

Московский физико-технический институт
(государственный университет)
Институт физики твёрдого тела РАН

Магнитоэлектрические эффекты в тонкоплёночных структурах сверхпроводник/ферромагнетик

Выполнил:

студент 422 группы
Рабинович Даниил Сергеевич

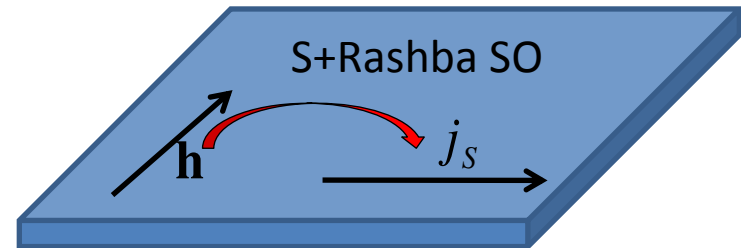
Научный руководитель:

к.ф.-м.н.
Бобкова Ирина Вячеславовна

Черноголовка 2018

Обратный магнитоэлектрический эффект

Сверхпроводящие системы:



Состояние с током не является основным состоянием системы:



Нулевой ток

Сверхток, наводимый $\Delta(x) = \Delta e^{i\chi'x}$

Геликоидальное состояние:

$$j = 0; \quad \chi' \approx \frac{\hbar\alpha p_F}{V_F E_F} \neq 0$$

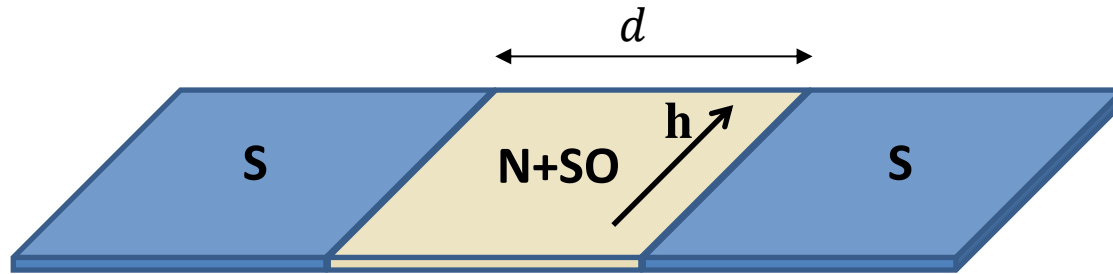
Edelstein, Sov. Phys. JETP **68**, 1244 (1989).

Samokhin, PRB **70** 104521 (2004);

Kaur, Agterberg, and Sigrist, PRL **94** 137002 (2005);

Dimitrova and Feigelman PRB **76** 014522 (2007)

Аномальный эффект Джозефсона



Магнитное поле \longrightarrow Джозефсоновский ток при нулевой разности фаз $j = j_c \sin(\chi - \chi_0)$

Как в диффузном, так и в баллистическом режимах

$$\chi_0 \propto \frac{\alpha p_F h d}{V_F E_F}$$

Buzdin PRL **101**, 107005 (2008)
A. G. Mal'shukov, S. Sadjina, and A. Brataas, PRB **81**, 060502 (2010)

Неоднородный ферромагнетик = однородный ферромагнетик + SO взаимодействие

Исходный спиновый базис \rightarrow локальный спиновый базис

$$\vec{h}(\vec{r})\vec{\sigma} \rightarrow h\sigma_z - M_{kj}\sigma_k\hat{p}_j$$

Эффективное спин орбитальное взаимодействие зависит
от магнитной неоднородности

В уравнения Горькова входит как обычная спин-орбита:

$$(\check{G}_0^{-1} + \mu - \check{\Sigma})\check{G}(\vec{r}, \vec{r}') = \delta(\vec{r} - \vec{r}'),$$

$$\check{G}_0^{-1} = -\frac{(\hat{p} - e\vec{A}\tau_z)^2}{2m} - M_{kj}\sigma_k\hat{p}_j + (i\omega + h\sigma_z)\tau_z$$

