



HSE
University

НИУ ВШЭ. Московский институт электроники
и математики им. А.Н. Тихонова



Межвузовская научно-техническая конференция
студентов, аспирантов и молодых специалистов
имени Е.В.Арменского

ВЗАИМНЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ В ГИБРИДНОЙ СТРУКТУРЕ СЕРХПРОВОДНИК ФЕРРОМАГНИТНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК

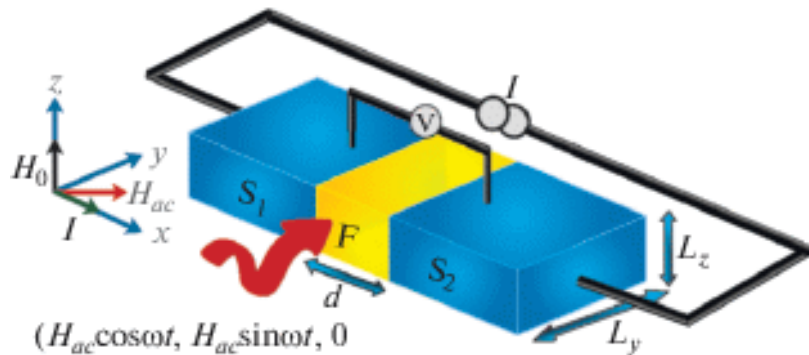
НУЛ Квантовой наноэлектроники

Туркин Ярослав Вячеславович

Пугач Наталия Григорьевна

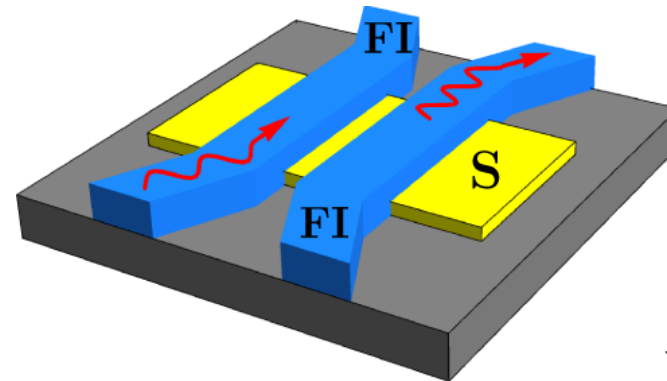
Мотивация

- Low loss spin current injection, superconductive spintronics
- Spin waves excitation, new magnonic functional devices
- Josephson junction with ferromagnetic insulators, low energy elements for artificial neurons



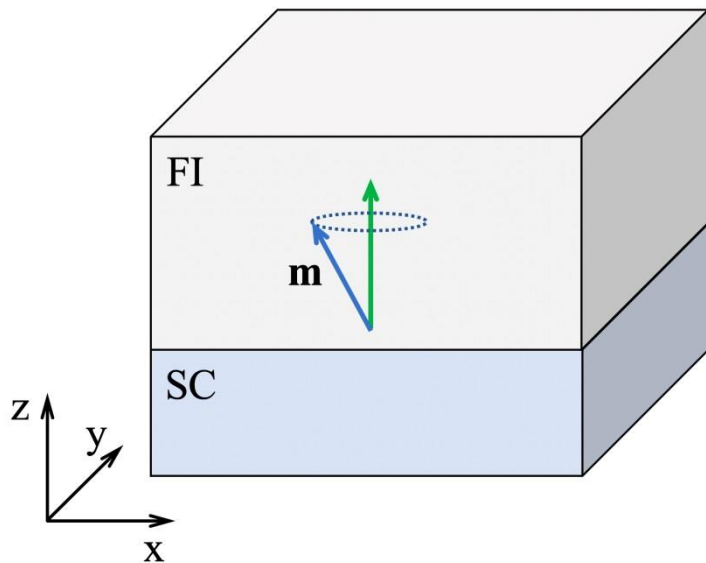
Magnetic Josephson junctions

Bobkova I. V., et al. *Comm. Mat.* 3.1 (2022): 95.



