Электродинамика гибридных структур ферромагнетик-сверхпроводник

А.В. Самохвалов

ИФМ РАН

Институт физики микроструктур РАН,
г. Нижний Новгород

НВ-18 02 марта 2018

Сверхпроводящая спинтроника

Сверхпроводимость и магнетизм – два примера макроскопических квантовых явлений

Спинтроника – управление током через воздействие на спин электронов

Сверхпроводящая спинтроника - управление сверхпроводящим транспортом через воздействие на спин электронов

Спин-поляризованные сверхтоки сочетают макроскопическую квантовую когерентность с микроскопическим обменным взаимодействием, спиновой селективностью и спиновым переносом.

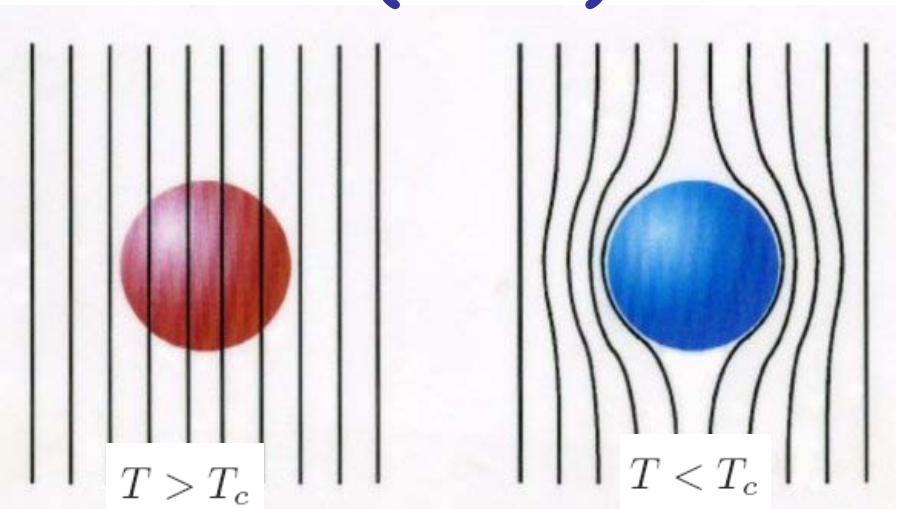
Гибридные структуры сверхпроводник-ферромагнетик (SF)

Взаимодействие сверхпроводимости и магнетизма вблизи SF границы создает новое состояние, обеспечивающее дальнодействующий управляемый (спиновый) транспорт без диссипации.

Сверхпроводимость и магнетизм: игра взаимодействий

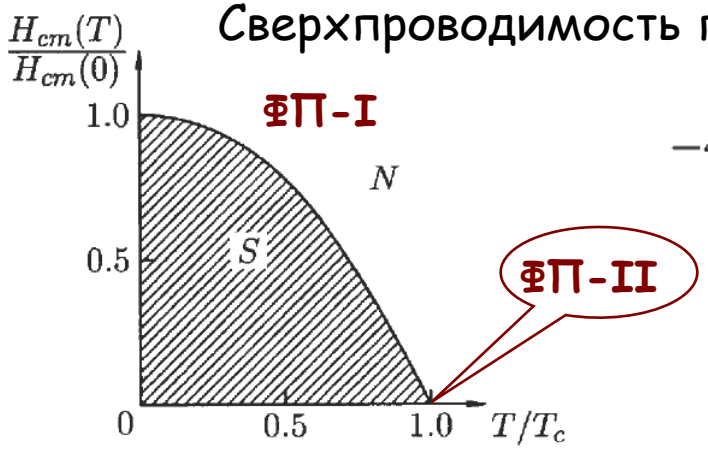
I. Магнитные свойства сверхпроводников
II. Механизмы конкуренции сверхпроводимости и магнетизма.
III. Электромагнитное взаимодействие.
IV. Сосуществование сверхпроводимости и магнетизма.
V. Электродинамика гибридных FS структур с эффектом близости

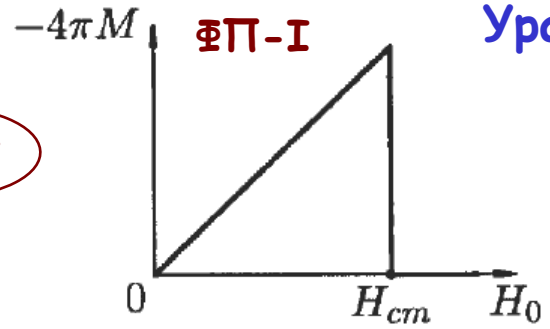
Эффект Мейсснера-Оксенфельда (1933)



Сверхпроводимость первого рода

$$\rho = 0 \qquad B = 0$$





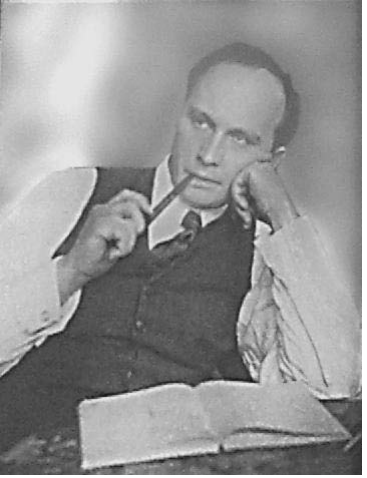
Уравнения Лондонов (1935)

$$\vec{E} = \frac{d}{dt}\left(\Lambda \vec{j}_s\right)$$

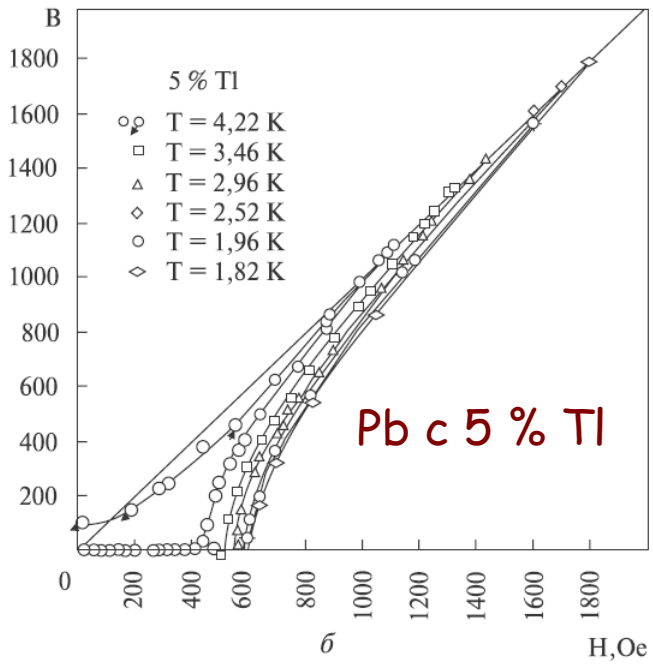
$$\vec{j}_s = -\frac{c}{4\pi\lambda^2}\vec{A}$$

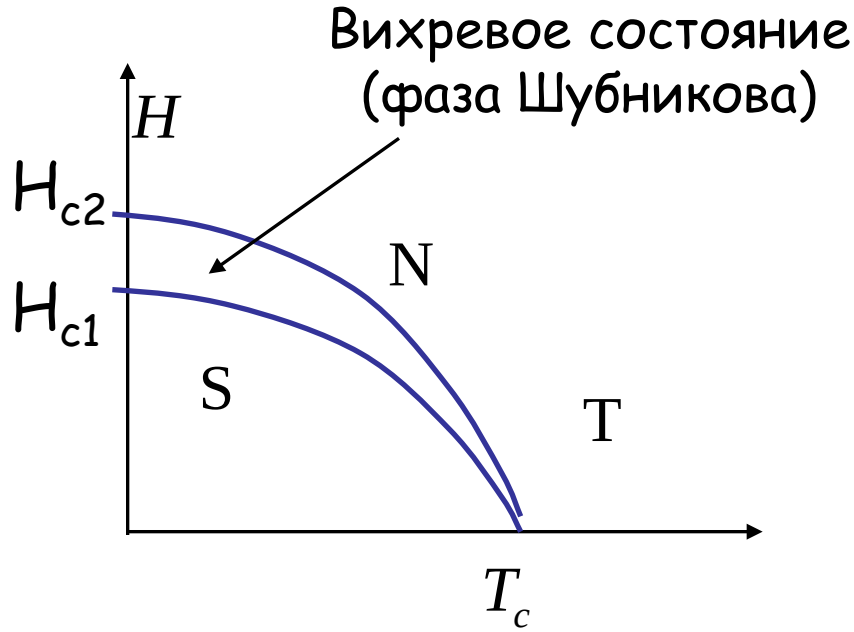
$$\lambda^{-2} = \frac{4\pi e^2 n_s}{mc^2} \qquad \Lambda = \frac{4\pi\lambda^2}{c^2}$$

Meissner W., Ochsenfeld R. Naturwiss. (1933).
Rjabinin J.N., **Schubnikow L.W**. Phys.Z.Sowjet. (1934).



Проникновение магнитного поля в сверхпроводящие сплавы. Фаза Шубникова (1935 -1937)





Сверхпроводимость второго рода

L.W. Schubnikow, W.I. Chotkewitsch, J.D. Schepelew, J.N. Rjabinin, Phys. Z. Sowiet. (1936).

Шубников Л.В., Хоткевич В.И., Шепелев Ю.Д., Рябинин Ю.Н., ЖЭТФ (1937).

Теория Гинзбурга-Ландау (1950)

$$\Psi = \sqrt{\frac{n_s}{2}}\, e^{i\phi}$$

Параметр порядка

Свободная энергия:

$$F = F_n + \int dV \left(\frac{\hbar^2}{4m} \left| \left(\nabla - \frac{2ie}{\hbar c} \vec{A} \right) \Psi \right|^2 + a\,|\Psi|^2 + \frac{b}{2}|\Psi|^4 + \frac{\vec{B}^2}{8\pi} - \frac{\vec{B}\vec{H}}{4\pi} \right)$$

$$a = \alpha\,(T - T_c)$$

$$n_s/2 = \frac{\alpha\,|T - T_c|}{b}$$

Вариации функционала:

Уравнения Гинзбурга-Ландау

$$-\frac{\hbar^2}{4m} \left(\nabla - \frac{2ie}{\hbar c} \vec{A} \right)^2 \Psi + a\,\Psi + \frac{b}{2}|\Psi|^2\,\Psi = 0$$

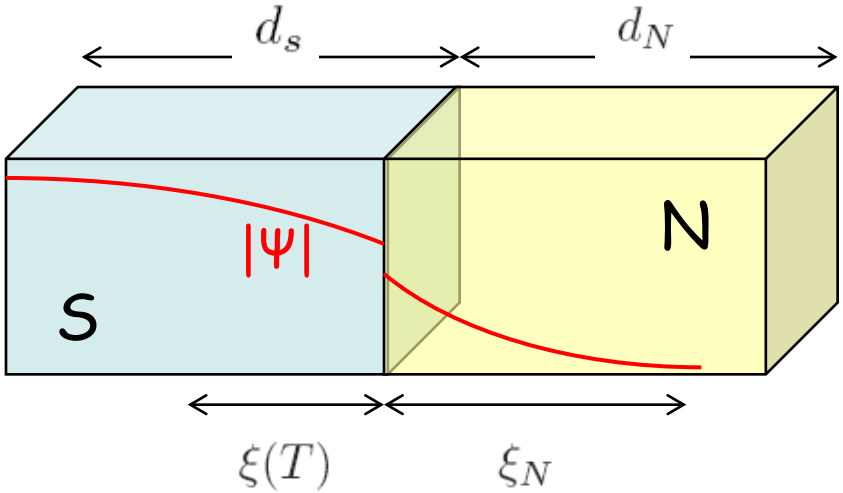
$$\mathrm{rot}\vec{B} = \frac{4\pi}{c}\,\vec{j}_s \qquad \vec{j}_s = -\frac{ie\hbar}{2m}\,(\,\Psi^*\,\nabla\Psi - \Psi\,\nabla\Psi^*) - \frac{2e^2}{mc}\,|\Psi|^2\,\vec{A}$$

$$\vec{j}_s = \frac{e\hbar}{2m}\,|\Psi|^2 \left(\nabla\phi - \frac{2e}{\hbar c}\,\vec{A} \right)$$

Уравнение Лондонов

В.Л. Гинзбург, Л.Д. Ландау, ЖЭТФ 20, 1064 (1950)

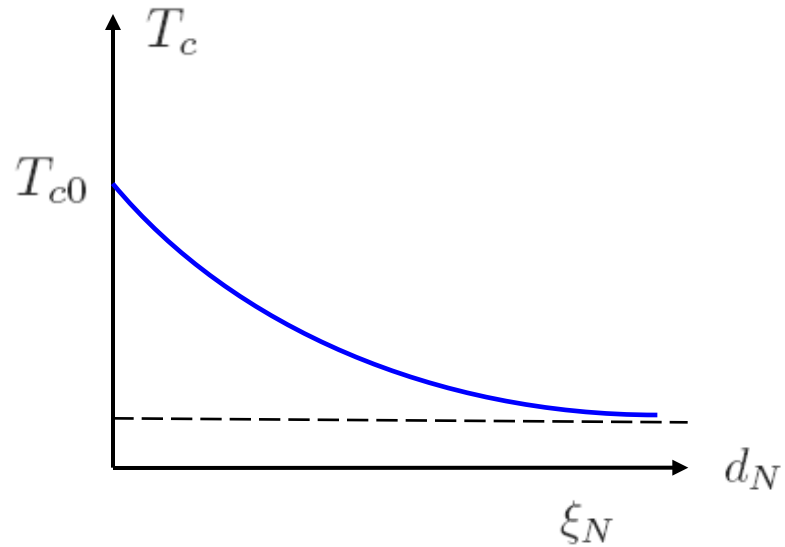
Эффект близости на SN границе



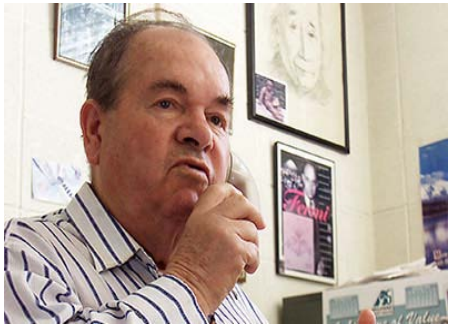
$$\xi(T) = \frac{\xi_s}{\sqrt{1 - T/T_{c0}}} \qquad \xi_s = \sqrt{\frac{\hbar D_S}{2\pi T_{c0}}}$$

$$\xi_N = \sqrt{\frac{\hbar D_N}{2\pi T_{c0}}}$$

ГЛ
$$\begin{cases} \xi^2(T) = \dfrac{\hbar^2}{4\,m\,\alpha|T - T_c|} \\[2ex] \lambda^2 = \dfrac{m\,c^2}{8\,\pi\,e^2}\dfrac{b}{\alpha\,|T - T_c|} = \lambda_L^2 \end{cases}$$



