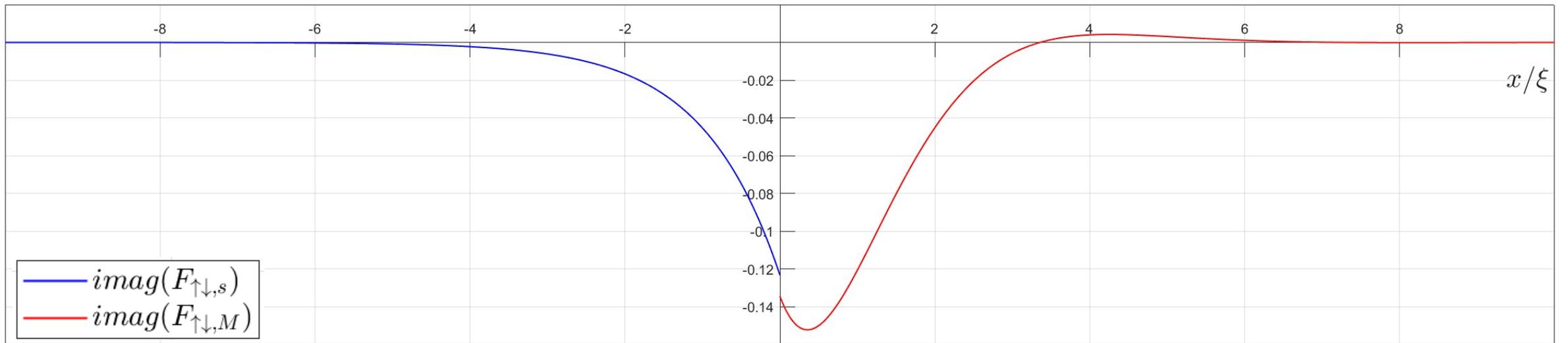
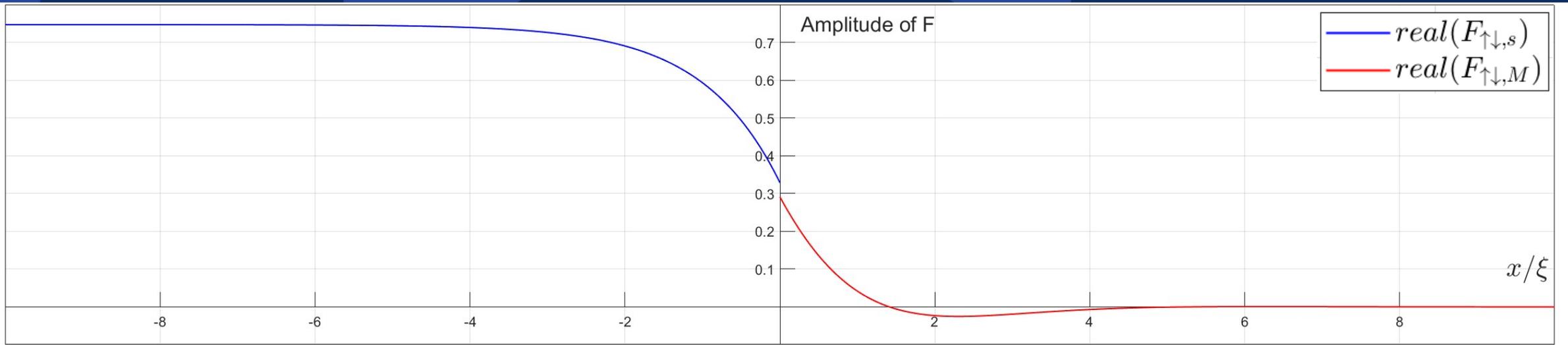


Рис. Вещественная и мнимая часть аномальной функции Грина для минимальной Мацубаровской частоты без рассеяния

Результаты

7

Чтобы получить синглетную и триплетную компоненту по отдельности, воспользуемся следующими

формулами: $F_{singlet} = Re\left(\frac{F_{\uparrow\downarrow} + F_{\downarrow\uparrow}}{2}\right)$, $F_{triplet} = Im\left(\frac{F_{\downarrow\uparrow} - F_{\uparrow\downarrow}}{2}\right)$.