Superconducting magnonics

Двухслойная структура с прецессирующей намагниченностью



$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{m}(\mathbf{r}, t) = -\gamma \mathbf{m}(\mathbf{r}, t) \times [\mathbf{H} + \mathbf{h}_{ac}(t)] + \frac{\alpha_0}{M_s} \left[\mathbf{m}(\mathbf{r}, t) \times \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{m}(\mathbf{r}, t) \right] - \gamma J_{\text{ex}} \mathbf{m}(\mathbf{r}, t) \times \mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$$

Spin transfer torque from superconductor

Формализм: нестационарное уравнение Узаделя

- Периодическое возбуждение
- Грязный предел

$$\check{g}_n(\omega) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \int \check{g}(t + \tau/2, t - \tau/2) e^{i\omega\tau} d\tau e^{in\Omega t} dt$$

Линеаризованное уравнение УФ

$$\frac{i\hbar}{2} \left\{ \check{\rho}_4, n\Omega \check{g}_n^{(1)}(\omega) \right\} + i\hbar \left[\check{\rho}_4 \omega, \check{g}_n^{(1)}(\omega) \right] + \hbar D \check{g}^{(0)} \left(\omega + \frac{n\Omega}{2} \right) \partial_z^2 \check{g}_n^{(1)}(\omega) = -i \left[\check{\Delta}^{(0)}, \check{g}_n^{(1)}(\omega) \right],$$

Граничные условия

$$\check{g}^{(0)} \circ \partial_z \hat{g}^{(1)} = iK [\check{m}_n, \check{g}^{(0)}]_o - K^2 [\check{m}_n, [\check{m}_n, \check{g}^{(0)}]_o] + \dots$$

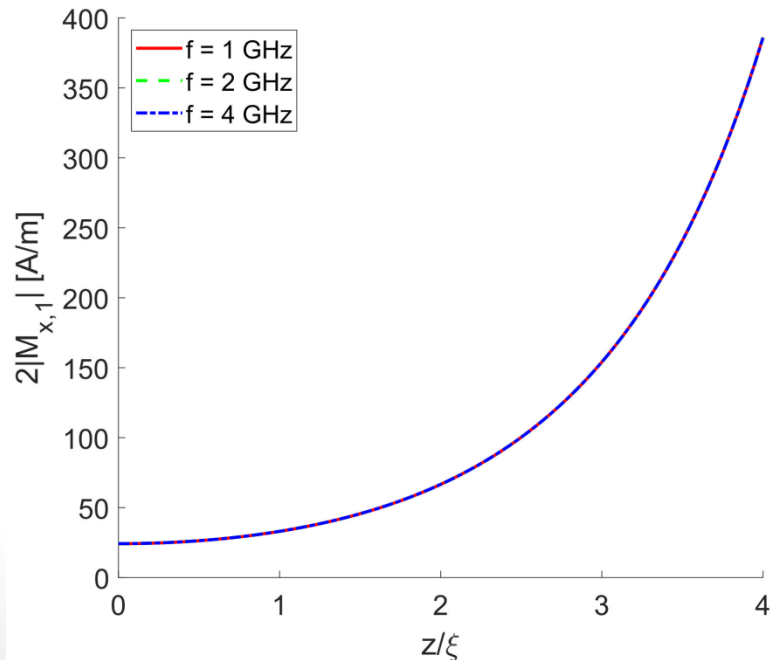
$$\hbar\Omega \ll \Delta^{(0)} \quad K \sim \vartheta N G_Q \quad \vartheta \ll 1 \quad \text{Small spin-mixing}^*$$

*Adiabatic BC: M. Eschrig, et al., *New J. of Phys.* **17**, (2015).

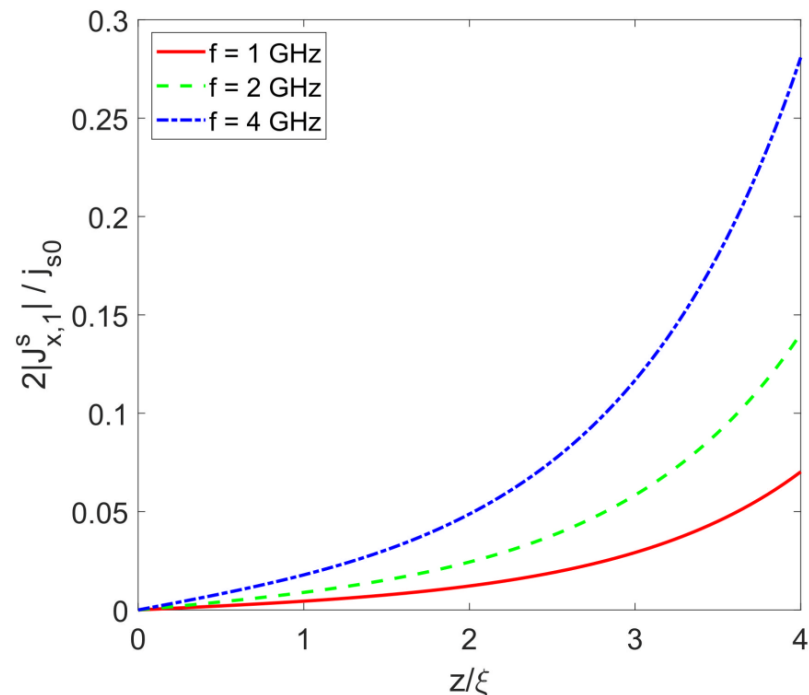
Спиновый ток и наведенная намагниченность