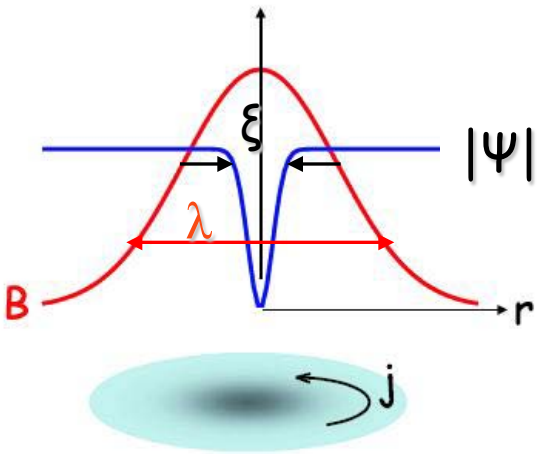
$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi}$$ Параметр Гинзбурга-Ландау

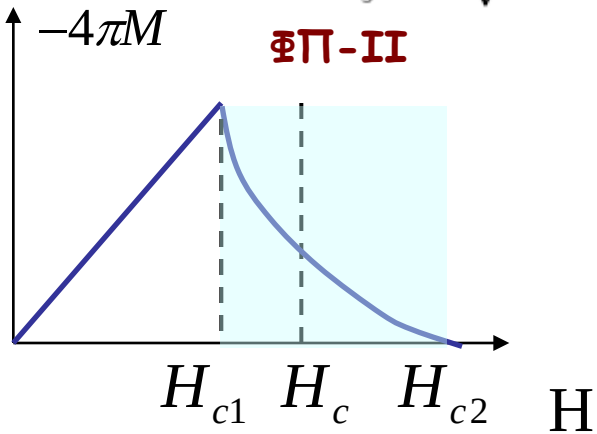


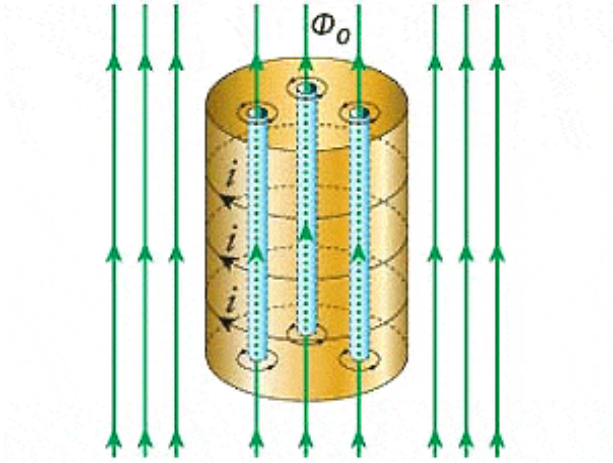
Вихревая фаза Абрикосова (1957)
(сверхпроводники второго рода)

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} > \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Вихрь Абрикосова





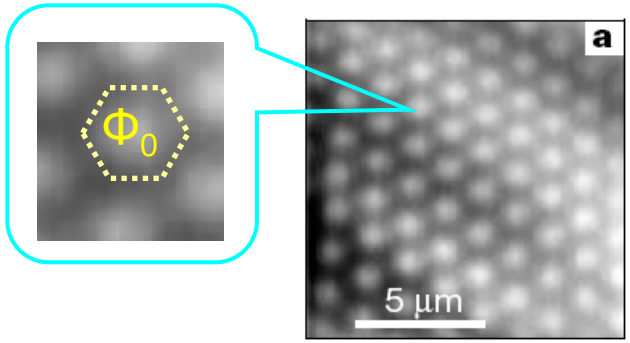


Вихревая материя

$$H_{c1} = \frac{\Phi_0}{4\pi\lambda^2} \ln \frac{\lambda}{\xi}$$

$$H_{c2} = \frac{\Phi_0}{2\pi\xi^2}$$

$$\Phi_0 = \frac{\pi\hbar c}{e}$$



Монокристалл BSCCO
Сканирующая холловская микроскопия
[Grigorenko et al, Nature 2001]

А.А.Абрикосов, ЖЭТФ, **32**, 1442 (1957)

Микроскопическая теория сверхпроводимости (1957)

Теория Бардина-Купера-Шриффера (БКШ)

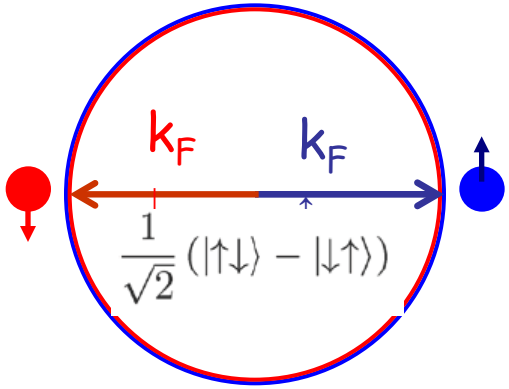
J. Bardeen, L.N. Cooper, J.R. Schrieer, Phys.Rev., 108,1175, (1957); Phys.Rev. 106,162 (1957).

$$2\Delta(0) = 3.52\, k_B T_c$$

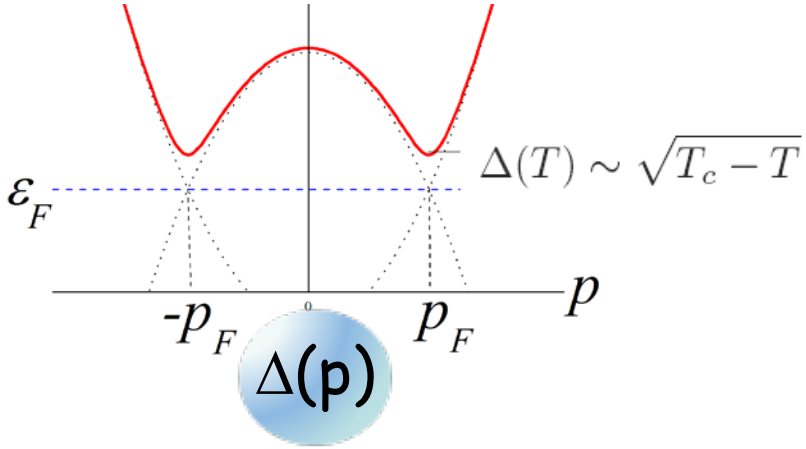
щель в спектре возбуждений

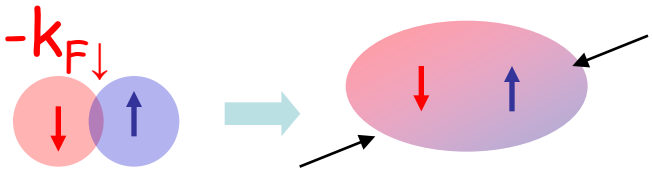
куперовское (синглетное) спаривание

$$\varepsilon(p) = \sqrt{\frac{1}{2m}(p^2 - p_F^2) + \Delta^2}$$



$$\xi \sim \frac{\hbar v_F}{4\Delta(0)}$$

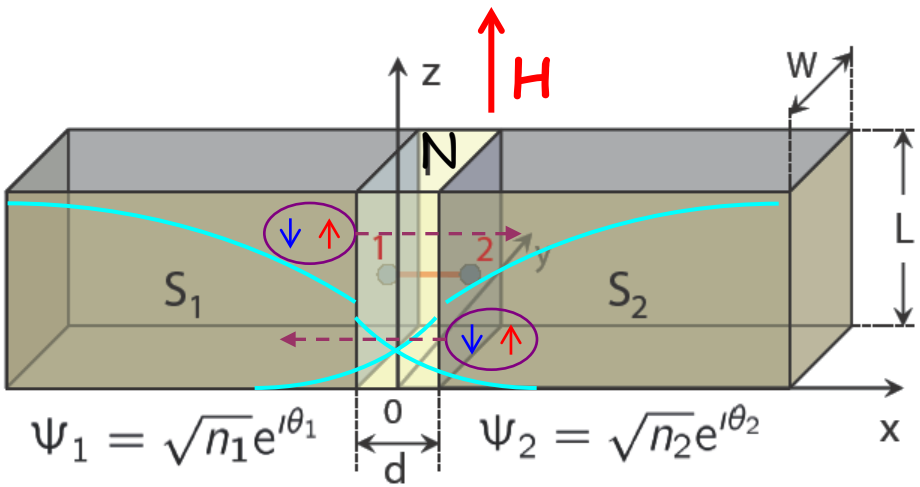




$-k_{F\downarrow} + k_{F\uparrow} = 0$

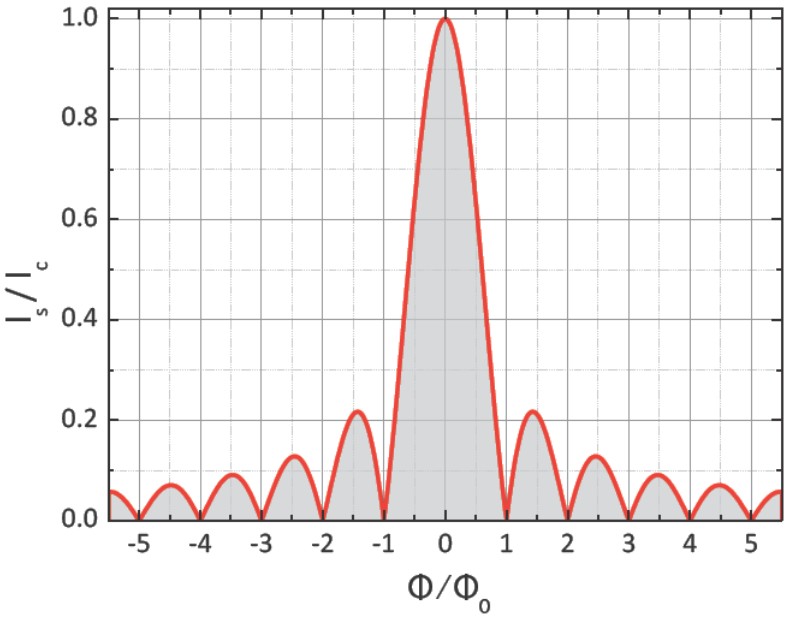
Сверхпроводимость *s* типа

Эффект Джозефсона (1962)



$$I_s = I_c \sin\varphi \qquad \frac{\partial\varphi}{\partial t} = \frac{2e}{\hbar} V$$

$$\varphi = \theta_2 - \theta_1 + \frac{2e}{\hbar c} \int_1^2 \vec{A}\, d\vec{s}$$



$$I_c(H) = I_c(0) \left| \frac{\sin(\pi\Phi/\Phi_0)}{\pi\Phi/\Phi_0} \right|$$

$$\Phi = (2\lambda_L + d)\, w\, H \qquad \Phi_0 = \frac{\pi\hbar c}{e}$$

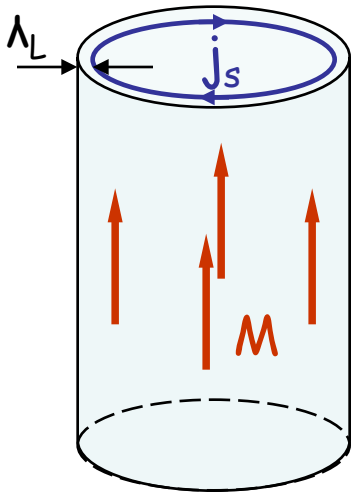
B. D. Josephson, Physics Letters, **1**, 251 (1962)

II. Механизмы конкуренции сверхпроводимости и магнетизма.

$$\hat{H} = \underbrace{\frac{1}{2m}\left(\hat{\vec{p}} - \frac{e}{c}\vec{A}\right)^2}_{\text{орбитальный (электромагнитный) механизм}} \underbrace{- \hat{\vec{\mu}}\,\vec{H}}_{\text{обменный (парамагнитный) механизм}}$$

Электромагнитный (орбитальный) механизм

$$j_c = \frac{cH_{cm}}{4\pi\lambda}$$

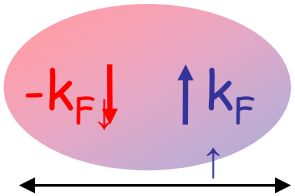


Ферромагнитные сверхпроводники
[В.Л. Гинзбург (1956)]

$$B = 4\pi M < H_{cm}$$

Обычно B >> H_{cm} и сосуществование возможно только в исключительных случаях (тонкие пленки, внешнее поле)

$$B = 0$$

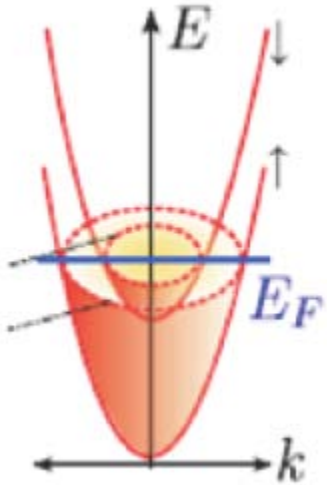


$$a_H = \sqrt{\frac{\hbar c}{eH}} \sim \xi \Rightarrow \boxed{H_{orb} \sim \frac{\Phi_0}{\pi\xi^2}}$$