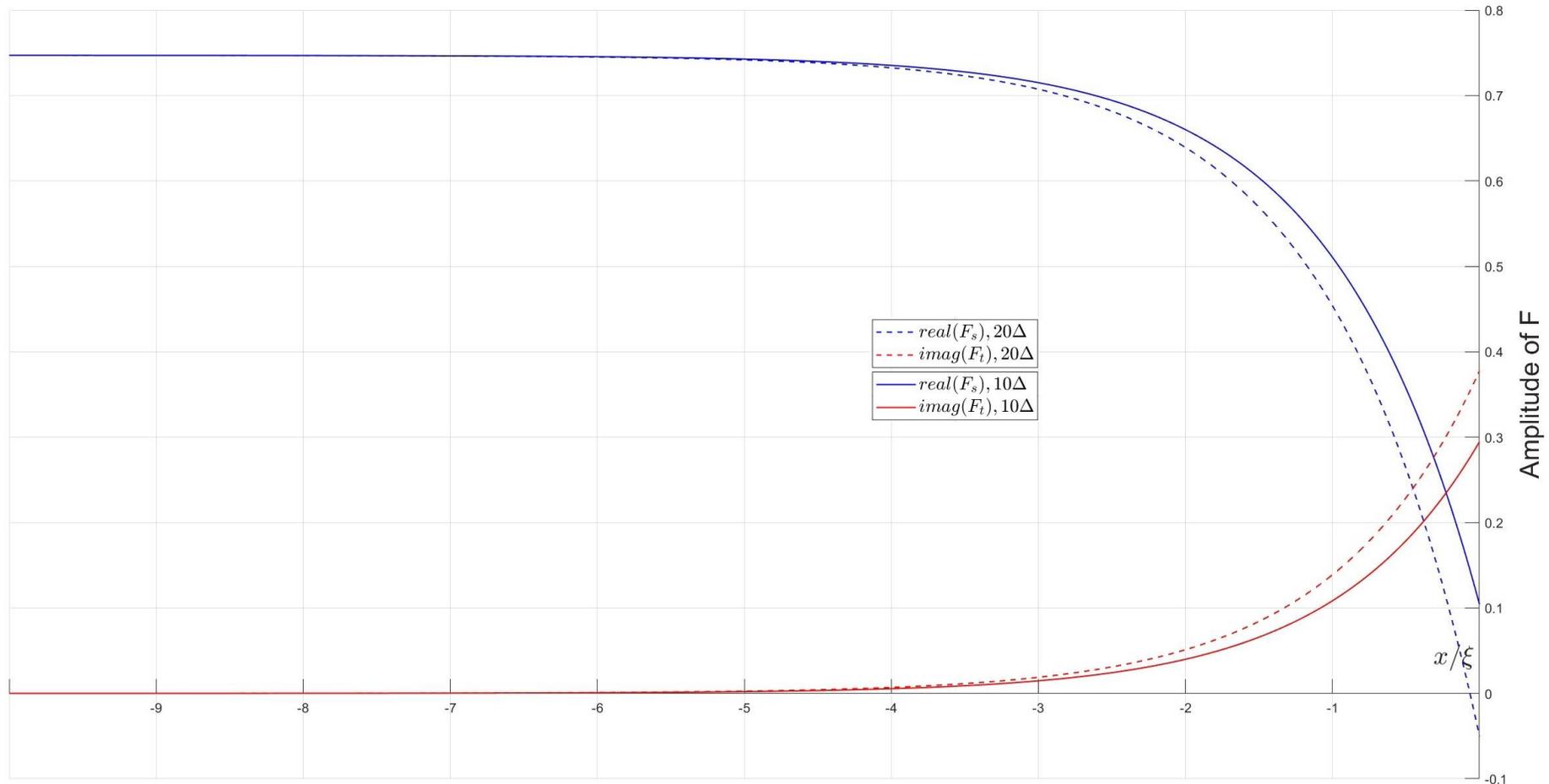


Рис. Синглетная и триплетная компонента при обменной энергии $E = 10\Delta$ и $E = 20\Delta$ в сверхпроводнике