$$\mathbf{M}_n = \frac{g\mu_B \hbar N_0}{8} \int d\omega \text{Sp} \left\{ \hat{\kappa} \hat{g}_n^{K(1)}(\omega) \right\} \quad \mathbf{j}_{s,n} = \frac{\hbar N_0 D}{8} \int d\omega \text{Sp} \left\{ \hat{\rho}_4 \hat{\kappa} (\check{g}^0 \circ \partial_z \check{g}^{(1)})_n^K \right\}$$

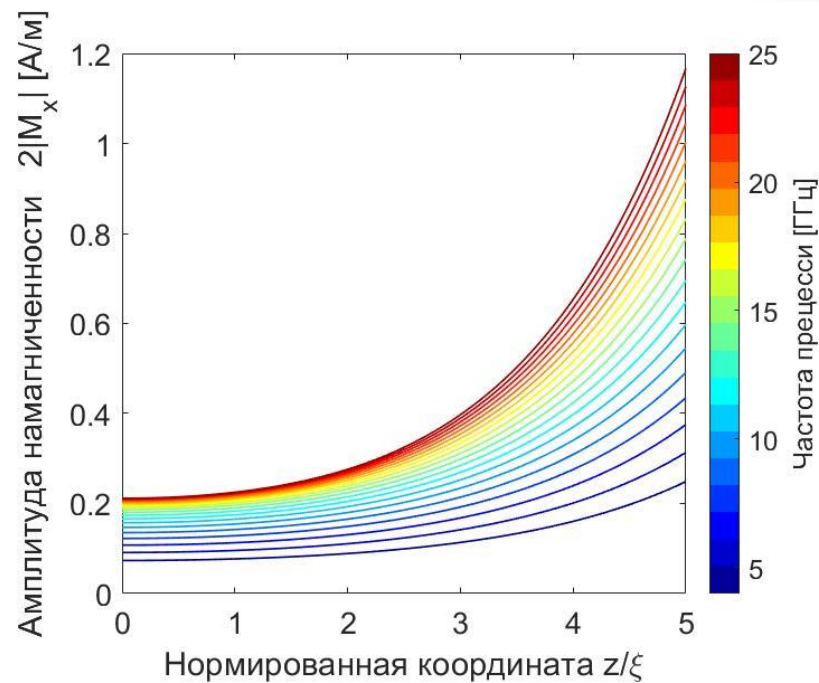
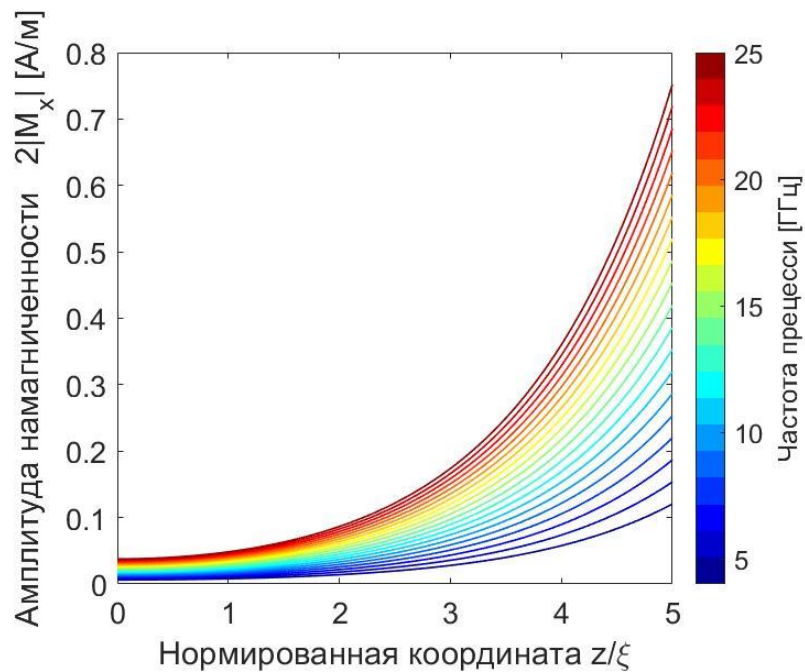
Induced magnetization