Симметричные условия для получения магнитоэлектрических эффектов в S/F системах

$$I = I(\chi, \vec{h})$$

\vec{h} – намагниченность ферромагнетика
 χ – характерная разность фаз в сверхпроводнике

Симметрия по обращению времени: $I(\chi, \vec{h}) = -I(-\chi, -\vec{h})$

Если в системе есть дополнительная симметрия $I(\chi, \vec{h}) = I(\chi, -\vec{h})$,

Магнитоэлектрические эффекты невозможны: $I(\chi, \vec{h}) = -I(-\chi, \vec{h})$

Для нарушения симметрии $I(\chi, \vec{h}) = I(\chi, -\vec{h})$ необходимы:

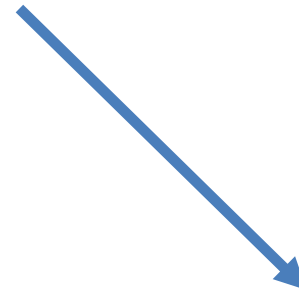
1. Некомпланарная намагниченность системы.
 2. Сильные ферромагнетики: необходим учёт расщепления сферы Ферми.
- M. A. Silaev, I. V. Tokatly, and F. S. Bergeret, PRB **95**, 184508 (2017)

Если $I(\chi, \vec{h}) \neq -I(-\chi, \vec{h})$

Обратный магнитоэлектрический эффект в S/F структурах

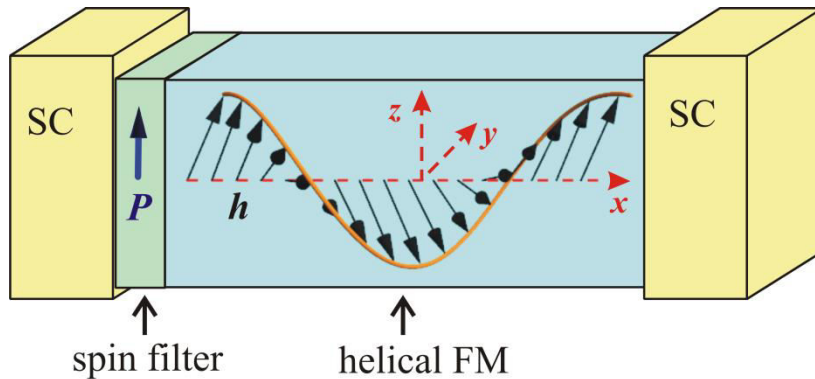


Аномальная разность фаз
в Джозефсоновском контакте



Неоднородные фазовые
состояния в S/F слоях

Джозефсоновский ток через слабый спиральный ферромагнетик

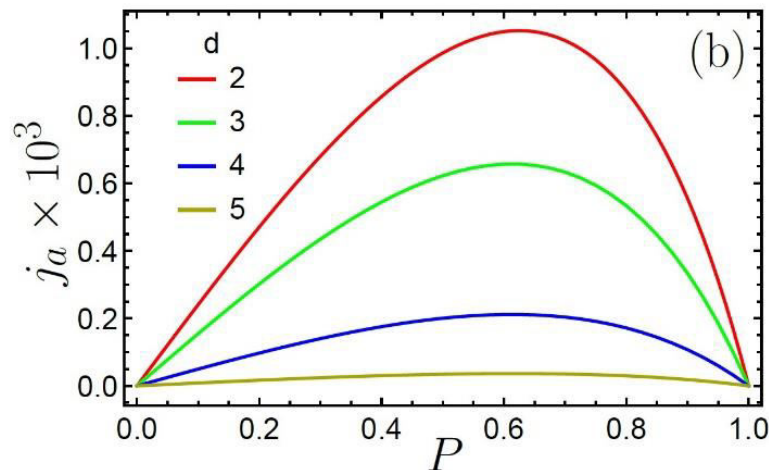


$$j(\chi) = j_c \sin \chi + j_a \cos \chi$$

$$\text{при } \vec{P} = 0 \quad j_a = 0;$$

A.F. Volkov, A. Anishchanka, and K.B. Efetov,
Phys. Rev. B.