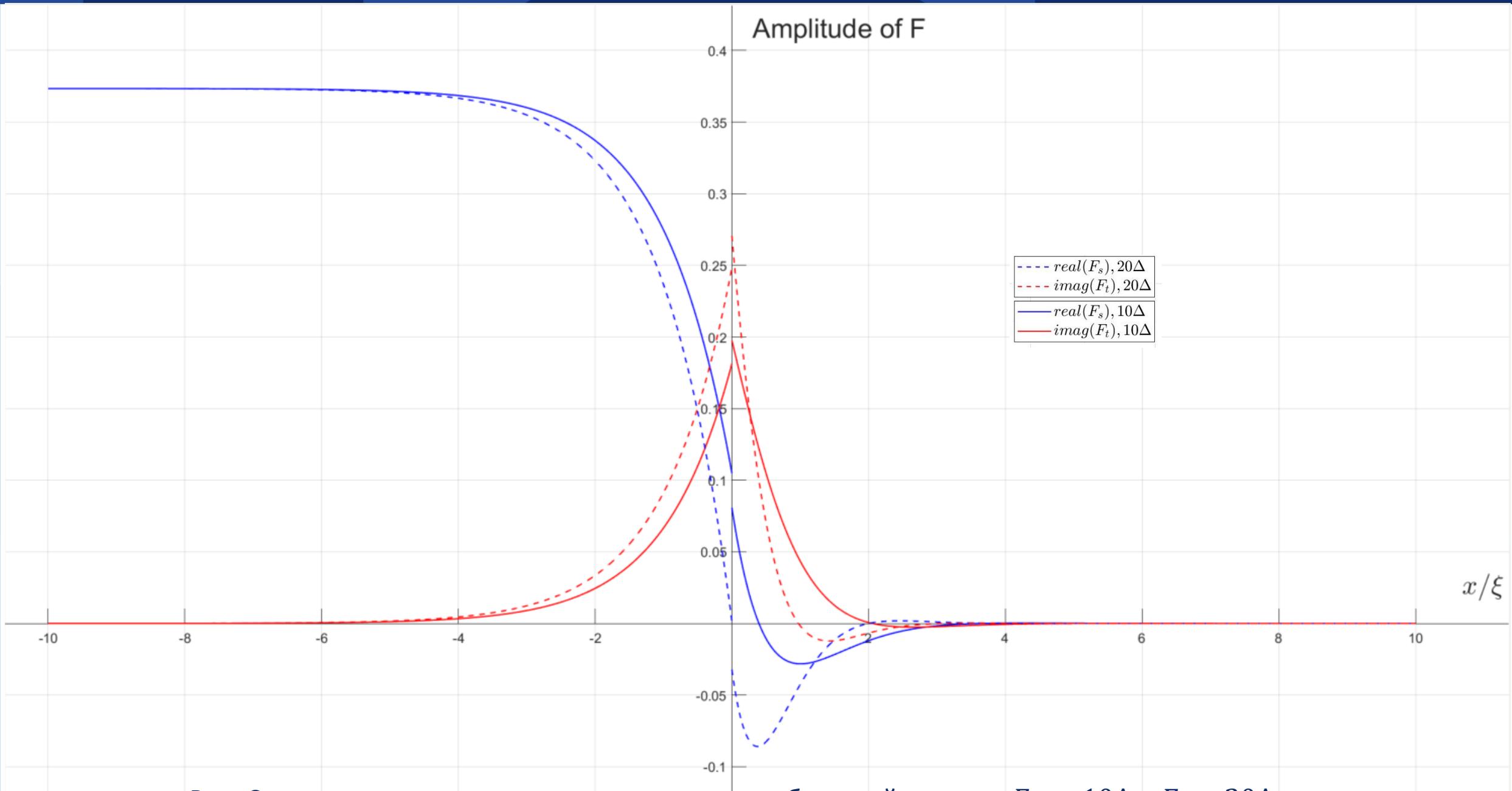