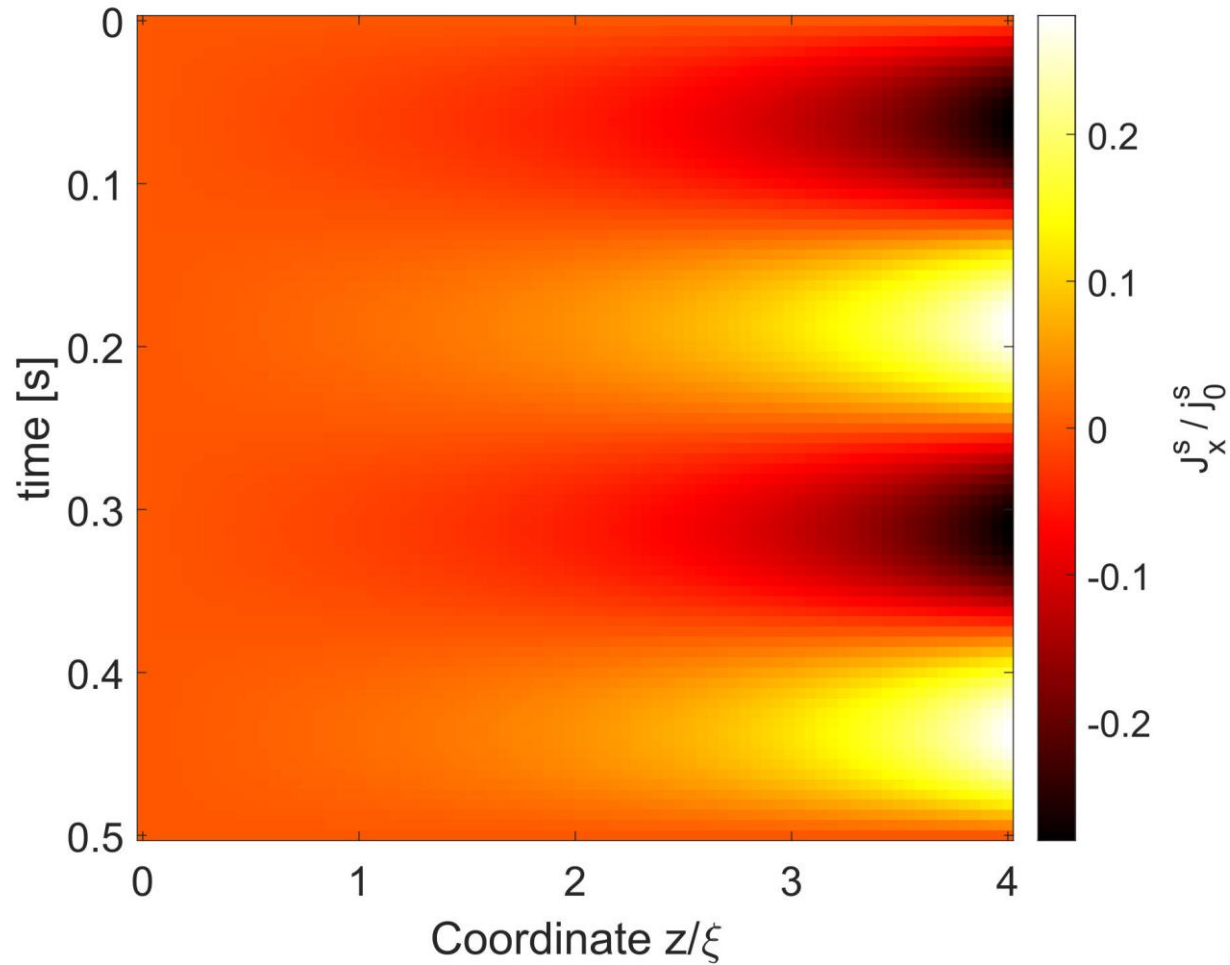
Spin Current



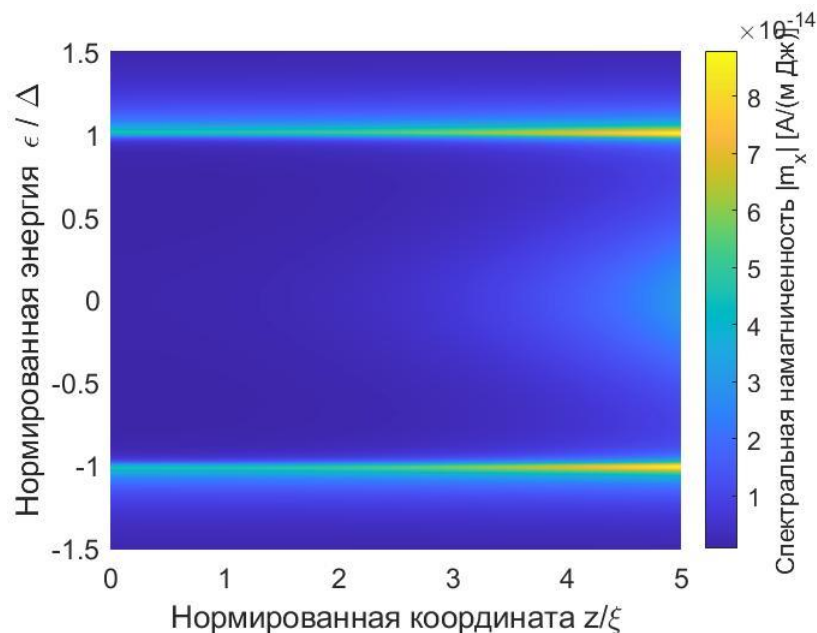
