# Сверхпроводящий триплетный спиновый клапан

Письма в ЖЭТФ **91**, 329 (2010) [JETP Letters **91**, 308 (2010)]
arXiv:1002.2113

**Я. Фоминов,[1] А. Голубов,[2] Т. Карминская,[3] М. Куприянов,[3]**
**Р. Дёминов,[4] Л. Тагиров[4]**

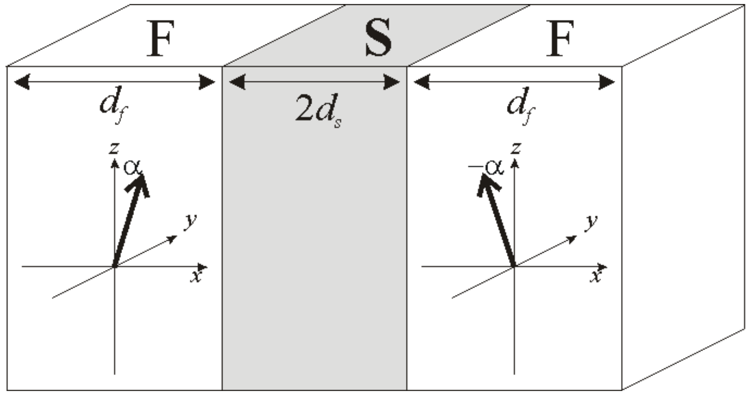
[1] ***ИТФ им. Ландау***

[2] ***University of Twente, The Netherlands***

[3] ***НИИЯФ МГУ***

[4] ***КГУ***

# Введение




Теория:

- $T_c^{\mathrm{P}} < T_c^{\mathrm{AP}}$ (компенсация обменных полей при AP ориентации), поэтому обычный эффект переключения: $\Delta T_c = T_c^{\mathrm{AP}} - T_c^{\mathrm{P}} > 0$ - сверхпроводящий спиновый клапан [Tagirov (1999); Buzdin, Vedyayev, Ryzhanova (1999)]

- Дальнодействующие триплетные сверхпроводящие корреляции при неколлинеарных ориентациях

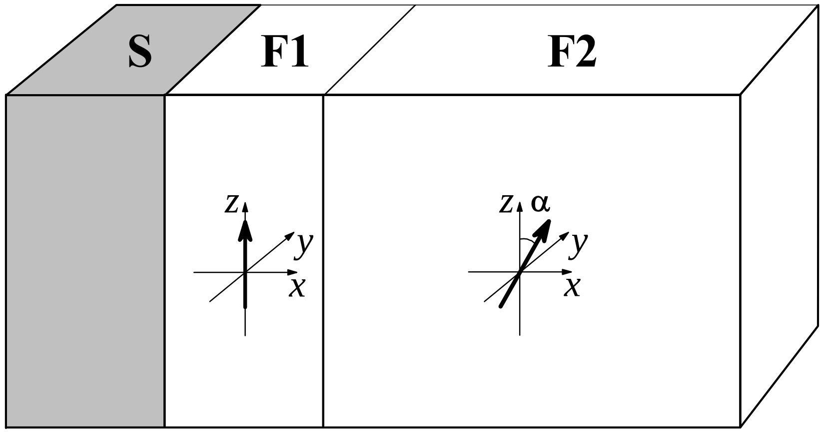
( $k_h = \sqrt{h/D} \gg k_\omega = \sqrt{2\omega/D}$ – «короткие» и «длинные» корреляции)
[Bergetet, Volkov, Efetov (2001)]

- $T_c(\alpha)$ при всех $\alpha$; монотонная зависимость [Fominov, Golubov, Kupriyanov (2003)]

Эксперимент:

- От $\Delta T_c \approx 3$ mK [Gu et al. (2002)] до максимального $\Delta T_c \approx 41$ mK [Moraru et al. (2006)]
- Иногда $\Delta T_c < 0$ – обратный эффект переключения

# Мотивация




Теория:

Просто другой порядок слоёв, качественно всё то же, что и в FSF

[Oh, Youm, Beasley (1997)]

Эксперимент:

Максимальное $\Delta T_c(\alpha) \approx 200$ mK

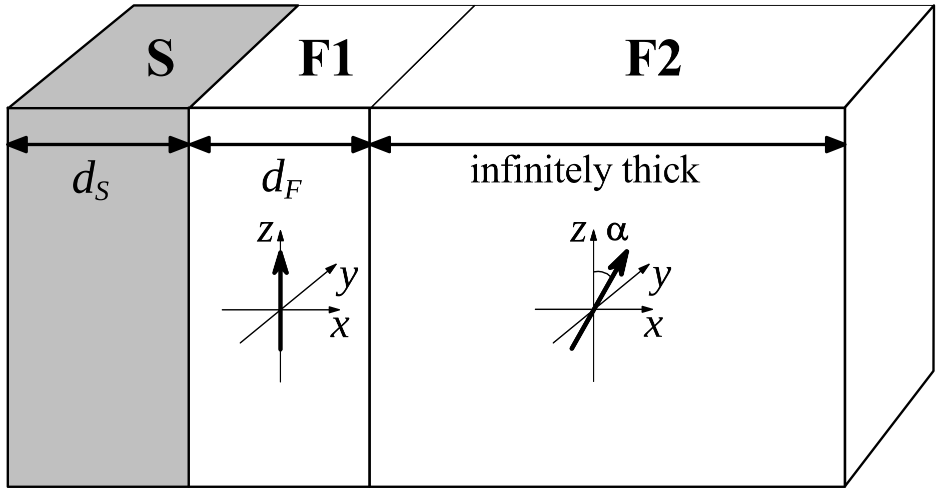
[Nowak et al. (2008)]

– гораздо больше, чем в FSF

Вопросы:

- Свидетельствуют ли экспериментальные данные о новом качественном эффекте?
- Эффект «ширмы» при $k_h^{-1} \ll d_{F1} \ll k_\omega^{-1}$ ?
- Немонотонная зависимость $T_c(\alpha)$ ?

# Постановка задачи




- Прозрачные границы (непрерывность функции Грина)
- Одинаковые коэффициенты диффузии разных слоёв (непрерывность производной функции Грина)
- Бесконечно толстый слой F2
- $h << E_F$

# Уравнения

$$\frac{D}{2}\frac{d^2\check{f}}{dx^2} - |\omega|\check{f} - \frac{i\,\mathrm{sgn}\,\omega}{2}\{\hat{\tau}_0(\mathbf{h}\hat{\boldsymbol{\sigma}}),\check{f}\} + \Delta\hat{\tau}_1\hat{\sigma}_0 = 0$$

Характерные волновые векторы: $k_h = \sqrt{h/D}, \quad k_\omega = \sqrt{2\omega/D}$

$$\check{f} = \hat{\tau}_1\left(f_0\hat{\sigma}_0 + f_3\hat{\sigma}_3 + f_2\hat{\sigma}_2\right)$$

- матрица 4×4 в пространстве Намбу-Горьков ⊗ спин

$\hat{\tau}$ - матрицы Паули в пространстве Намбу-Горькова

$\hat{\sigma}$ - матрицы Паули в спиновом пространстве

Симметрии, волновые векторы в F:

| | | |
|---|---|---|
| $f_0(-\omega) = f_0(\omega),$ | $(1+i)k_h$ | - синглет |
| $f_3(-\omega) = -f_3(\omega),$ | $(1+i)k_h$ | - триплет с проекцией 0 |
| $f_2(-\omega) = -f_2(\omega),$ | $k_\omega$ | - триплет с проекциями ±1 |

# Эффективная задача

В явном виде можно найти всё кроме компоненты $f_0(x)$ в S - именно она самосогласованно зацеплена за $\Delta(x)$.

В результате эффективно получается задача на $f_0(x)$:

$$\Delta \ln \frac{T_{cS}}{T_c} = 2\pi T_c \sum_{\omega>0} \left( \frac{\Delta}{\omega} - f_0 \right)$$

$$\frac{D}{2} \frac{d^2 f_0}{dx^2} - \omega f_0 + \Delta = 0,$$

$$\left. \frac{df_0}{dx} = 0 \right|_{x=-d_S}, \qquad \left. -\xi \frac{df_0}{dx} = W f_0 \right|_{x=0}.$$