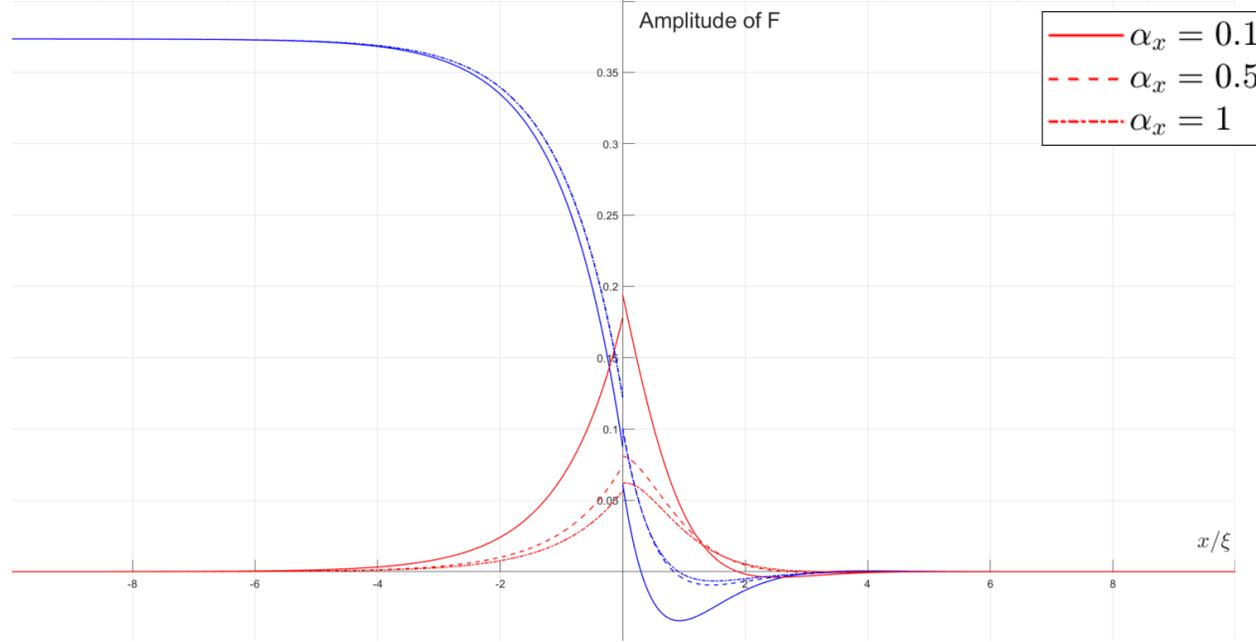