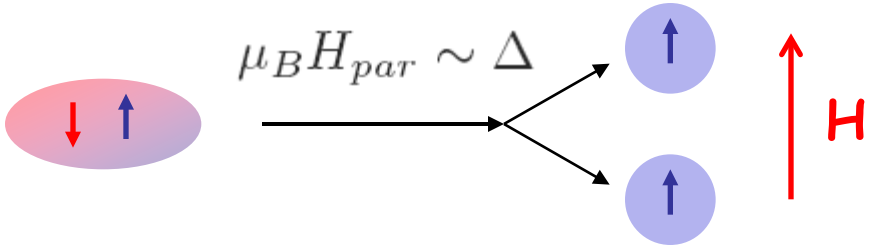
$$\xi \sim \frac{\hbar v_F}{4\Delta(0)}$$

$$\Phi_0 = \frac{\pi\hbar c}{e}$$

Обменный (парамагнитный) механизм



H



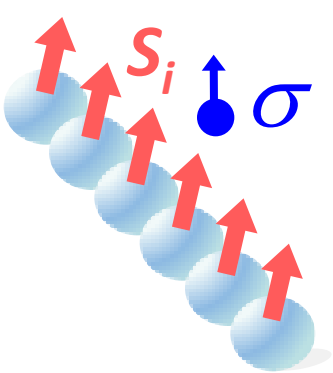
$$H \sim H_{par} = \frac{\Delta(0)}{\sqrt{2}\mu_B}$$

Поле парамагнитного предела
(предел Клогстона)

$T_c \sim 20$ K $H_p \sim 10^6$ Э

B.S. Chandrasekhar, A.M. Clogston (1962)

Обменное поле магнитных моментов



$$E_{int} = \sum_i J(\vec{r} - \vec{R}_i)\, \vec{S}_i \vec{\sigma}$$

$$\vec{h} = \langle \vec{S}_i \rangle\, n \int J(\vec{r})\, d^3\vec{r}$$

$$\mu_e \vec{B}_{eff} = \vec{h}$$

Обменное поле магнитных моментов **h** препятствует синглетному спариванию

[Matthias, Suhl, Corenzwit , 1958]

Механизмы разрушения сверхпроводимости

$$\hat{H} = \frac{1}{2m}\left(\hat{\vec{p}} - \frac{e}{c}\vec{A}\right)^2 - \hat{\vec{\mu}}\,\vec{H}$$

орбитальный механизм (электромагнитный)

обменный механизм (парамагнитный)

Параметр Маки [K. Maki (1966)]

$$\boxed{\frac{H_{orb}}{H_{par}} \sim \frac{\Delta}{\varepsilon_F} \ll 1}$$

$T_c < T_{Curie}$ $\quad T_c \sim 10\,\mathrm{K}$ $\quad T_{Curie} \sim 100 - 1000\,\mathrm{K}$

$T_c > T_{Curie}$ Ферромагнитные сверхпроводники

III. Электромагнитное взаимодействие.

Управление сверхпроводимостью в FS системах посредством орбитального эффекта.

ELSEVIER

Journal of Magnetism and Magnetic Materials 130 (1994) 51–56

journal of magnetism and magnetic materials

Magnetization of the ferromagnetic-superconductor structures

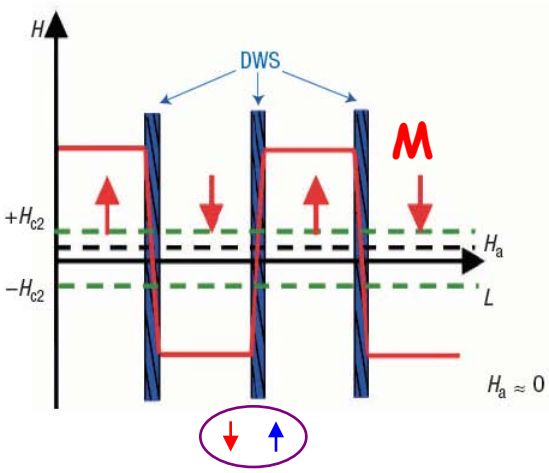
G.M. Genkin *, V.V. Skuzovatkin, I.D. Tokman

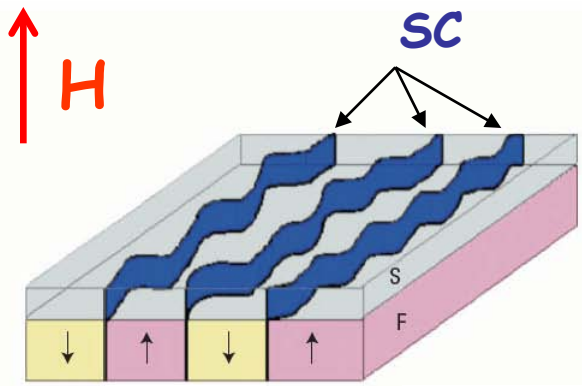
Institute of Applied Physics of the Russian Academy, 46 Uljanov street, Nizhny Novgorod, 603600, Russia

1. Доменная сверхпроводимость

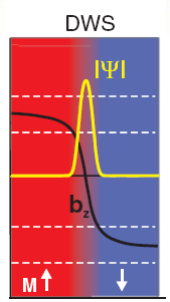
2. Джозефсоновский транспорт в поле магнитных частиц

Доменная сверхпроводимость в FS бислое





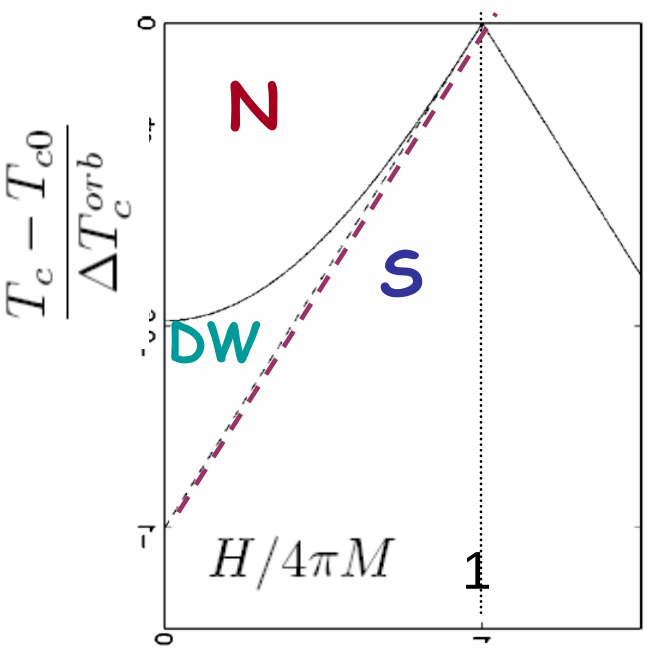
Сверхпроводник
Изолятор
Ферромагнетик



$$-\left(\nabla+\frac{2\pi i}{\Phi_0}\mathbf{A}\right)^2\Psi=\frac{1}{\xi^2(T)}\Psi$$

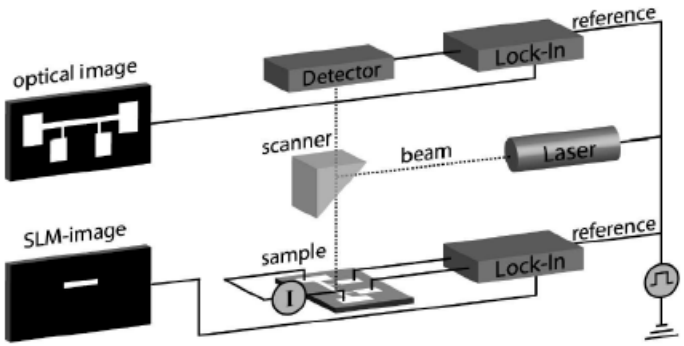
$$\xi(T)=\xi_0/\sqrt{1-T/T_{c0}}$$

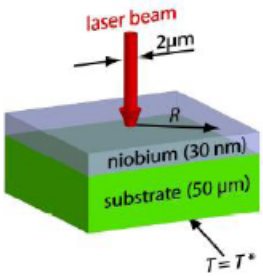
$$D \gg W \qquad \mathbf{A}=(4\pi M|x|+Hx)\mathbf{y}_0$$



A.I. Buzdin, L.N. Bulaevskii, S.V. Panyukov (JETP 1984)
A.I. Buzdin, A.S. Mel'nikov (PRB 2003)
A.Yu. Aladyshkin, et. al. (PRB 2003)

Визуализация доменной сверхпроводимости посредством низкотемпературной сканирующей лазерной микроскопии

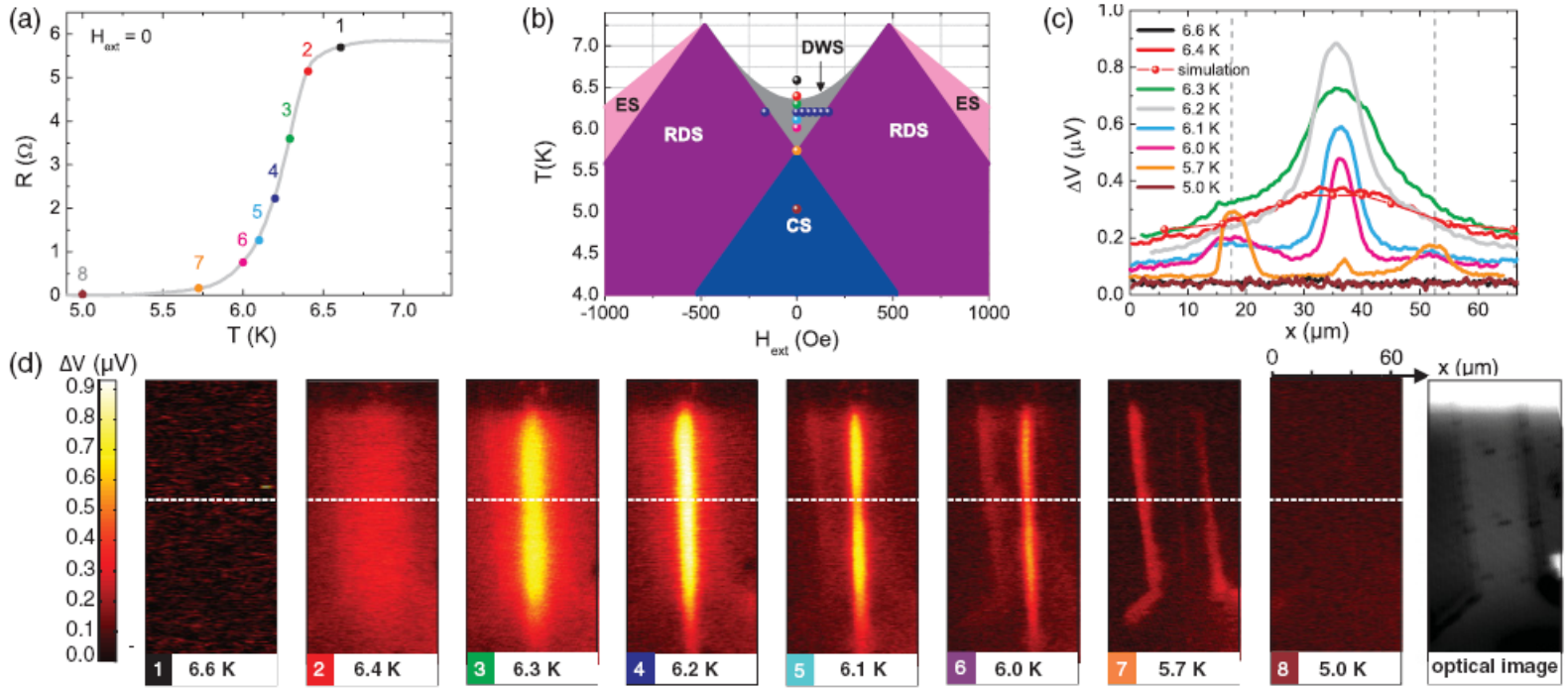




Сверхпроводник: Pb

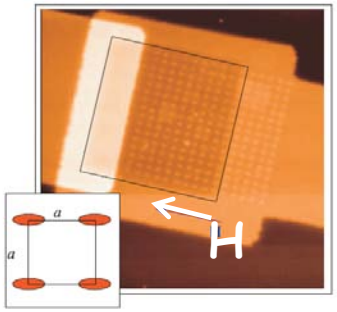
Ферромагнетик: $BaFe_{12}0_{19}$

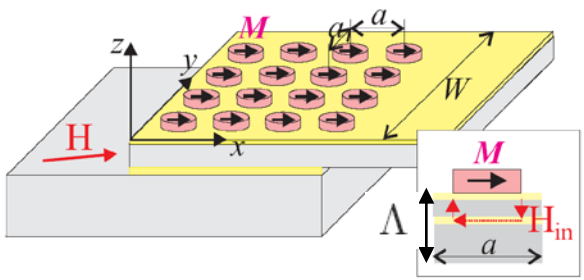
R. Werner, A.Yu. Aladyshkin *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 020505(R) (2011).