при $\vec{P} \neq 0$ симметрия $j(\chi, \vec{h}) = I(\chi, -\vec{h})$ нарушается, и $j_a \neq 0$

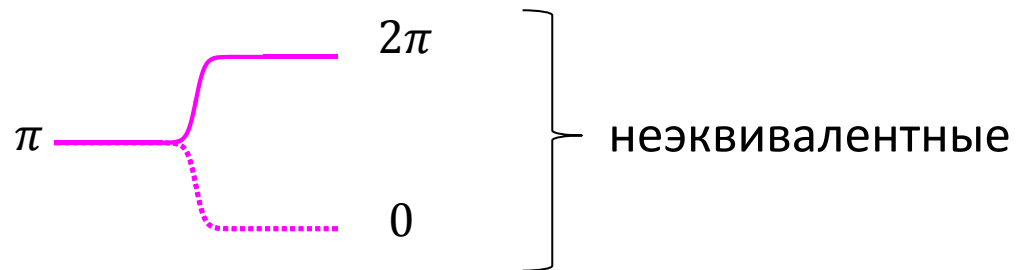
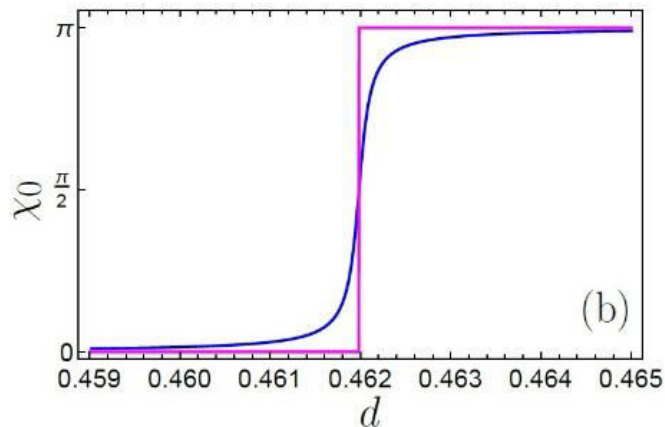
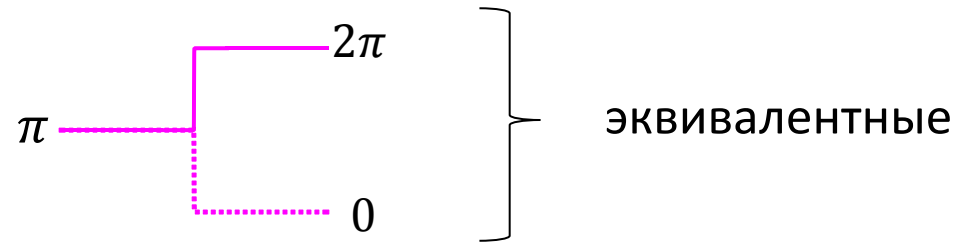
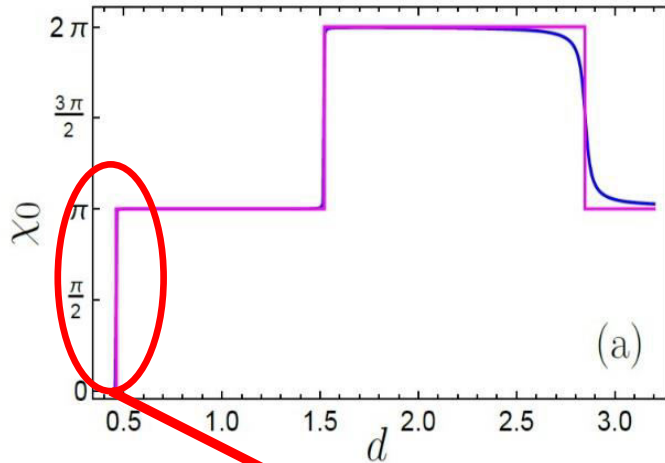