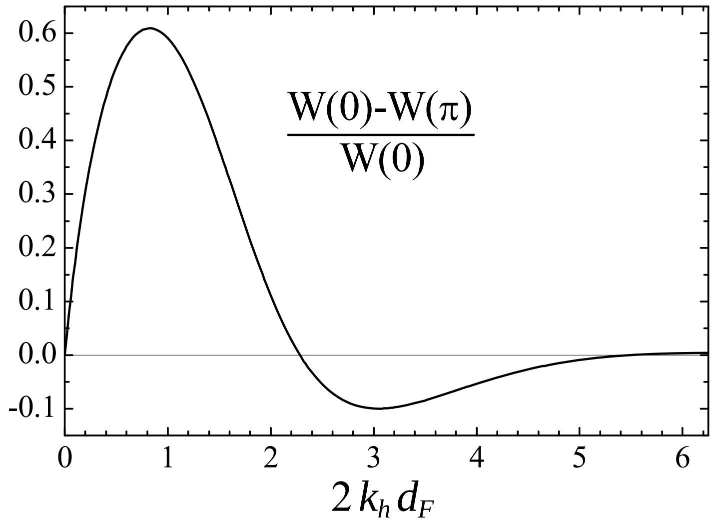
Чем больше $W$, тем меньше $T_c$.

Дальше: аналитика при $k_\omega << k_h$, численно – при произвольном соотношении.

# Обычное и обратное переключение

$$W(0) = 2k_h\xi$$

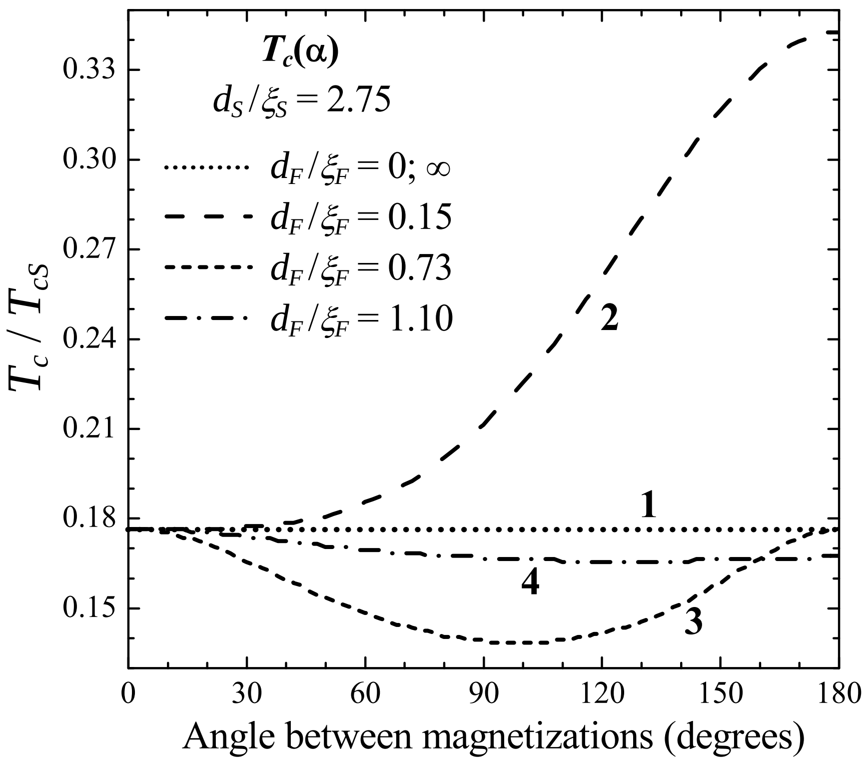
$$W(0) - W(\pi) = 2k_h\xi \frac{\sqrt{2}\sin(2k_h d_F + \pi/4) - e^{-2k_h d_F}}{\sinh(2k_h d_F) + \cos(2k_h d_F)}$$