Джозефсоновский транспорт в поле магнитных частиц

$$j_s = j_c \sin(\varphi + \phi(\mathbf{r})) \qquad \nabla\phi = \frac{2\pi\Lambda}{\Phi_0}[\mathbf{B}(\mathbf{r}) \times \mathbf{z}_0]$$





$a \simeq 1.4\,\mu m$

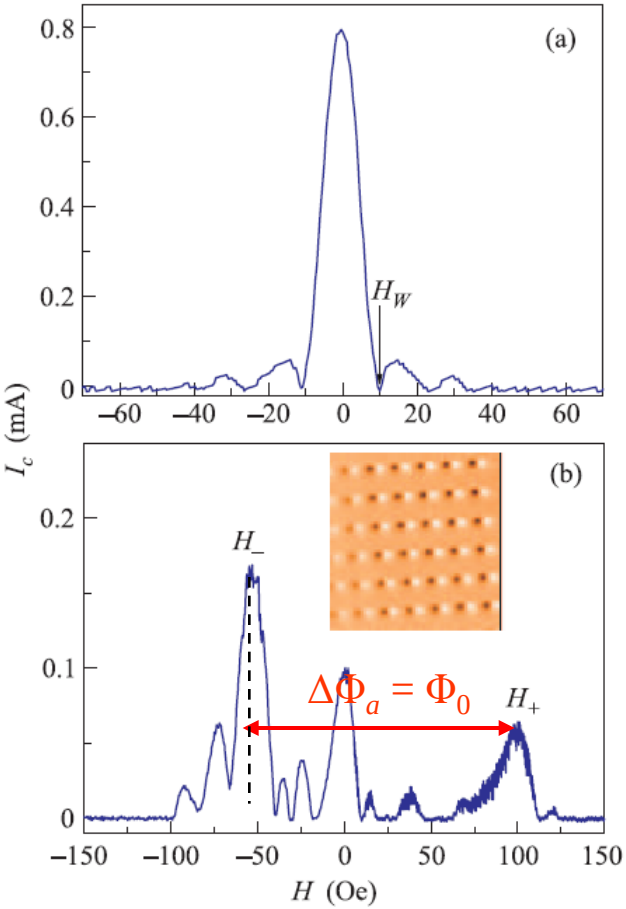
SNS Nb/Al-AlO$_x$/Nb: $25 \times 25\,\mu m^2$

$j_c \sim 100\,A/sm^2 \qquad \lambda_J \sim 30\,\mu m$

Квадратная решетка ($N \sim 200$) частиц Co

$M \sim 1000\,\mathrm{Oe}$

$700 \times 350 \times 25\,nm^3$



$$\Phi_a(H_+) - \Phi_a(H_-) \simeq \Phi_0$$

$$\Phi_a(H) = H(a \cdot \Lambda)$$

$$I_c(-H) \neq I_c(H)$$

A.A.Fraerman,et al., PRB (2007)

A.V.Samokhvalov, PRB (2009);

А.В.Самохвалов, и др. П. ЖЭТФ (2012)

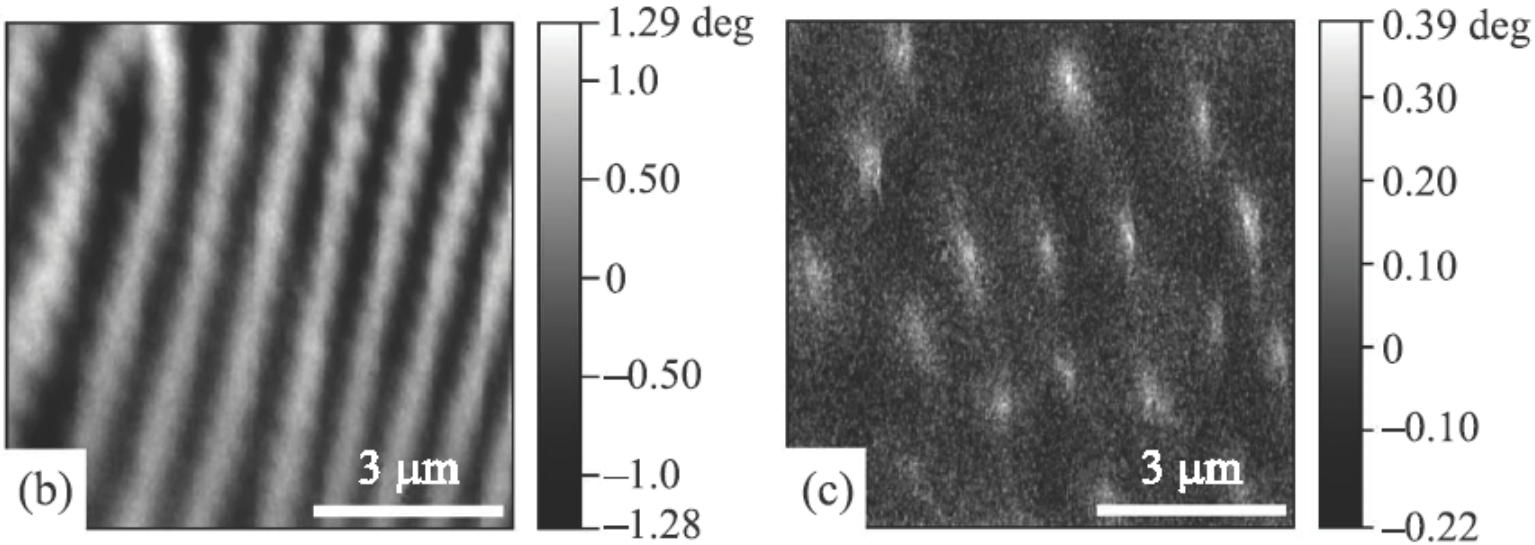
IV. Сосуществование сверхпроводимости и магнетизма.

1. Магнитные сверхпроводники: $T_{Curie} < T_c$
2. Состояние Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррелла
3. Гибридные SF структуры с эффектом близости
4. Эффект дальнодействия в SF структурах

1. Магнитные сверхпроводники

Структура магнитного потока в монокристалле $EuFe_2As_2$

низкотемпературная магнитно-силовая микроскопия



$T = 17.27\,\mathrm{K}$

ZFC до $T_{\min} = 4.16\,\mathrm{K}$

$T = 18.15\,\mathrm{K}$ $\Phi_0/a^2 \sim 6\,\Gamma\mathrm{c}$

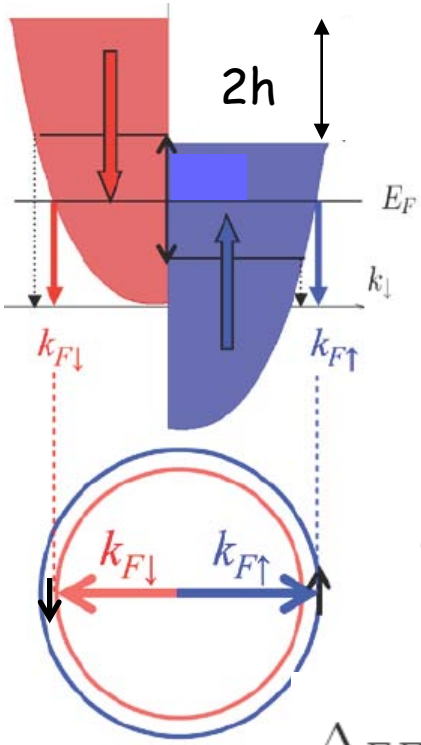
после охлаждения

$EuFe_2(As_{0.79}P_{0.21})_2$ $T_{SC} = 22\,\mathrm{K}$ и $T_C = 18 \pm 0.3\,\mathrm{K}$

[И.С. Вещунов, и др., ПЖЭТФ (2017)]

2. Состояние Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррелла (ЛОФФ - FFLO) (1964)

$$\varepsilon(\vec{p}) \to \varepsilon(\vec{p}) - \vec{h}\cdot\vec{\sigma}$$



$$\{p_\downarrow, -p_\uparrow\}: \quad p_{F\downarrow} + (-p_{F\uparrow}) = -P$$

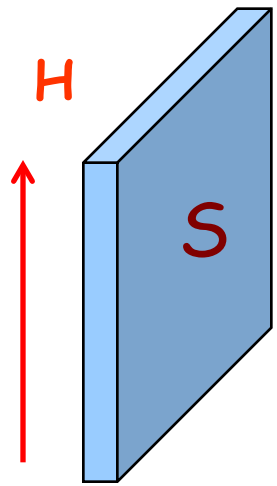
$$\{p_\uparrow, -p_\downarrow\}: \quad p_{F\uparrow} + (-p_{F\downarrow}) = P$$

$$\vec{v}_F\vec{P} = v_F\,(p_{F\uparrow} - p_{F\downarrow}) \simeq 2h$$

импульс пары

$$\boxed{P = \hbar Q \simeq \frac{2h}{v_F}}$$

$$H \sim H_{par} = \frac{\Delta(0)}{\sqrt{2}\mu_B}$$



$$\Delta_{FFLO}(\vec{R}) = \sum_\nu \Delta_\nu\, e^{\vec{Q}_\nu\vec{R}}$$

2D сверхпроводники в продольном магнитном поле

$$\Delta_{FF}(\vec{R}) = \Delta\, e^{\vec{Q}\,\vec{R}} \qquad \Delta_{LO}(\vec{R}) = \Delta\,\sin(\vec{Q}\vec{R}) \qquad P = \hbar Q \sim \frac{\mu_B H}{v_F}$$

P. Fulde and R. A. Ferrell, Phys. Rev. **135**, A550 (1964).
А. И. Ларкин, Ю. Н. Овчинников, ЖЭТФ **47**, 47 (1964).

Теория ЛОФФ

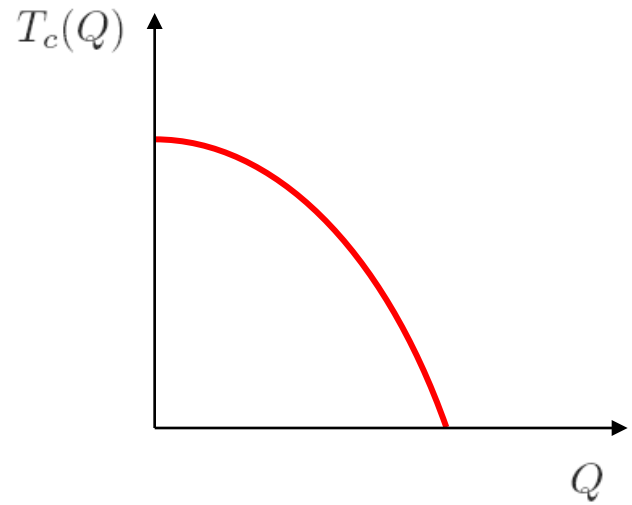
L.N. Bulaevskii (1993)
A.I. Buzdin, J.P.Brison (1996)
A.I. Buzdin, H.Kachkachi (1997)

Феноменологическое описание ЛОФФ состояния

$$\psi \sim \exp\left(i\vec{Q}\vec{R}\right)$$

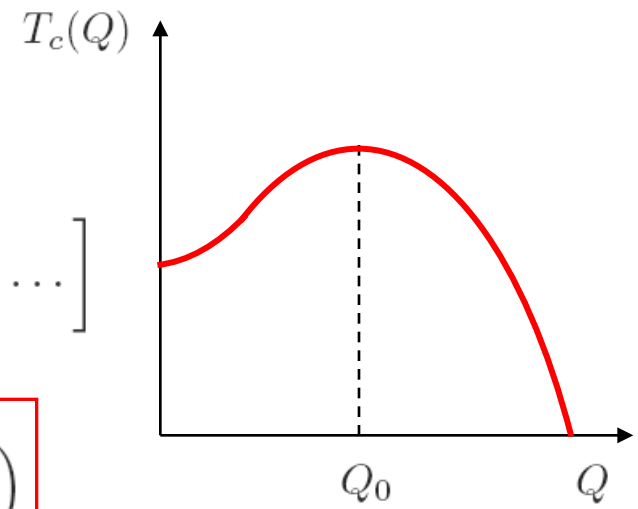
$$m > 0$$

$$F[\psi] = \int dV \left[\alpha\left(T - T_{c0}\right)|\psi|^2 + \frac{\hbar^2}{4m}|\nabla\psi|^2 + \ldots\right]$$



$$H \geq H_{par} = \frac{\Delta(0)}{\sqrt{2}\mu_B} \qquad m < 0$$

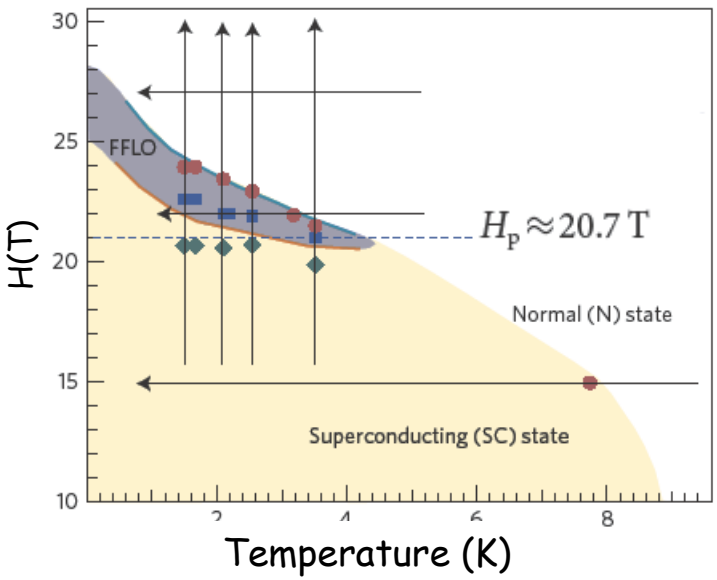
$$F[\psi] = \int dV \left[\alpha\left(T - T_{c0}\right)|\psi|^2 - \frac{\hbar^2}{4|m|}|\nabla\psi|^2 + \gamma|\nabla^2\psi|^2 + \ldots\right]$$