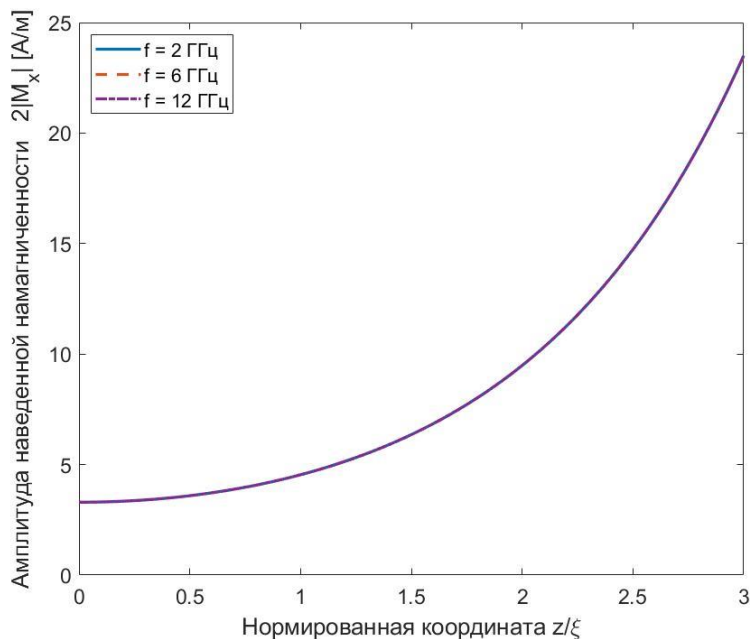
Зависимость наведенной намагниченности от частоты