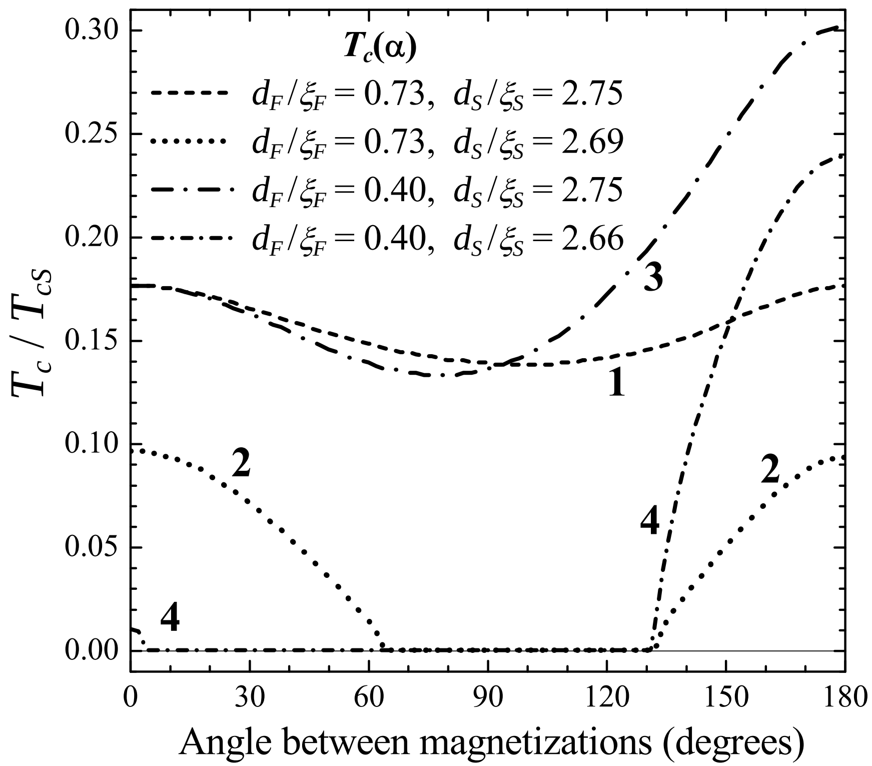



Возможно как обычное ($T_c^{\mathrm{P}} < T_c^{\mathrm{AP}}$), так и обратное переключение ($T_c^{\mathrm{P}} > T_c^{\mathrm{AP}}$)

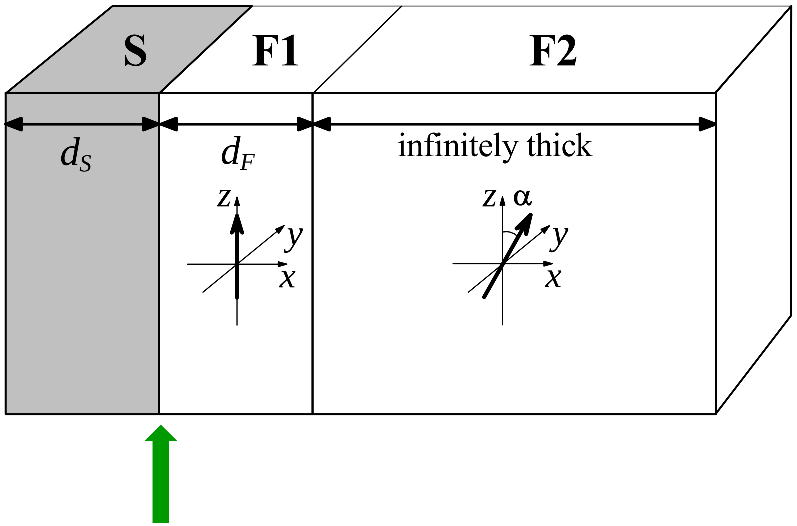
# Триплетный спиновый клапан

$W(\alpha)$ возрастает при отклонении $\alpha$ от $0$ и $\pi$ (аналитика при $k_\omega << k_h$), поэтому $T_c(\alpha)$ имеет минимум при некоторой неколлинеарной ориентации



# Результаты при больших $d_F$




$$f_2 \propto e^{-k_\omega d_F - k_h d_F}$$

$$W(\alpha) - W(0) \propto e^{-2k_h d_F}$$

– показатель экспоненты не содержит малого $k_\omega$, т.к. $T_c$ определяется уравнением согласования, которое содержит только короткодействующую синглетную компоненту

# Выводы

- В системе SFF возможно как обычное ($T_c^{\mathrm{P}} < T_c^{\mathrm{AP}}$), так и обратное переключение ($T_c^{\mathrm{P}} > T_c^{\mathrm{AP}}$)

- Минимум $T_c(\alpha)$ достигается при неколлинеарной ориентации, отсюда возможность реализации триплетного спинового клапана

- Экспериментальное обнаружение немонотонной или возвратной зависимости $T_c(\alpha)$ можно считать признаком наличия в системе дальнодействующих триплетных сверхпроводящих корреляций