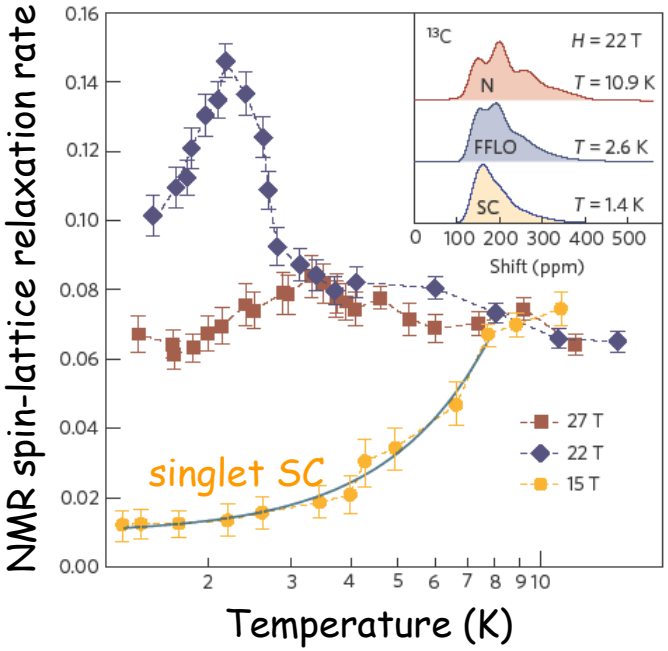
$$\boxed{\psi_{LOFF}(\vec{R}) = \sum_{|\vec{Q}|=Q_0} C_{\vec{Q}} \exp\left(i\vec{Q}\vec{R}\right)}$$

A.I. Buzdin and H. Kachkachi, Phys. Lett. **A225**, 341 (1997)

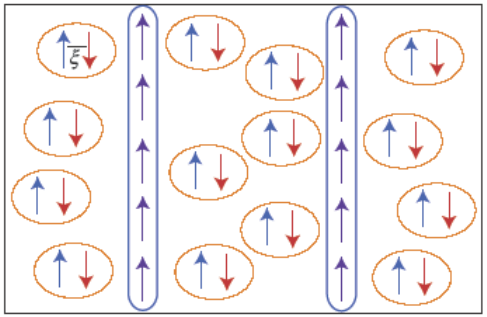
ЛОФФ фаза в κ-(BEDT-TTF)$_2$Cu(NCS)$_2$



(*H*, *T*) phase diagram of κ-(BEDT-TTF)$_2$Cu(NCS)$_2$.



nuclear magnetic resonance (^{13}C NMR) measurements - a sensitive probe of the electronic spin polarization



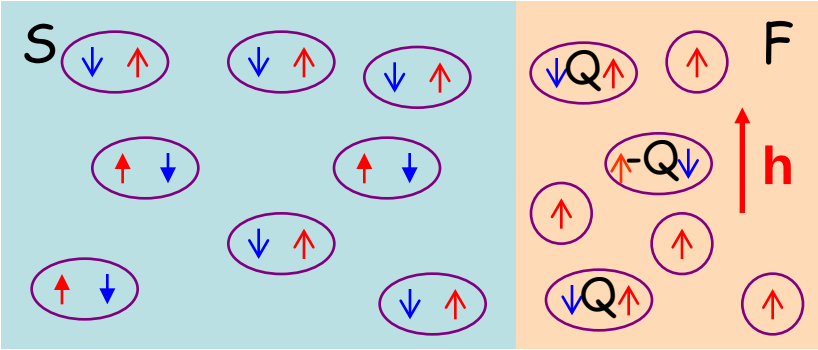
ЛОФФ SC N SC N SC

0 π 0

[H. Mayare, et al., Nature Physics (2014)]

3. Гибридные SF структуры с эффектом близости

Синглетное спаривание (s - wave)



Спаривание отсутствует

Обменное поле

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow \vec{k}\rangle|\downarrow -\vec{k}\rangle - |\downarrow \vec{k}\rangle|\uparrow -\vec{k}\rangle\right)$$

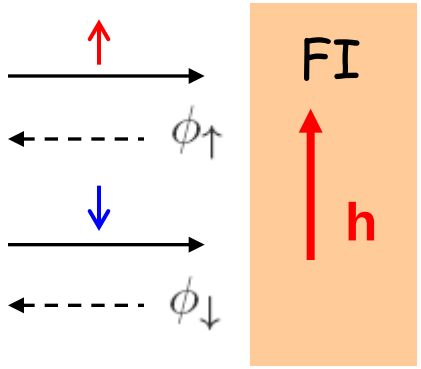
↓Q↑ ↑-Q↓

↓Q↑ $Q = -k_{F\downarrow} + k_{F\uparrow} \neq 0$

A. I. Buzdin, RMP 77, 935 (2005).
F. S. Bergeret, A. Volkov, K. Efetov, RMP 77, 1321 (2005).
A. A. Golubov, M. Kupriyanov, E. Il'ichev, RMP 76, 411 (2004).

SF структуры с однородным обменным полем

«Смешивание» синглетной и триплетной компонент на F границе



$$\varepsilon(\vec{p}) \to \varepsilon(\vec{p}) - \vec{h}\cdot\vec{\sigma}$$

$$(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow) \to \left(\uparrow\downarrow\ e^{i(\phi_\uparrow-\phi_\downarrow)} - \downarrow\uparrow\ e^{i(\phi_\downarrow-\phi_\uparrow)}\right)$$

$$(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)\cos(\phi_\uparrow-\phi_\downarrow) + i\,(\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow)\sin(\phi_\uparrow-\phi_\downarrow)$$

Singlet (S=0)

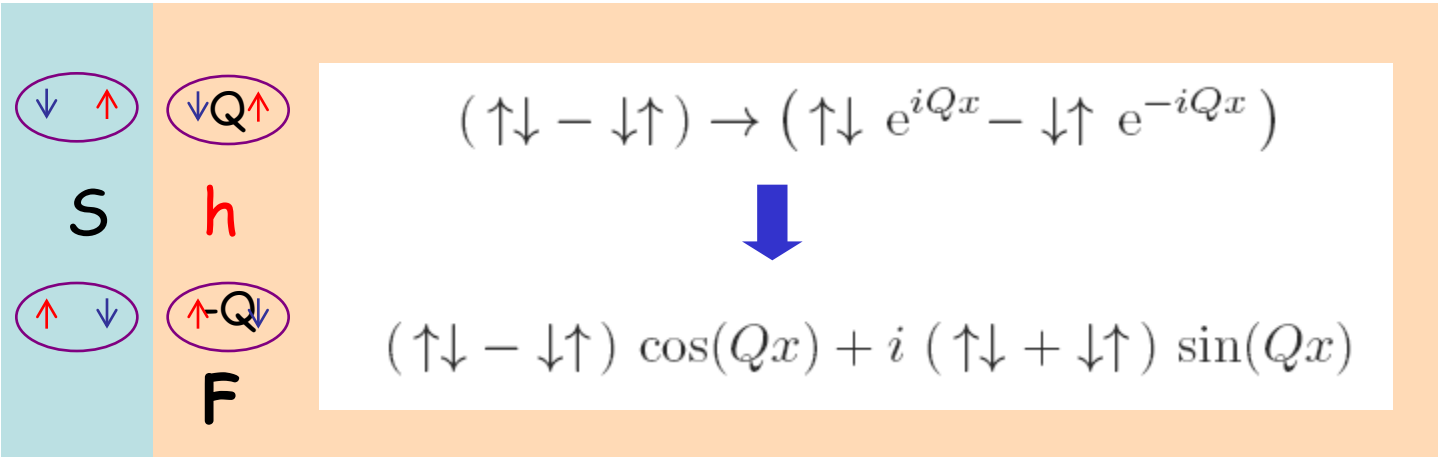
triplet (Sz=0)

Наведенные триплетные СП корреляции

triplet (S=1)
$$\begin{cases} |\uparrow\uparrow\rangle \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle\right) \\ |\downarrow\downarrow\rangle \end{cases}$$

SF структуры с однородным обменным полем

Осцилляции амплитуды парной функции



$$(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow) \rightarrow (\uparrow\downarrow\, e^{iQx} - \downarrow\uparrow\, e^{-iQx})$$

$$(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)\cos(Qx) + i\,(\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow)\sin(Qx)$$

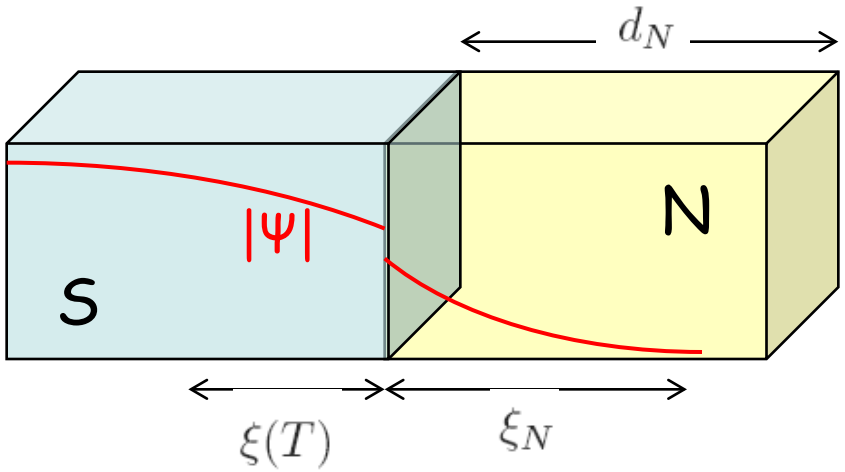
$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\vec{k}\rangle|\downarrow -\vec{k}\rangle - |\downarrow\vec{k}\rangle|\uparrow -\vec{k}\rangle\right)$$

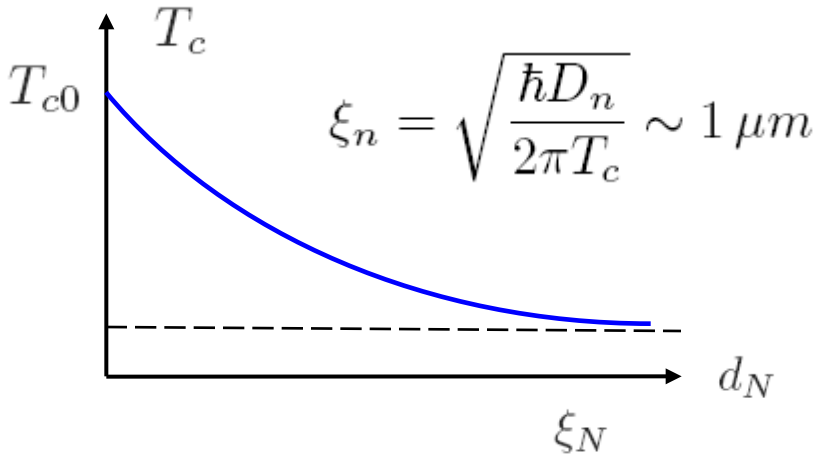
$Q = -k_{F\downarrow} + k_{F\uparrow}$ ↓Q↑ ↑-Q↓ $-Q = +k_{F\downarrow} - k_{F\uparrow}$

«Грязный» металл: $\Psi_{\uparrow\downarrow-\downarrow\uparrow} \sim e^{(1+i)x/\xi_f}$ $\Psi_{\uparrow\downarrow+\downarrow\uparrow} \sim e^{(1+i)x/\xi_f}$ $\xi_f = \sqrt{\frac{\hbar D_f}{h}}$

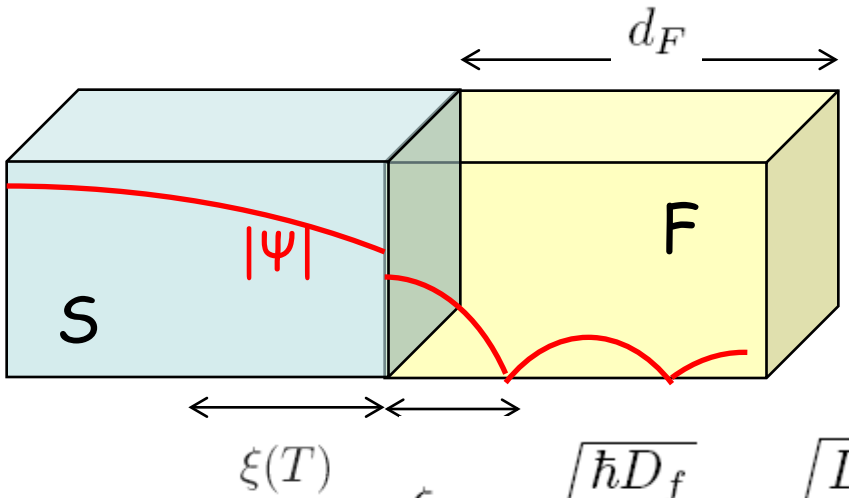
Наведенный «короткий» триплет

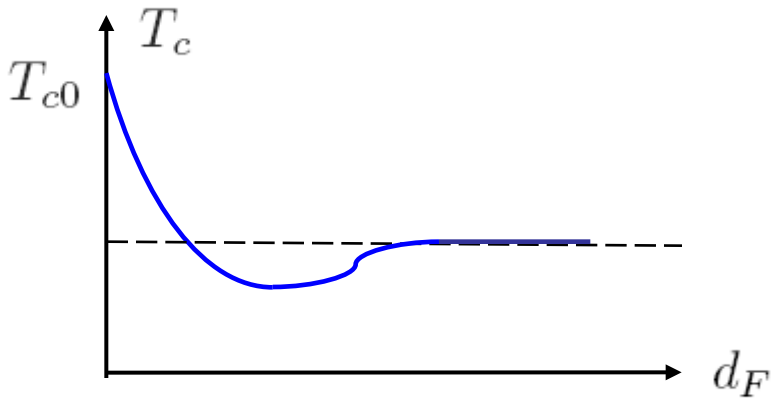
Эффект близости





$$\xi_n = \sqrt{\frac{\hbar D_n}{2\pi T_c}} \sim 1\,\mu m$$



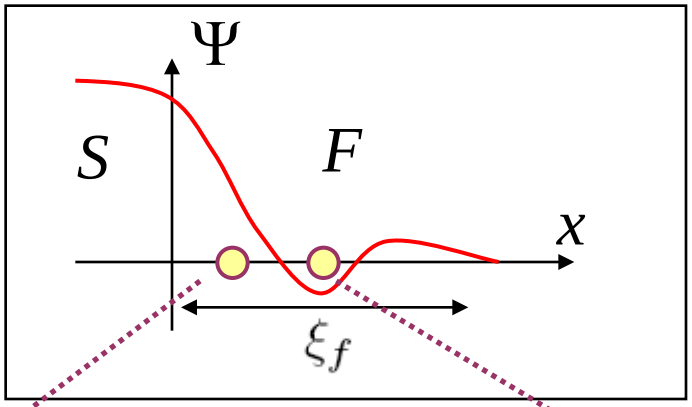


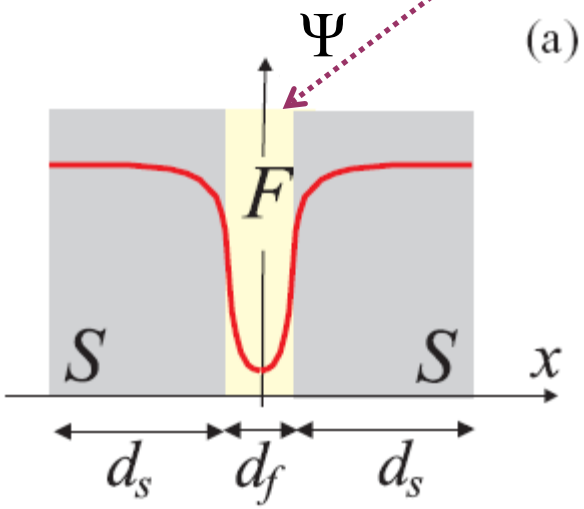
$$\xi_f = \sqrt{\frac{\hbar D_f}{E_{ex}}} = \sqrt{\frac{D_f}{h}} \sim 10 - 50\,A$$