Динамика намагниченности



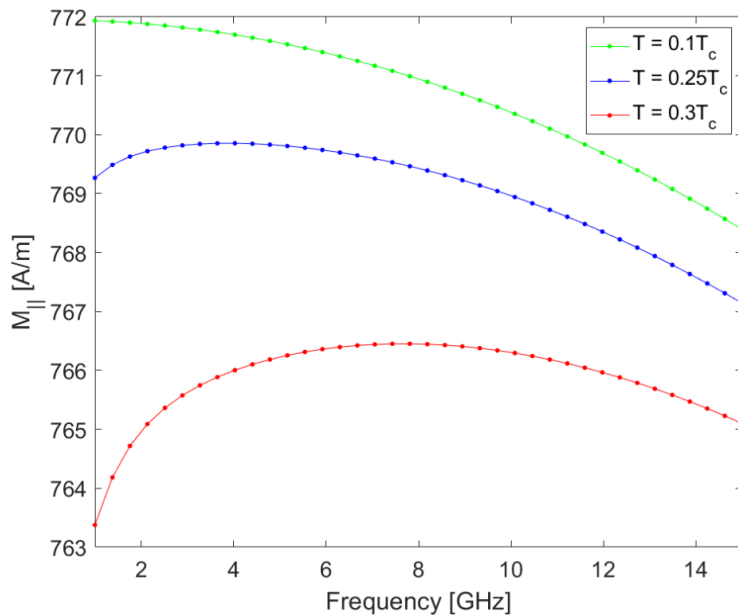
Наведенная намагниченность и спектральная намагниченность



$$\mathbf{M}_n = \frac{g\mu_B \hbar N_0}{8} \int d\omega \text{Sp} \left\{ \hat{\kappa} \hat{g}_n^{K(1)}(\omega) \right\}$$

$$\mathbf{m}_n(\omega) = \frac{g\mu_B \hbar N_0}{8} \text{Sp} \left\{ \hat{\kappa} \hat{g}_n^{K(1)}(\omega) \right\}$$

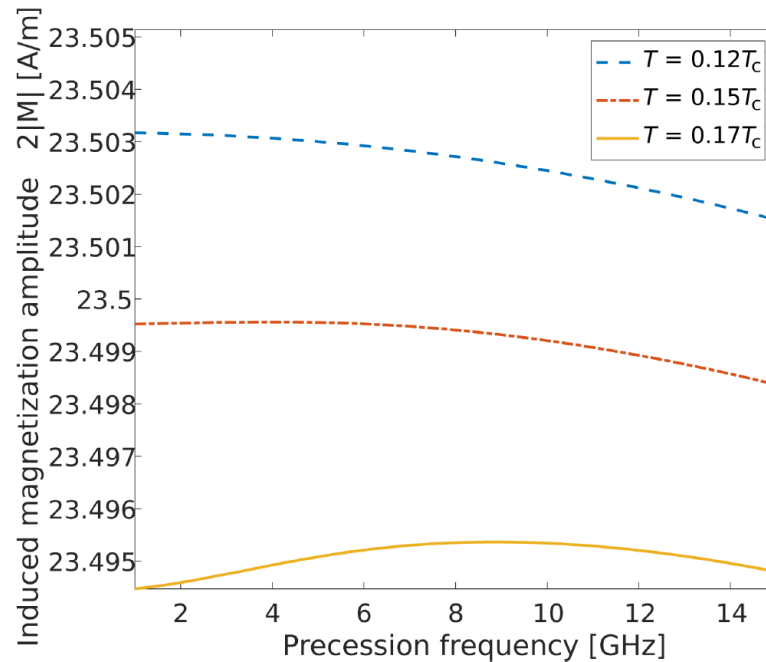
Роль квазичастиц. Намагниченность на интерфейсе