В основном состоянии $j = 0$

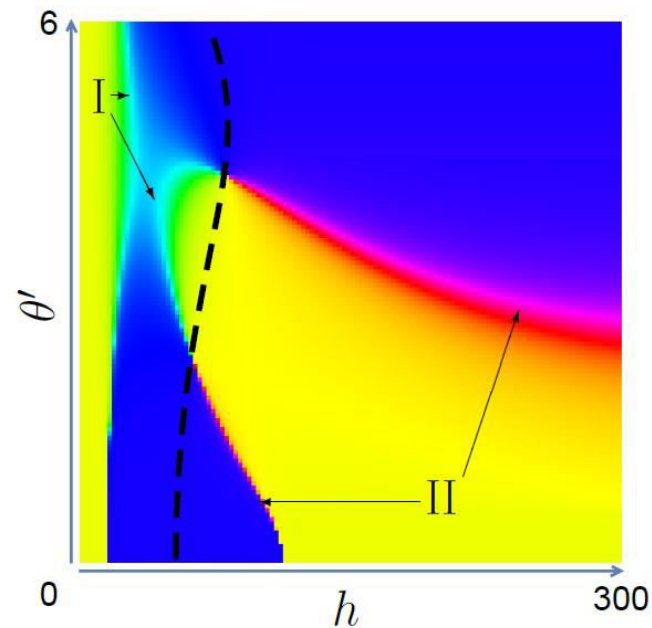
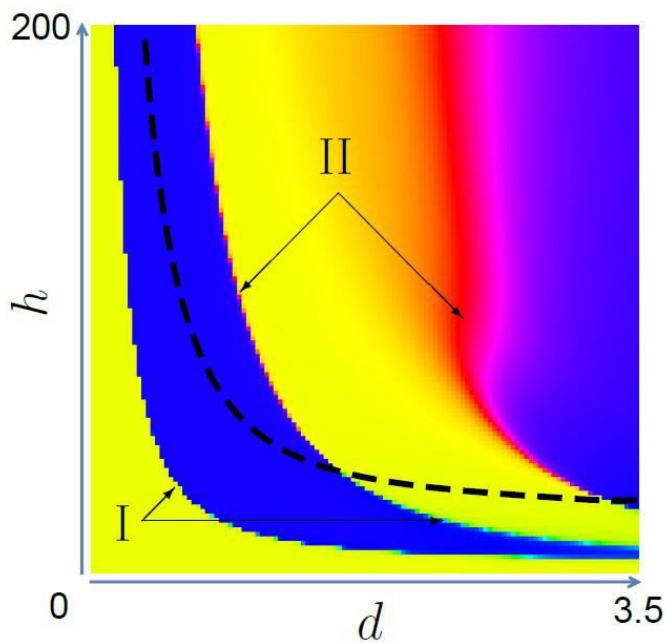
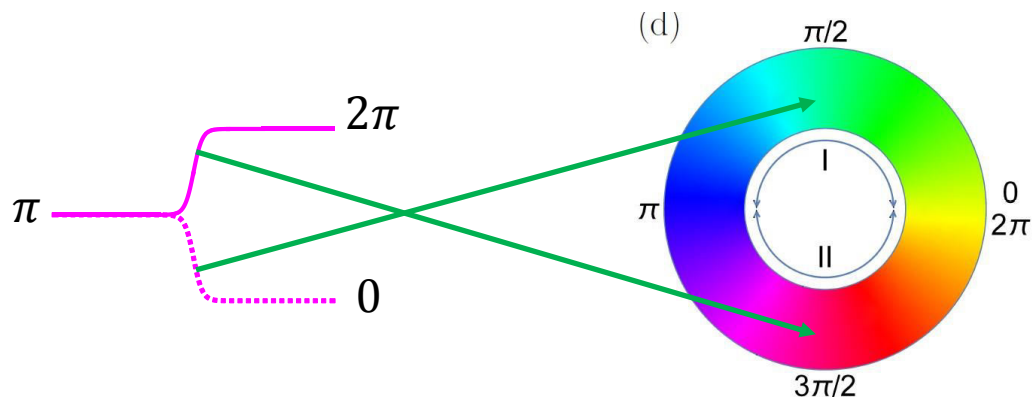
$$\tan \chi_0 = -j_a / j_c \neq 0$$

D. S. Rabinovich, I. V. Bobkova, A.M. Bobkov
and M. A. Silaev, Anomalous phase shift in a
Josephson junction via magnetic helix,
послана в печать

В широкой области параметров $j_a \ll j_c$, поэтому в основном состоянии χ_0 близко к 0 или π . Это нарушается вблизи 0 – π переходов.