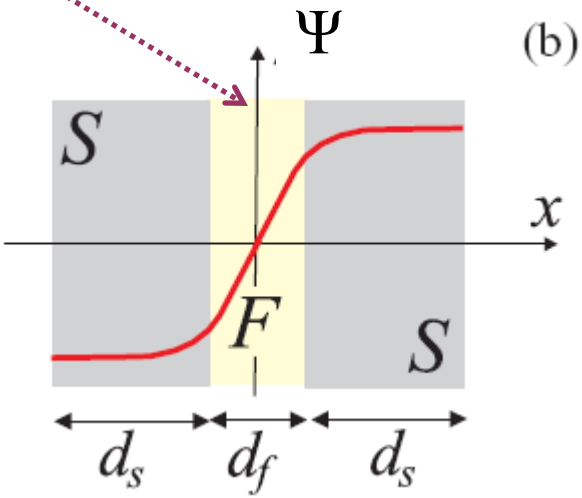
Поперечное ЛОФФ

Л. Н.Булаевский, В. В. Кузий, А. А. Собянин, (1977).
А.И.Буздин, Л.Н.Булаевский, С.В.Панюков, 1982
А.И.Буздин, М.Ю.Куприянов, 1991

“0” & “π” неоднородные состояния: π – сверхпроводимость







“0” состояние

“π” состояние

Джозефсоновский π контакт

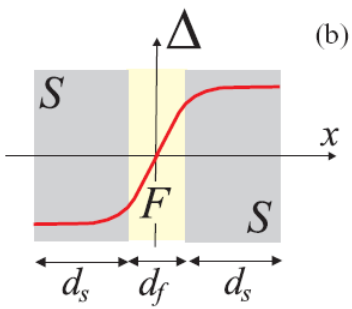
$$I = I_c \sin(\varphi + \pi) = -I_c \sin(\varphi)$$

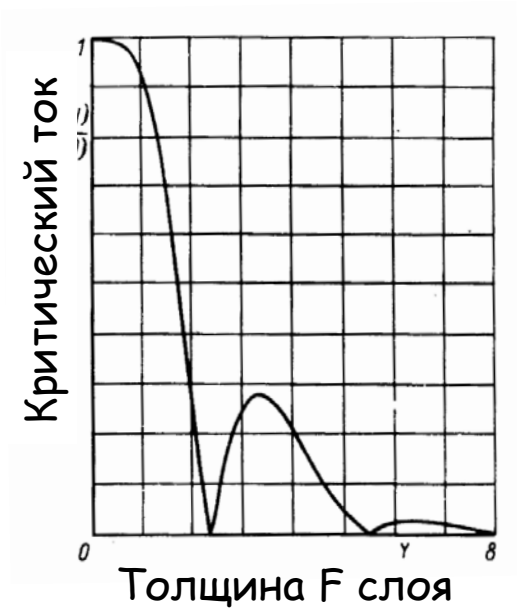
Термин: L.N.Bulaevskii, V.V.Kuzii, and A.A.Sobyanin (1977)

Теория: А.И.Буздин, Л.Н.Булаевский, С.В.Панюков (1982);

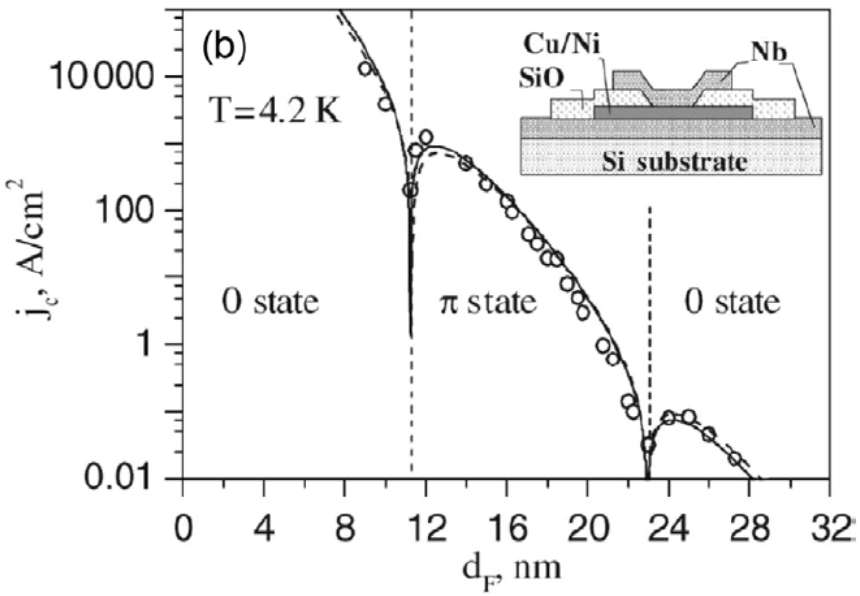
А.И. Буздин, М.Ю. Куприянов (1991);

Первая реализация: V.V.Ryazanov, et. al., PRL (2001)





А.И. Буздин и М.Ю. Куприянов, Письма в ЖЭТФ (1991)

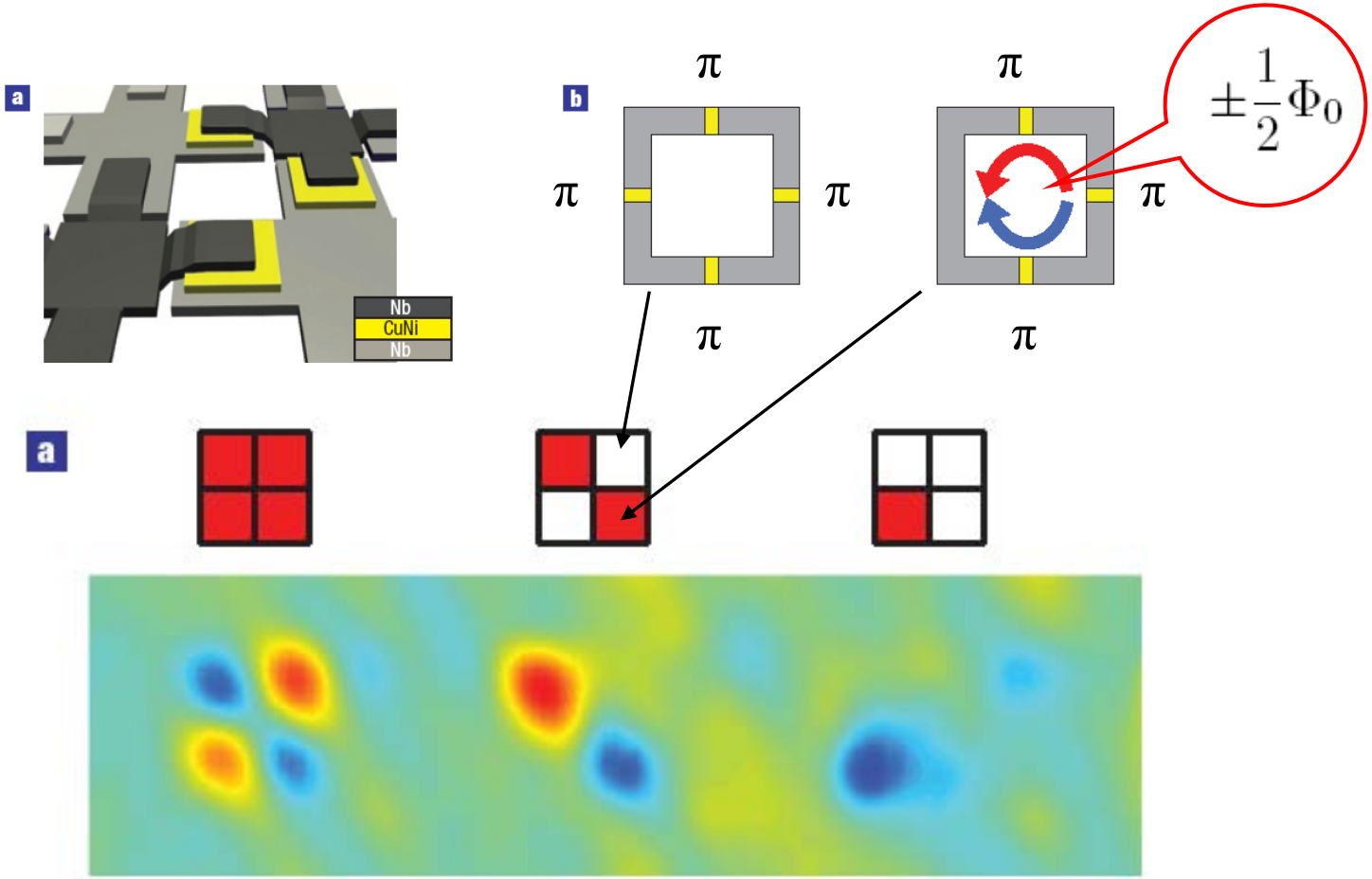


V.A. Oboznov, V.V. Bol'ginov, A.K. Feofanov, V.V. Ryazanov and A. I. Buzdin, PRL (2006)

Спонтанный ток и магнитный поток в массивах 0-π контактов

$$\frac{1}{c} L I_c \gg \Phi_0$$

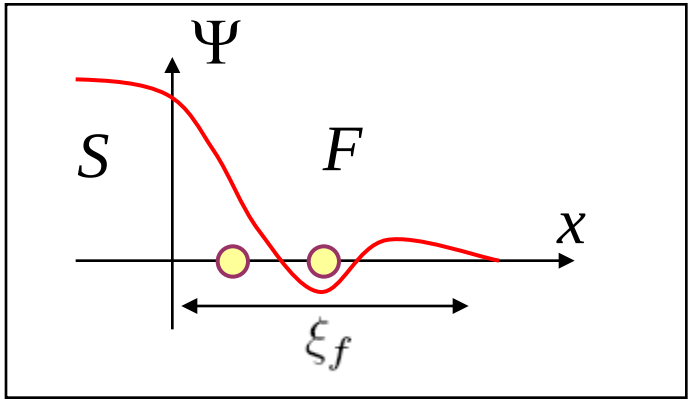
$$\varphi_\pi \to \pi$$



Сканирующая СКВИД микроскопия

V.V.Ryazanov, et al.,Nature Physics 2008

SF структуры с однородным обменным полем



Поперечное ЛОФФ состояние

$$\xi_f = \sqrt{\frac{\hbar D_f}{E_{ex}}} = \sqrt{\frac{D_f}{h}} \sim 10 - 50\,A$$

Слабые ферромагнетики (F сплавы):
CuNi; PdNi

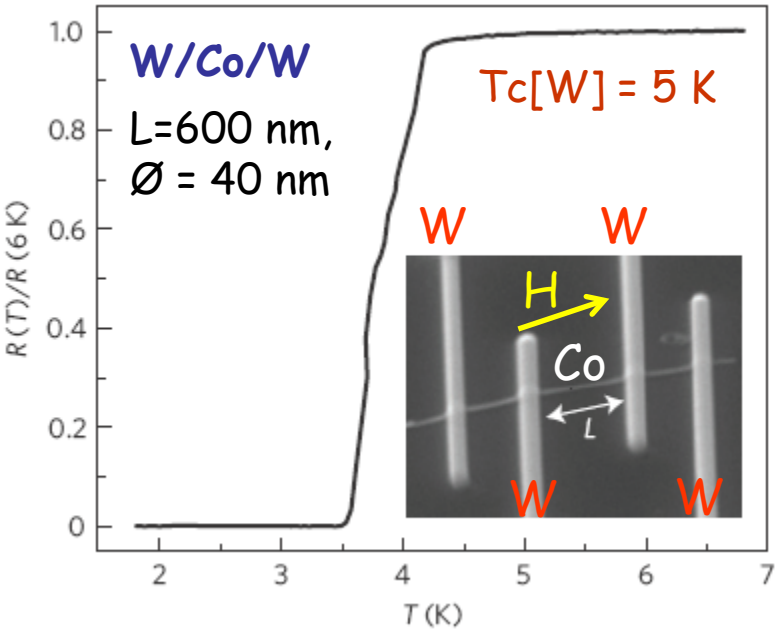
F металлы (Co; Ni; Py)