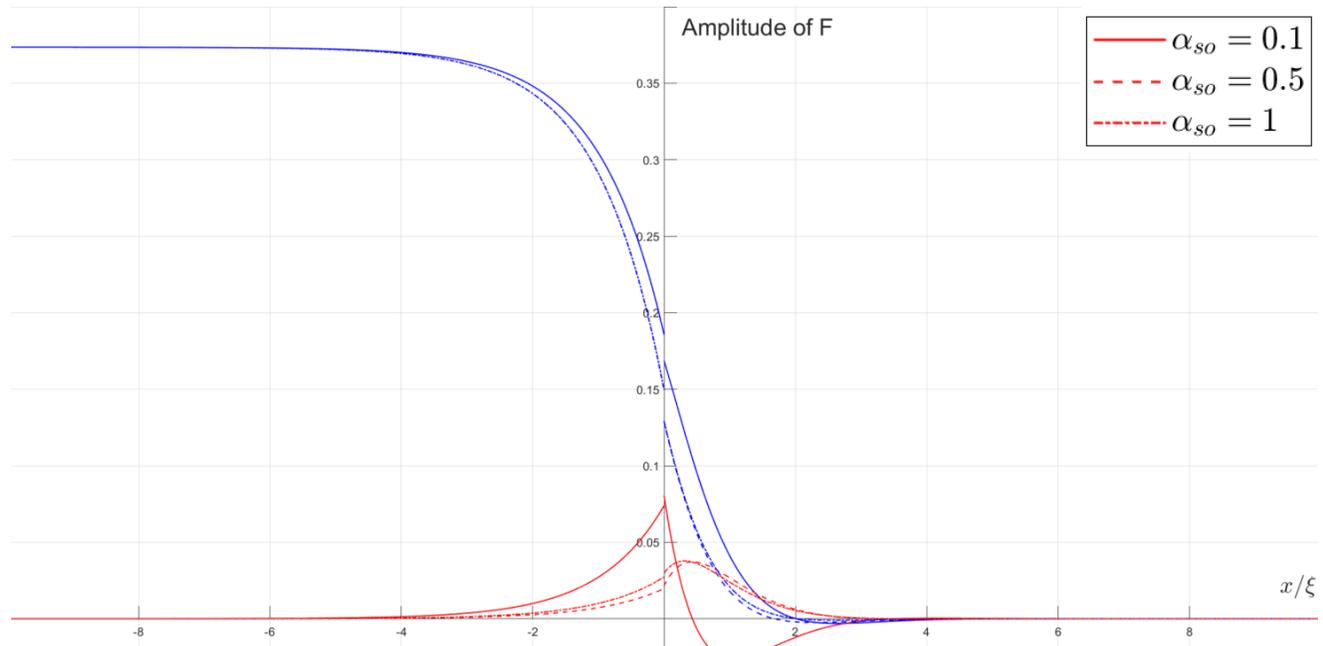