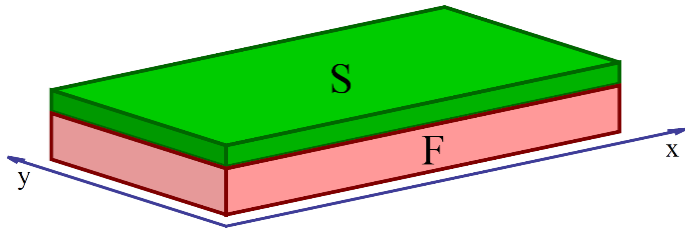


Топологически неэквивалентные 0 - π переходы



d в единицах ξ_N , h в единицах T , $\theta' = \frac{2\pi}{L}$ в единицах ξ_N^{-1}

Фазово-неоднородные сверхпроводящие состояния в S/сильныйF слое



Эффективное уравнение Узалея в плёнке

$$D\hat{V}(\hat{g}\hat{V}\hat{g}) = \left[\left(\omega + \frac{\Gamma_{\uparrow} + \Gamma_{\downarrow}}{2} \text{sgn}\omega - ih\sigma_z \right) \tau_z + \frac{\Gamma_{\uparrow} - \Gamma_{\downarrow}}{2} \text{sgn}\omega \sigma_z + i\hat{\Delta}, \hat{g} \right]$$

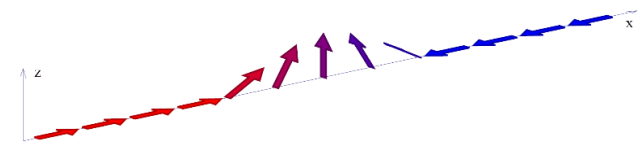
$\hat{V} = \nabla + i[\vec{M}_k \sigma_k m, \dots]$ – за счёт перехода в локальный базис

Магнитоэлектрический эффект наблюдается при $\Gamma_{\uparrow} \neq \Gamma_{\downarrow}$ - обеспечивается учётом расщепления сферы Ферми

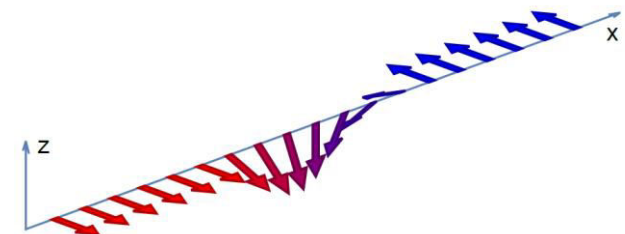
Структура ферромагнетика:



Стенка head-to-head

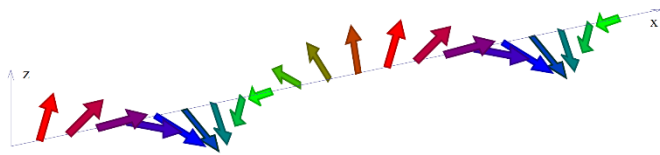


Блоховская стенка



Фазово-неоднородные сверхпроводящие состояния в S/сильный F слое

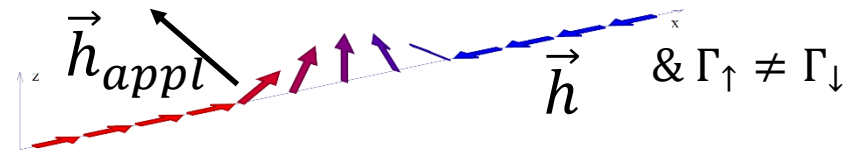
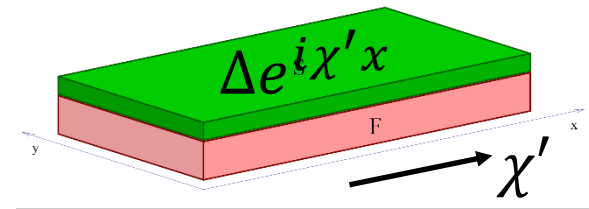
Магнитная спираль