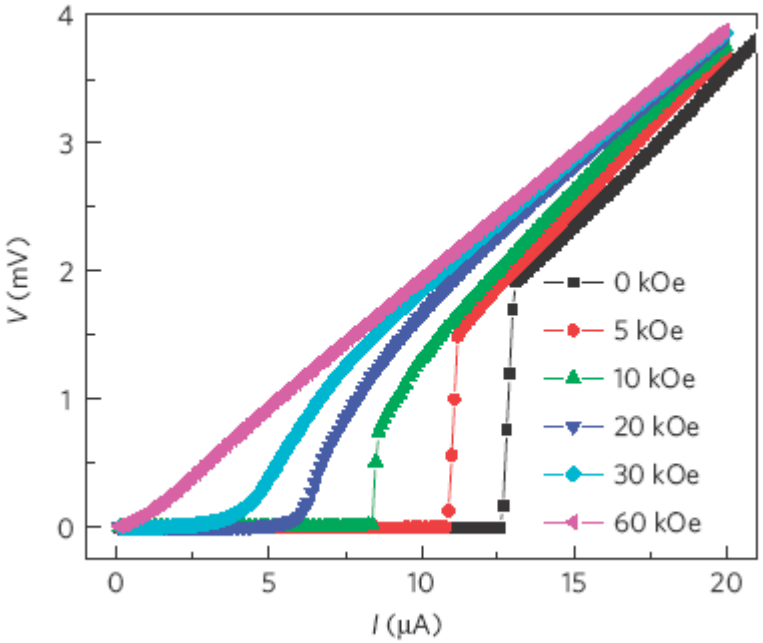
$$\mathrm{Ni}: \quad E_{ex} > 1000\,K \rightarrow \xi_f < 10\,A$$

$$\mathrm{Cu_xNi_{1-x}}: \; E_{ex} \sim 100\,K \rightarrow \xi_f \sim 50\,A$$

⇒ **Нужны очень тонкие F слои**

Дальнодействие в гибридных SF структурах



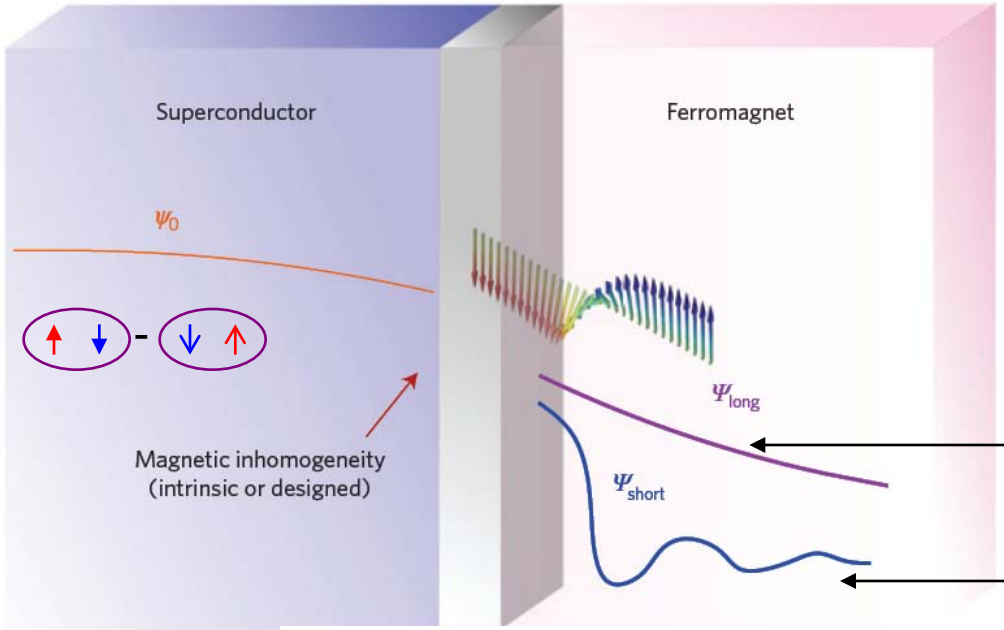


nature physics
ARTICLES
PUBLISHED ONLINE: 21 MARCH 2010 | DOI:10.1038/NPHYS1621

Interplay between superconductivity and ferromagnetism in crystalline nanowires

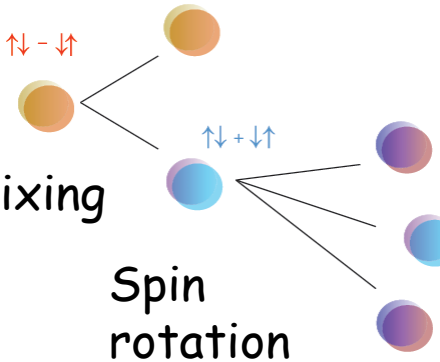
Jian Wang[1,2]*, Meenakshi Singh[1,2], Mingliang Tian[1,2], Nitesh Kumar[1,2]†, Bangzhi Liu[3], Chuntai Shi[1,2]†, J. K. Jain[1,2], Nitin Samarth[1,2], T. E. Mallouk[1,2,4] and M. H. W. Chan[1,2]*

SF структуры с неоднородным обменным полем



$$\xi_n = \sqrt{\frac{D_f}{2\pi T_c}} \gg \xi_f$$

$$\xi_f = \sqrt{\frac{D_f}{h}}$$



Spin mixing

Spin rotation

$$(\uparrow\uparrow) \quad \xi_n = \sqrt{\frac{D_f}{2\pi T_c}} \gg \xi_f$$

$$(\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow) \quad \xi_f = \sqrt{\frac{D_f}{h}}$$

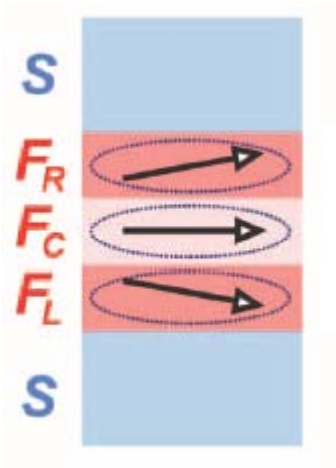
$$(\downarrow\downarrow) \quad \xi_n = \sqrt{\frac{D_f}{2\pi T_c}} \gg \xi_f$$

«длинный» триплет

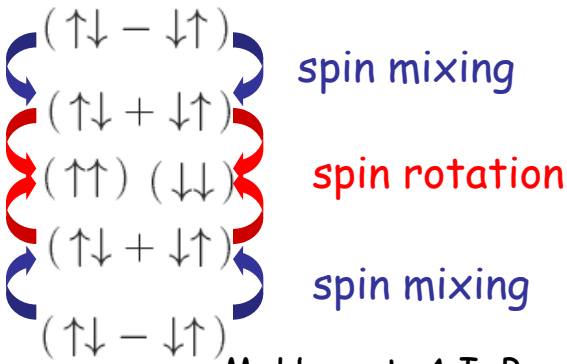
[J. Linder and J.W.A. Robinson, Nature Physics 10.1038 (2015)]

Теория: F.S.Bergeret, A.F. Volkov, K.B. Efetov (2001)
Kadigrobov, R.Shekhter, Jonson (2001)

Дальнодействующий эффект Джозефсона

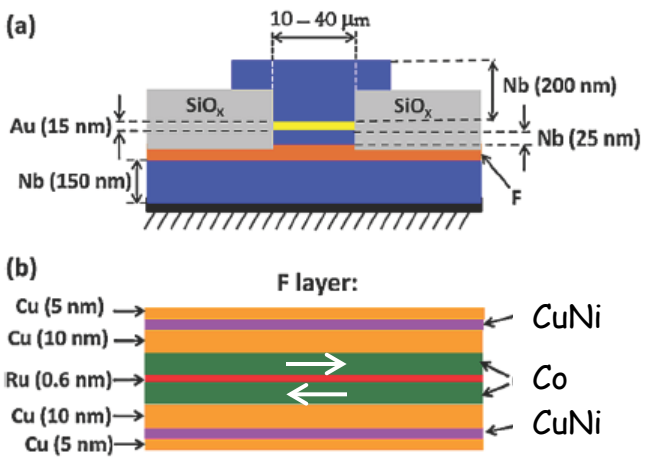


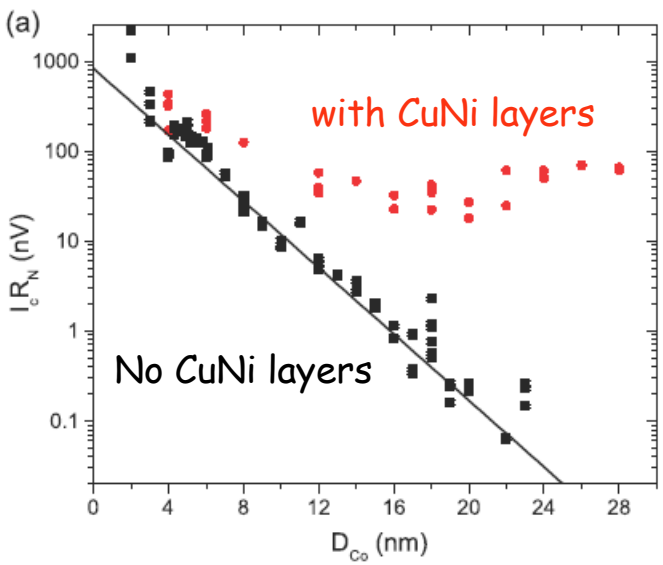
$$d_R \sim \xi_f^L$$
$$d_C >> \xi_f^C \quad \xi_f^C \ll \xi_f^{L,R}$$
$$d_L \sim \xi_f^R$$



M. Houzet, A.I. Buzdin, PRB (2007)

Nb/CuNi/Co/CuNi/Nb





N.O. Birge, at. al., PRL (2010)

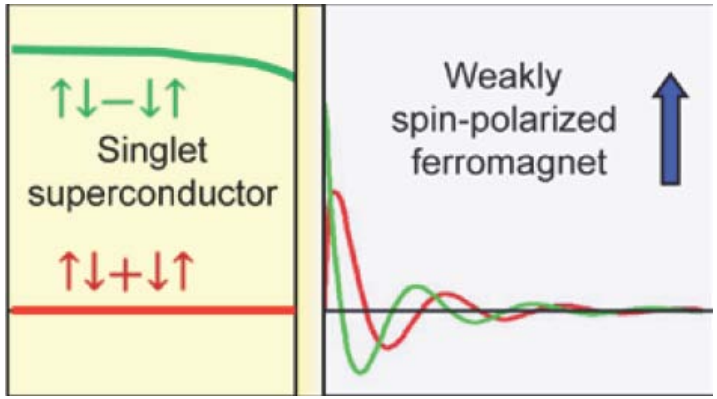
J.W.Robinson, et al., Science 329, 59 (2010); [Ho/Co/Ho]
R.Keizer, et al., Nature 439, 825 (2006) [half-metallic CrO_2]

V. Электродинамика гибридных FS структур с эффектом близости

1. Парамагнитный эффект и ЛОФФ неустойчивость в слоистых FS структурах

2. Фазовые переходы в SFS структурах

Парамагнитный эффект Мейснера



$$\hat{f} = \begin{pmatrix} f^{\uparrow\uparrow} & f^{\uparrow\downarrow} \\ f^{\downarrow\uparrow} & f^{\downarrow\downarrow} \end{pmatrix} = \left(f_s + \vec{f}_t \vec{\sigma} \right) i\sigma_y$$

$$f_s = \frac{1}{2}\left(f^{\uparrow\downarrow} - f^{\downarrow\uparrow} \right) \qquad f_{tz} = \frac{1}{2}\left(f^{\uparrow\downarrow} + f^{\downarrow\uparrow} \right)$$

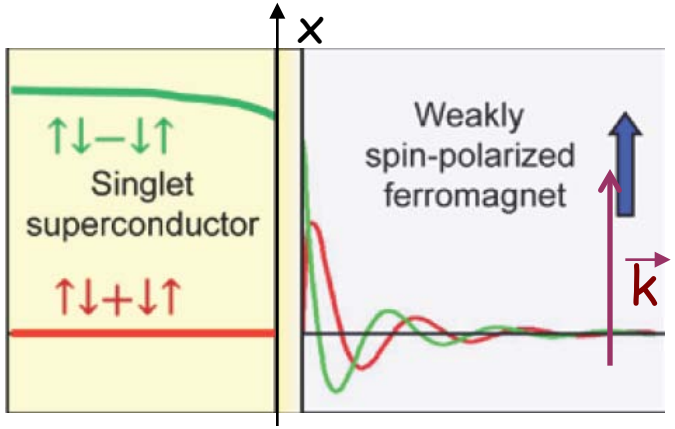
$$f_{tx} = \frac{1}{2}\left(f^{\downarrow\downarrow} - f^{\uparrow\uparrow} \right) \qquad f_{ty} = -\frac{i}{2}\left(f^{\downarrow\downarrow} + f^{\uparrow\uparrow} \right)$$

$$\vec{j} = -\frac{c}{4\pi\lambda^2}\vec{A} \qquad \lambda^{-2}(x) = \frac{16\pi^3 T_c \sigma}{ec\Phi_0} \sum_{\omega_n > 0} \left(|f_s|^2 - |\vec{f}_t|^2 \right)$$

$|f_s|^2 < |\vec{f}_t|^2 \Rightarrow \lambda^{-2}(x) < 0$ Локальный парамагнитный отклик

F.S. Bergeret, A.F. Volkov, K.B. Efetov, Phys. Rev. B **64**, 134506 (2001);
T. Yokoyama, Y. Tanaka, N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **106**, 246601 (2011)
Y. Asano et al., A. A. Golubov, Y.V. Fominov, Y. Tanaka, Phys. Rev. Lett. **107**, 087001 (2011)
M. Alidoust, K. Halterman, J. Linder, Phys. Rev. B **89**, 054508 (2014)

Парамагнетизм и ЛОФФ неустойчивость



$$\phi = kx \quad \Rightarrow \quad F_A = \frac{\Phi_0^2}{32\pi^3} k^2 \underbrace{\int dV\, \lambda^{-2}}_{\lambda_{eff}^{-2} < 0}$$