Рис. Синглетная и триплетная компонента при обменной энергии $E = 10\Delta$ и $E = 20\Delta$



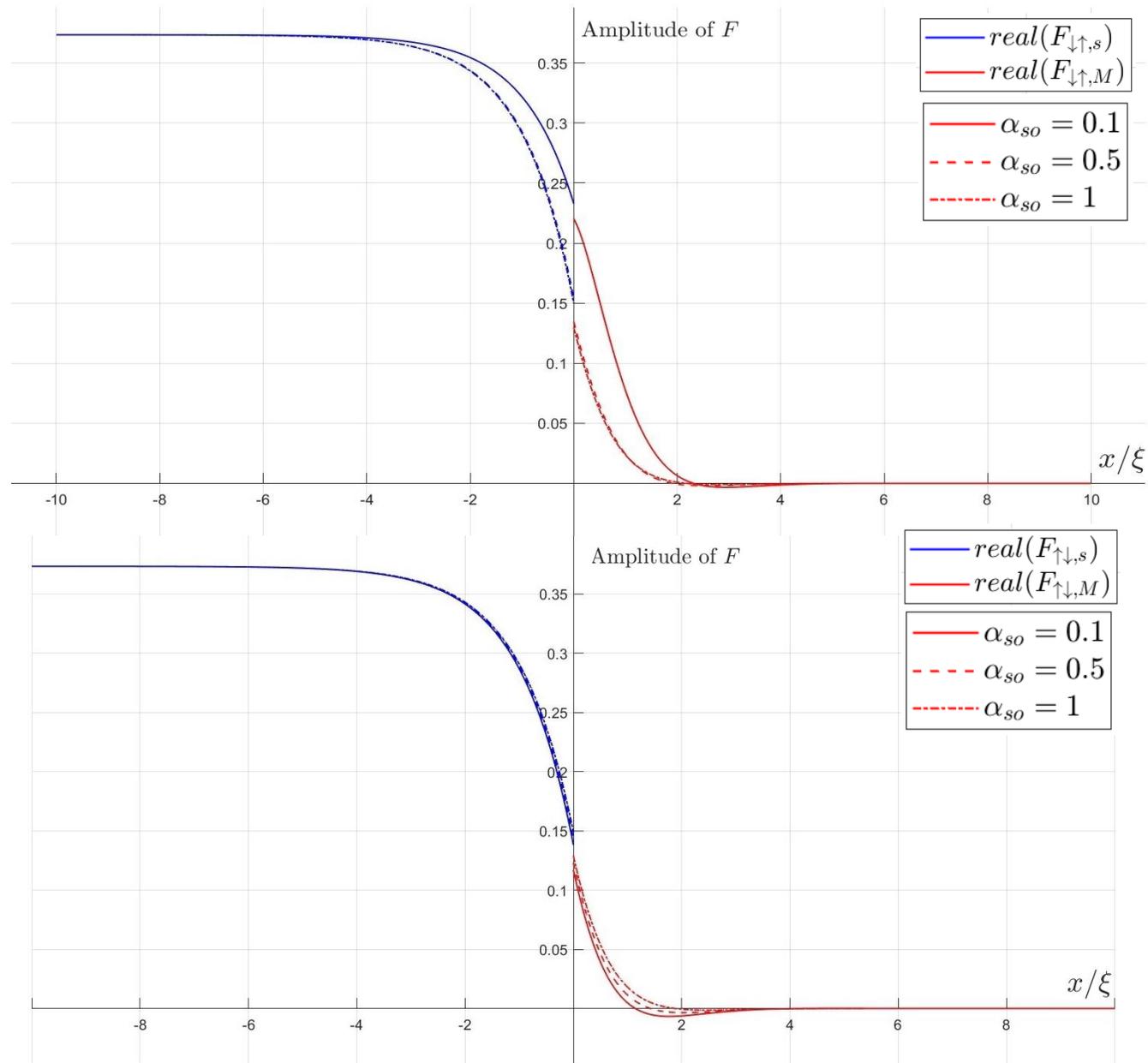


Рис. Реальная часть функции Грина при различных значениях спин-орбитального рассеяния