# Запас

$$
\begin{pmatrix}
0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{k}_h & \tilde{k}_h^* & 0 & 0 & 0 & -k_\omega \operatorname{th}(k_\omega d_S) & 0 \\
0 & 0 & 0 & k_\omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_\omega \operatorname{th}(k_\omega d_S) \\
0 & \operatorname{ch}(\tilde{k}_h d_F) & -\operatorname{ch}(\tilde{k}_h^* d_F) & 0 & \operatorname{sh}(\tilde{k}_h d_F) & -\operatorname{sh}(\tilde{k}_h^* d_F) & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\
0 & \operatorname{ch}(\tilde{k}_h d_F) & \operatorname{ch}(\tilde{k}_h^* d_F) & 0 & \operatorname{sh}(\tilde{k}_h d_F) & \operatorname{sh}(\tilde{k}_h^* d_F) & \sin\alpha & -\cos\alpha & -\cos\alpha & 0 & 0 \\
\operatorname{ch}(k_\omega d_F) & 0 & 0 & \operatorname{sh}(k_\omega d_F) & 0 & 0 & -\cos\alpha & -\sin\alpha & -\sin\alpha & 0 & 0 \\
0 & \tilde{k}_h \operatorname{sh}(\tilde{k}_h d_F) & -\tilde{k}_h^* \operatorname{sh}(\tilde{k}_h^* d_F) & 0 & \tilde{k}_h \operatorname{ch}(\tilde{k}_h d_F) & -\tilde{k}_h^* \operatorname{ch}(\tilde{k}_h^* d_F) & 0 & \tilde{k}_h & -\tilde{k}_h^* & 0 & 0 \\
0 & \tilde{k}_h \operatorname{sh}(\tilde{k}_h d_F) & \tilde{k}_h^* \operatorname{sh}(\tilde{k}_h^* d_F) & 0 & \tilde{k}_h \operatorname{ch}(\tilde{k}_h d_F) & \tilde{k}_h^* \operatorname{ch}(\tilde{k}_h^* d_F) & -k_\omega \sin\alpha & \tilde{k}_h \cos\alpha & \tilde{k}_h^* \cos\alpha & 0 & 0 \\
k_\omega \operatorname{sh}(k_\omega d_F) & 0 & 0 & k_\omega \operatorname{ch}(k_\omega d_F) & 0 & 0 & k_\omega \cos\alpha & \tilde{k}_h \sin\alpha & \tilde{k}_h^* \sin\alpha & 0 & 0
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ A \\ B \end{pmatrix}
=
\begin{pmatrix} f_0(0) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}
$$

$$W''(0) = \frac{4k_h^2}{k_\omega} e^{-(2k_h + k_\omega) d_F - k_\omega d_S} \cdot \frac{\cosh(k_\omega d_F)}{\cosh(k_\omega d_S)} \left[\cosh(2k_\omega d_S) + \sinh(2k_\omega d_S) \tanh(k_\omega d_F) + 1\right] \sin^2(k_h d_F) \geqslant 0,$$

$$W''(\pi) = \frac{16k_h^2}{k_\omega} e^{-k_\omega d_F - k_\omega d_S} \cdot \frac{\sinh^2(k_h d_F) \left[\cosh(k_\omega d_F) \cosh(k_\omega d_S) + \sinh(k_\omega d_F) \sinh(k_\omega d_S)\right] \sin^2\left(k_h d_F + \frac{\pi}{4}\right)}{\left[\sinh(2k_h d_F) + \cos(2k_h d_F)\right]^2} \geqslant 0.$$

$$
\begin{aligned}
W(\alpha) - W(0) &= -4k_h b(\alpha) e^{-2k_h d_F}, \\
b(\alpha) &= \frac{\text{numer}}{\text{denom}}, \\
\text{numer} &= \sin\kappa (1 - \cos\alpha) \left\{ (\sin\kappa - \cos\kappa) \sin^2\alpha - 2\gamma \cos^2\alpha [\cos\kappa + (2\sin\kappa + \cos\kappa)\cos\alpha] \right\} - \\
&\quad - \left\{ \sin\kappa \sin^2\alpha - \gamma\cos^2\alpha (\sin\kappa + \cos\kappa)(1 - \cos\alpha) \right\} \left\{ \sin\kappa - \cos\kappa + (3\sin\kappa + \cos\kappa)\cos\alpha \right\}, \\
\text{denom} &= \left\{ \sin\kappa + (\sin\kappa + 2\cos\kappa)\cos\alpha \right\} \left\{ (\cos\kappa - \sin\kappa)\sin^2\alpha + 2\gamma\cos^2\alpha \left[\cos\kappa + (2\sin\kappa + \cos\kappa)\cos\alpha\right] \right\} + \\
&\quad + \left\{ \sin\kappa - \cos\kappa + (3\sin\kappa + \cos\kappa)\cos\alpha \right\} \left\{ \sin\kappa \sin^2\alpha + \gamma\cos^2\alpha \left[\sin\kappa - \cos\kappa - (\sin\kappa + 3\cos\kappa)\cos\alpha\right] \right\}
\end{aligned}
$$