$$\& \Gamma_{\uparrow} \neq \Gamma_{\downarrow}$$

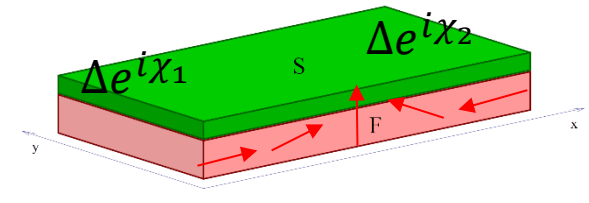


Геликоидальное состояние



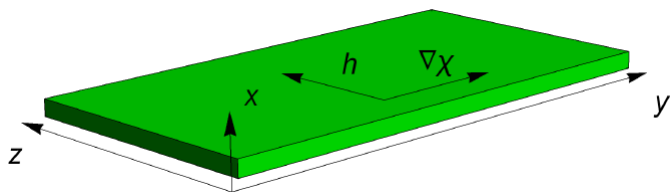
Спонтанная разность фаз

$$\chi_2 - \chi_1 = \frac{(\Gamma_{\uparrow} - \Gamma_{\downarrow}) h h_{appl}}{\pi^2 T^3}$$

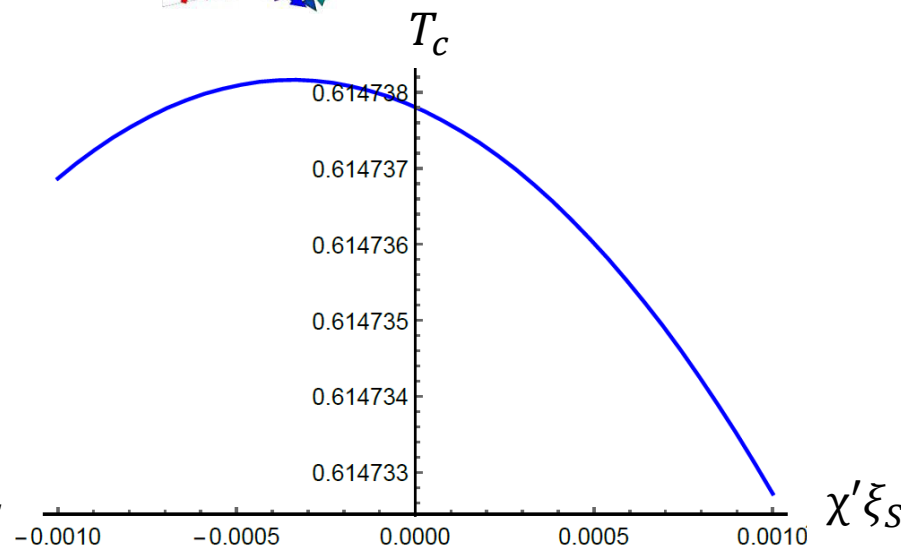
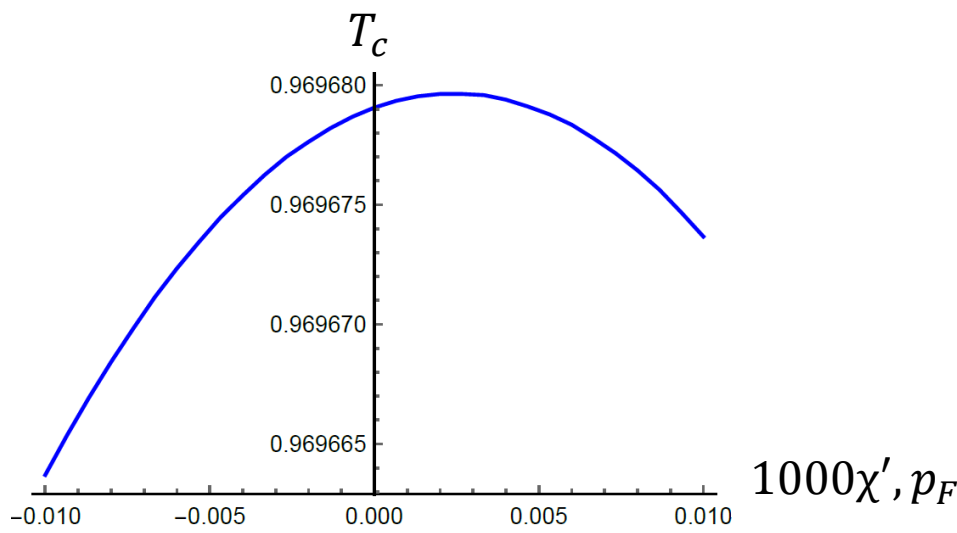
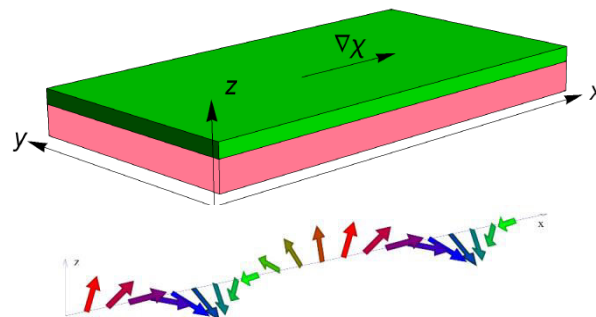