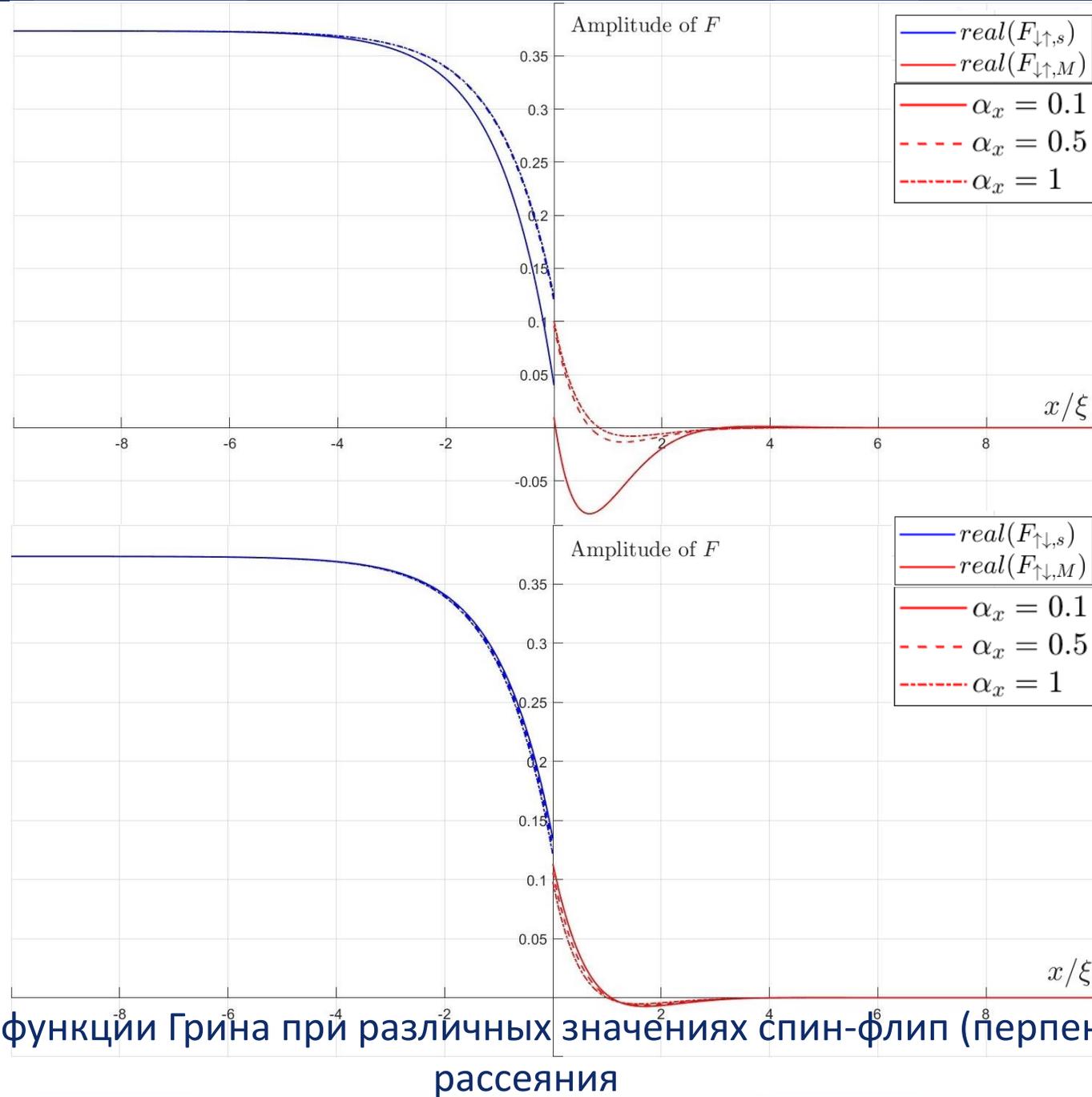


Рис. Реальная часть функции Грина при различных значениях спин-флип (перпендикулярно полю) рассеяния