Алюминий

$$T_c = 1.2\text{K} \quad \Delta \approx 1.82 \times 10^{-4} \text{эВ}$$

$$f \approx 44 \text{ГГц}$$

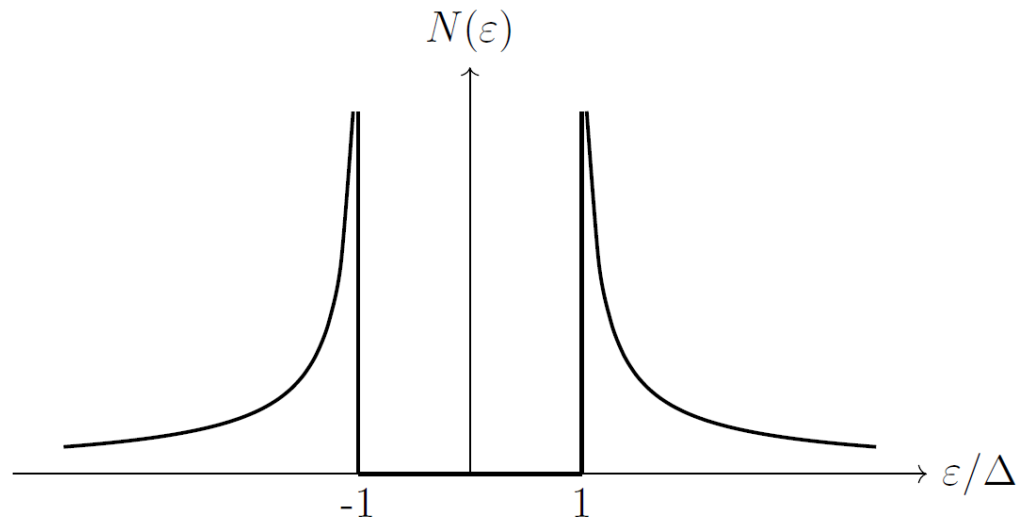


Ниобий

$$T_c = 9.2\text{K} \quad \Delta \approx 14 \times 10^{-4} \text{эВ}$$

$$f \approx 337 \text{ГГц!!!!!!}$$

Плотность состояний в сверхпроводнике и функция распределения



$$\hat{g}^K = \hat{g}^R \circ \hat{\psi} - \hat{\psi} \circ \hat{g}^A.$$

Функция распределения,
выраженная через функцию Грина

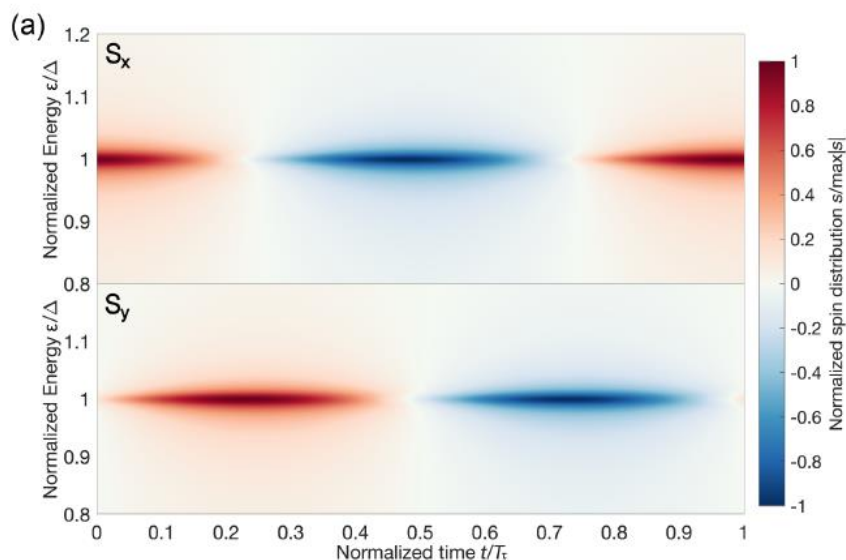
$$n \propto \int_{-\infty}^{\infty} d\omega Sp \{ N(z, \omega) \hat{\psi}(z, \omega) \}$$

Плотность квазичастиц может
быть выражена из функции
распределения

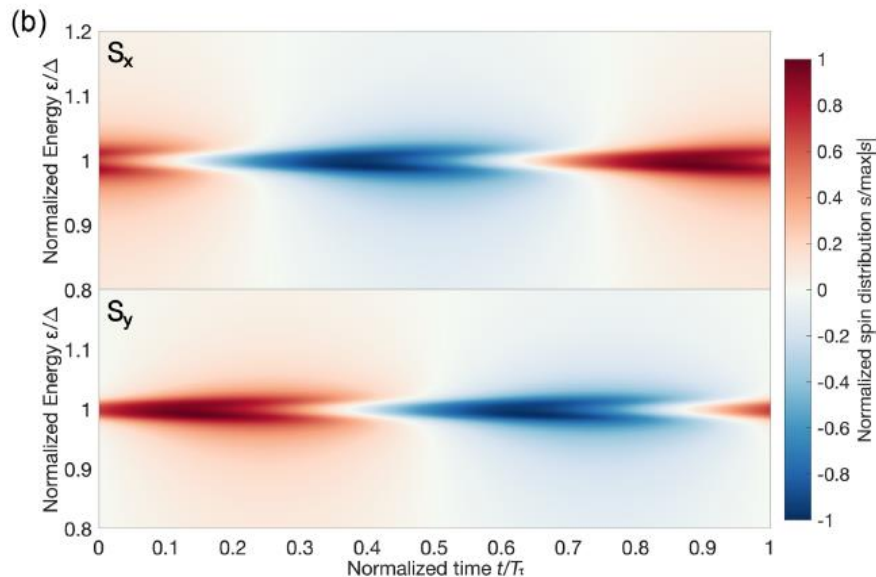
Функция распределения

$$\text{Tr}[\hat{\mathbf{k}}\hat{\Psi}] = \text{Tr}[\boldsymbol{\sigma}\Psi_{e1}] + \text{Tr}[\boldsymbol{\sigma}^*\Psi_{h1}]$$
$$S_{x,y}(z, \varepsilon, t) = \text{Tr}[\sigma_{x,y}\Psi_{e1}]$$