Асимметрия критической температуры как функции тока в геликоидальном состоянии

Плѐнка с SO в магнитном поле

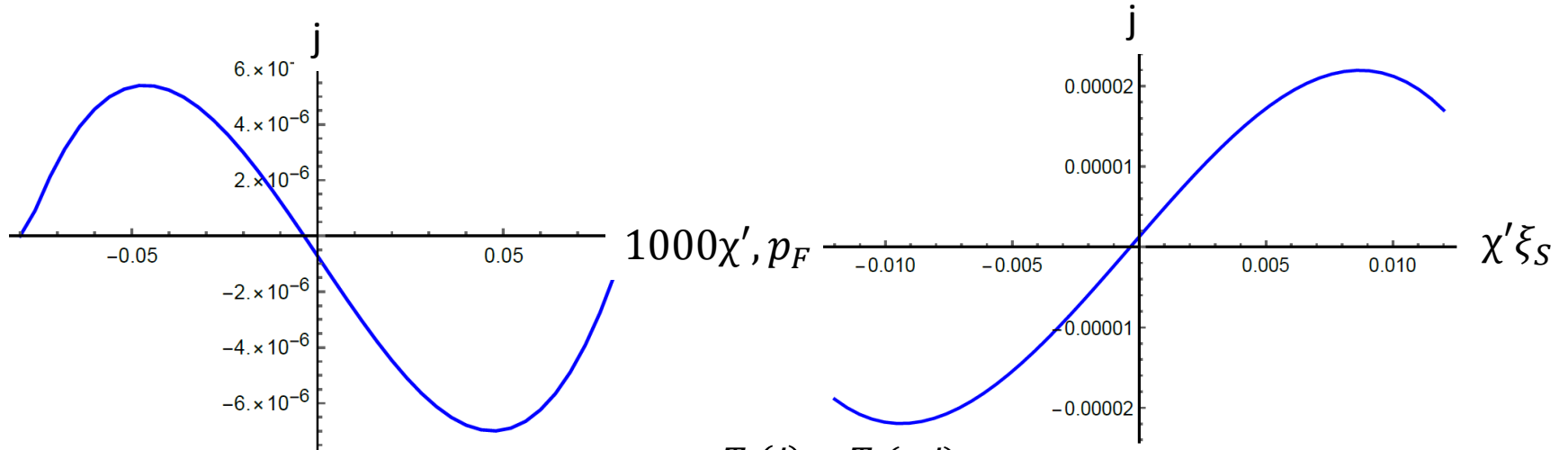


S/F структура со спиральным ферромагнетиком

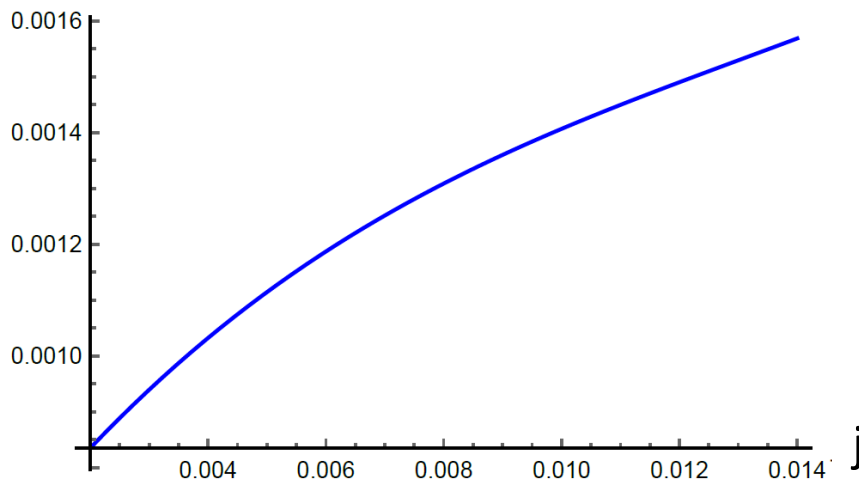


Наиболее энергетически выгодным состоянием является состояние с $\chi' \neq 0$

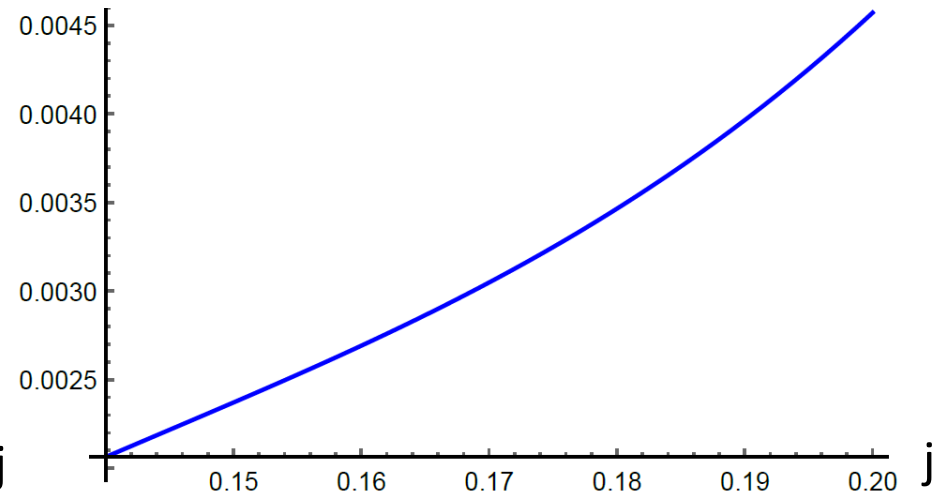
Асимметрия критической температуры как функции тока в геликоидальном состоянии



$$\frac{T_c(j) - T_c(-j)}{T_c(j)}$$



$$-\frac{T_c(j) - T_c(-j)}{T_c(j)}$$



Результаты

- Аномальная разность фаз в Джозефсоновском контакте через слабый ферромагнетик
- Два типа топологически неэквивалентных $0 - \pi$ переходов
- Метод учёта влияния сильного ферромагнетика в S/F бислое через эффективные параметры
- Спонтанные градиент и разность фаз в S/F бислое с сильным некопланарным ферромагнетиком
- Асимметрия функции $T_c(j)$ в геликоидальном состоянии

Спасибо за внимание!

Результаты

- Доклад на международном симпозиуме «Нанозфизика и наноэлектроника», Magnetoelectric effects in thin superconducting films in proximity to a strong inhomogeneous ferromagnet, март 2018
- D. S. Rabinovich, I. V. Bobkova, A.M. Bobkov and M. A. Silaev, Anomalous phase shift in a Josephson junction via magnetic helix, готовится к печати
- D. S. Rabinovich, I. V. Bobkova, A.M. Bobkov and M. A. Silaev, Magnetoelectric effects in thin superconducting films in proximity to a strong inhomogeneous ferromagnet, готовится к печати