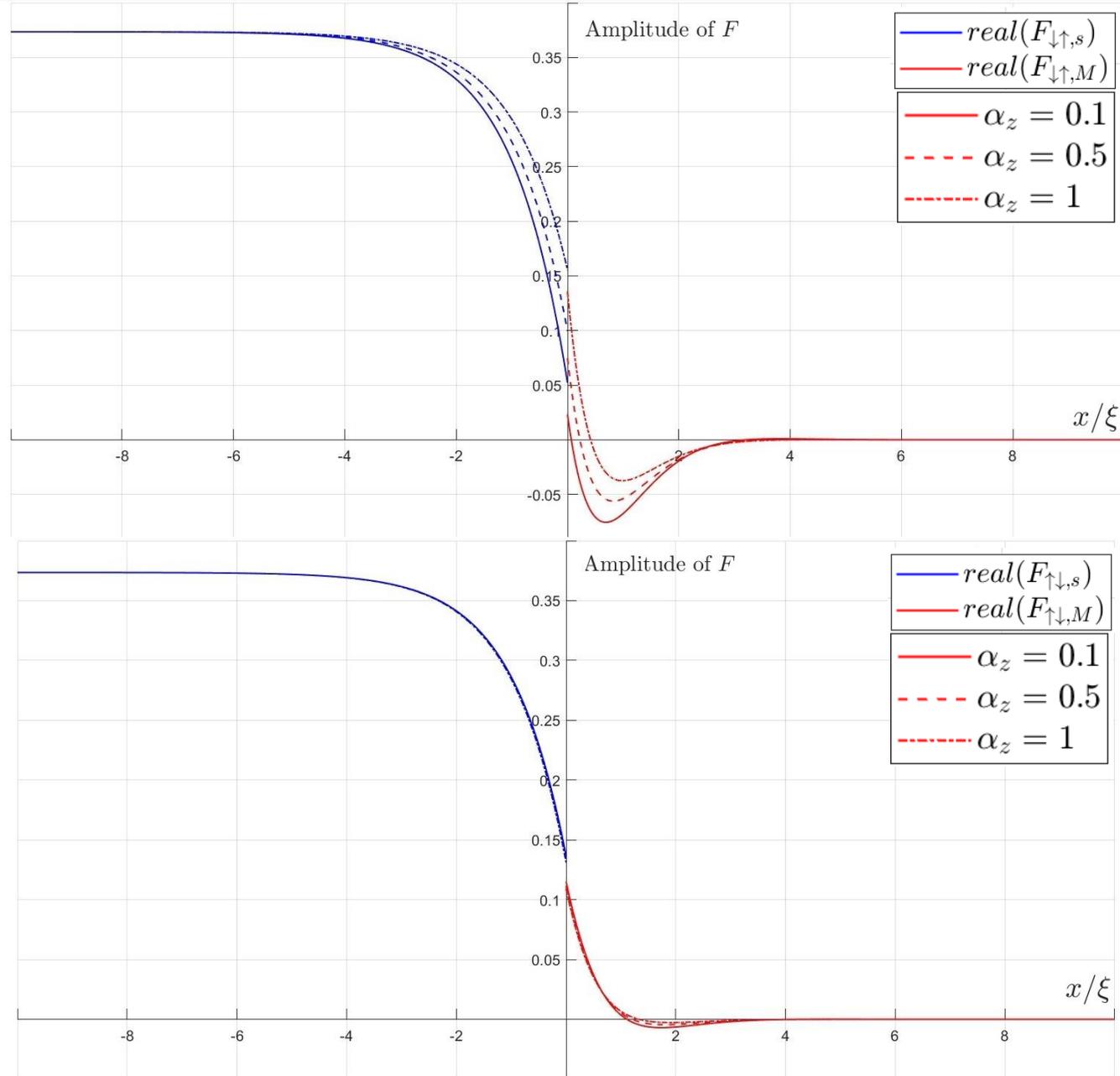


Рис. Реальная часть функции Грина при различных значениях спин-флип (вдоль поля) рассеяния

По итогу проделанной работы, можно сделать следующие выводы. Наличие рассеяния запутывает функции $F_{\uparrow\downarrow}$ и $F_{\downarrow\uparrow}$. Без него функции комплексно-сопряжены, с ним ведут себя по-разному. Из полученных графиков видно, что функция $F_{\downarrow\uparrow}$ сильнее меняется при изменении параметров рассеяния. Также рассеяние замедляет образование триплетных куперовских пар. Спин-орбитальное взаимодействие полностью заглушает осциляции функций в ферромагнетике, в то время как спин-флип лишь уменьшает их амплитуду.

Работа выполнена в рамках студенческого проекта №1607 “Спиновое рассеяние в гетероструктурах сверхпроводник-ферромагнетик” МИЭМ НИУ ВШЭ. Авторы благодарят за финансовую поддержку Научный фонд НИУ ВШЭ и Программу фундаментальных исследований НИУ ВШЭ (ТЗ-15).