Функция распределения спиновой плотности

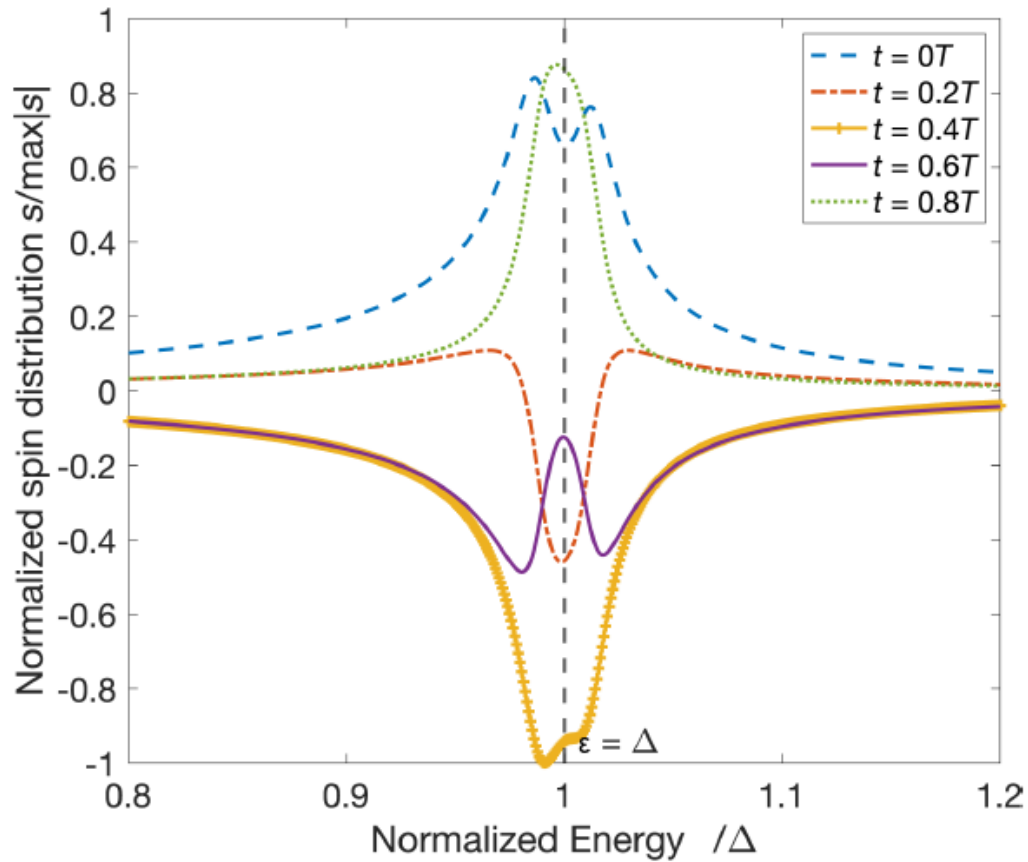


$$f = 1 \text{ ГГц}$$



$$f = 8 \text{ ГГц}$$

Функция распределения



Результаты

- Наведенная намагниченность на интерфейсе может зависеть от частоты, при наличии квазичастиц
- Накачка квазичастиц и сверхпроводящих корреляций, объясняет немонотонную зависимость наведенной намагниченности на интерфейсе
- Основной вклад в динамику наведенной намагниченности дает именно динамика спин-зависимой плотности состояний
- Наблюдается расщепление функции распределения спиновой плотности вблизи энергетической щели, данный эффект может быть обнаружен экспериментально в системах с неравновесной электрон-дырочной концентрацией

Благодарности

- Работа была выполнена рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ и по проекту «Зеркальные лаборатории».
- Также работа была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, Мегагрант № 075-15-2022-1108.