Однородное по x сверхпроводящее состояние неустойчиво

Возникает продольное ЛОФФ состояние

$$\Psi = |\Psi|\, e^{i\phi}$$

$$j_s = -\frac{c}{4\pi\lambda^2}\left(\vec{A} - \frac{\Phi_0}{2\pi}\right) = -c\frac{\delta F_A}{\delta \vec{A}}$$

$$F_A = \frac{1}{8\pi}\int dV\, \frac{1}{\lambda^2}\left(\vec{A} - \frac{\Phi_0}{2\pi}\nabla\phi\right)^2$$

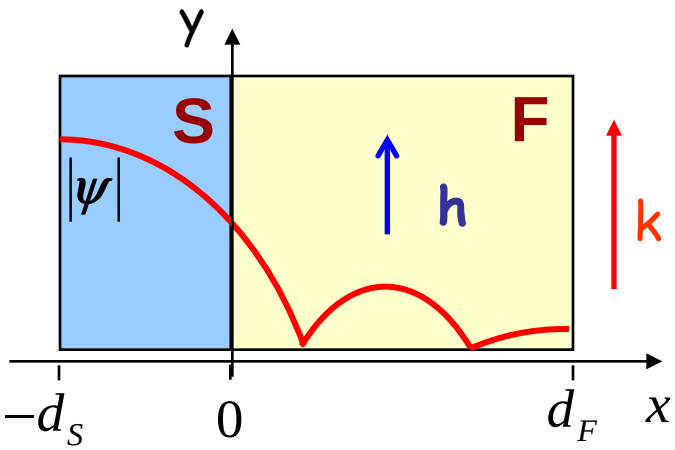
$$F_A = \frac{\Phi_0^2}{32\pi^3}\int dV\, \lambda^{-2}\, (\nabla\phi)^2$$

$$\lambda^{-2} = \frac{4\pi e^2}{mc^2}|\Psi|^2$$

Ухудшение экранировки – тест продольного ЛОФФ состояния

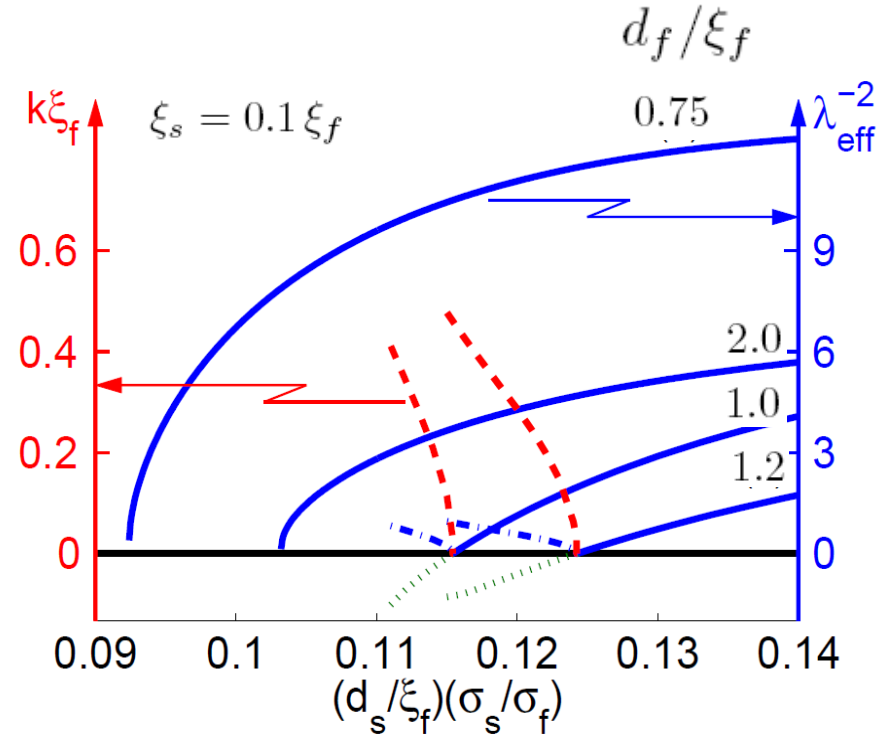
S. Mironov, A. Mel'nikov, A. Buzdin, PRL (2012)

Неоднородное ЛОФФ состояние в тонком FS бислое



$$\Delta = \Delta(x)\, e^{iky}$$

$$\hat{f}(k) = \left(f_s + \vec{f}_t \cdot \vec{\sigma} \right) i\sigma_y$$



$$\sigma_f/\sigma_s \gg h/T_{c0} \gg 1$$

$$\frac{D}{2}\frac{\partial^2 \hat{f}}{\partial x^2} - \left(\omega_n + \frac{D}{2}k^2 \right) \hat{f} - \frac{i}{2}\left(\vec{h}\vec{\sigma}\,\hat{f} + \hat{f}\,\vec{h}\vec{\sigma} \right) \hat{f} + \hat{\Delta} = 0$$

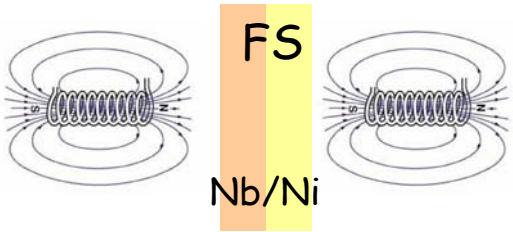
$$\Delta \ln\left(\frac{T_c(k)}{T_{c0}} \right) + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\Delta}{n+1/2} - 2\pi T_c(k)\, f_s \right) = 0$$

$$\boxed{T_c = \max\{T_c(k)\}}$$

Экранирующие свойства FS бислоя

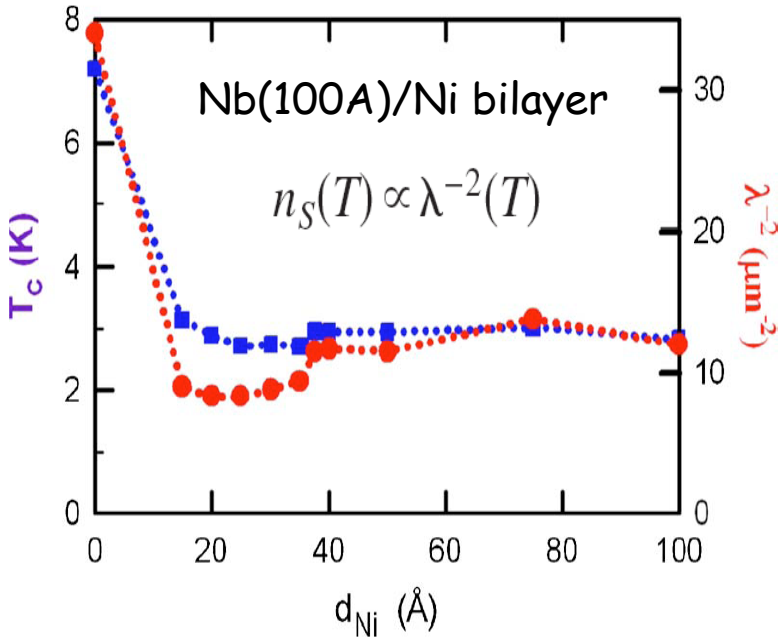
....the first measurements of the effective superfluid density

[T.R. Lemberger, et al.,JAP 2008]



Mutual inductance:
f = 10-50 kHz

$$\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2 \qquad \lambda^{-2} \sim f\,\sigma_2$$

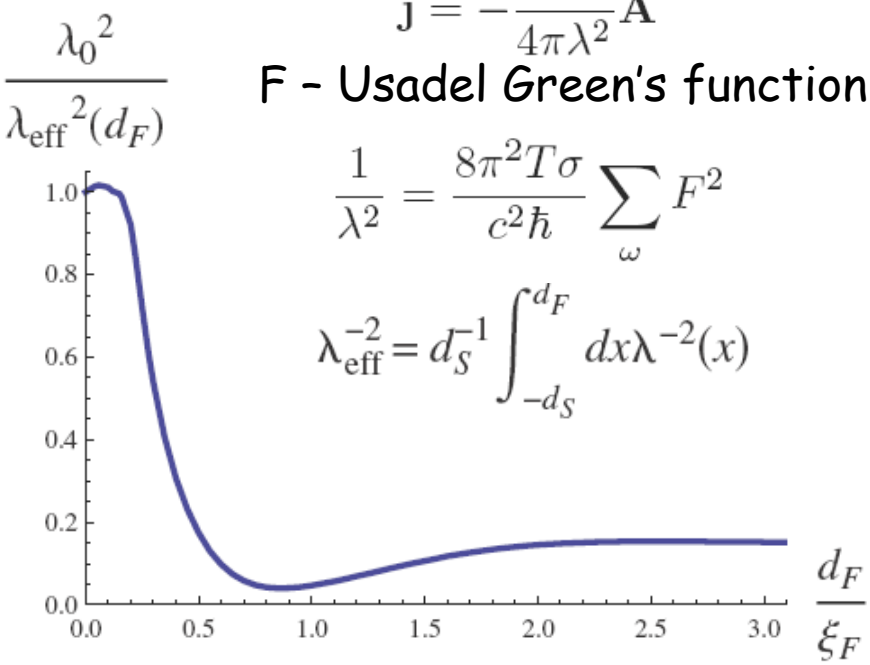


$$\vec{j} = -\frac{c}{4\pi\lambda^2}\vec{A}$$

F – Usadel Green's function

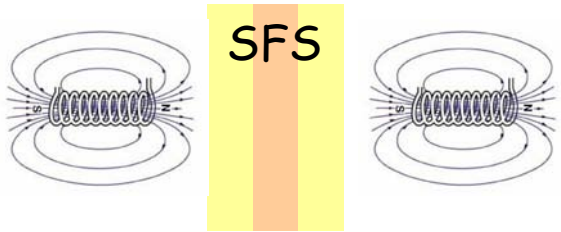
$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{8\pi^2 T\sigma}{c^2\hbar}\sum_{\omega} F^2$$

$$\lambda_{\text{eff}}^{-2} = d_S^{-1}\int_{-d_S}^{d_F} dx\,\lambda^{-2}(x)$$

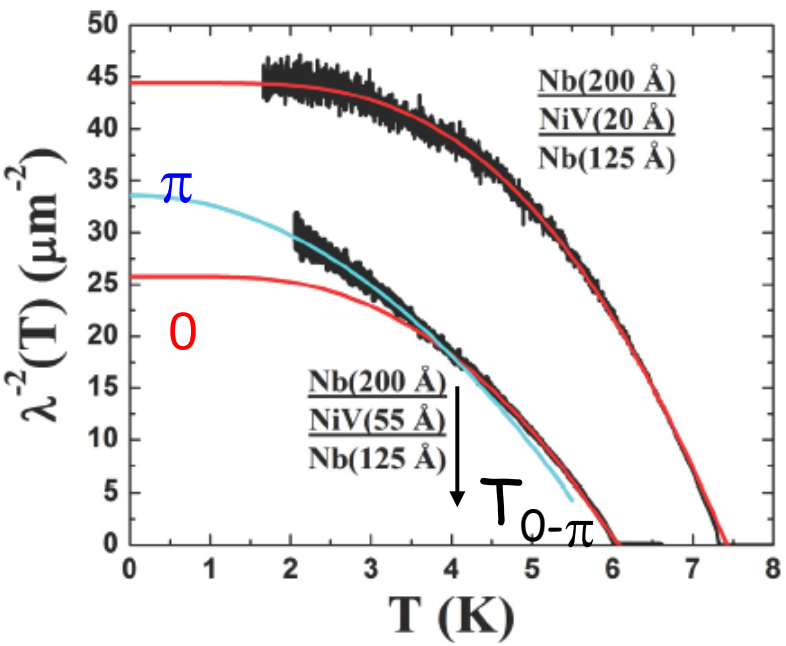


[M. Houzet, J.S. Meyer, PRB 2009]

Экранирующие свойства SFS структур: диагностика 0-π перехода



Mutual inductance: f = 50 kHz



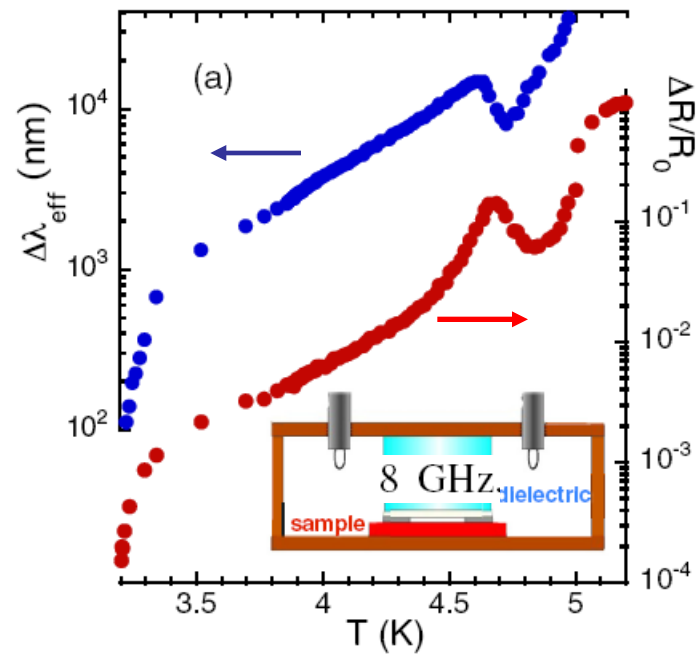
$Ni_{0.96}V_{0.04}$ $T_{Curie} \sim 400$ K

$E_{ex} \sim 50$ K $\rightarrow \xi_f \sim 35$ A

[T.R. Lemberger, et al.,PRB 2016]

Возвратное поведение $\Delta\lambda_{\rm eff}(T)$

$Nb/Pd_{84}Ni_{16}/Nb$



$Pd_{84}Ni_{16}$ $T_c = 200$ K

$E_{ex} \simeq 14$ meV, $\xi_F \simeq 3$ nm,

[E.Silva, et.al., PRB (2015)]

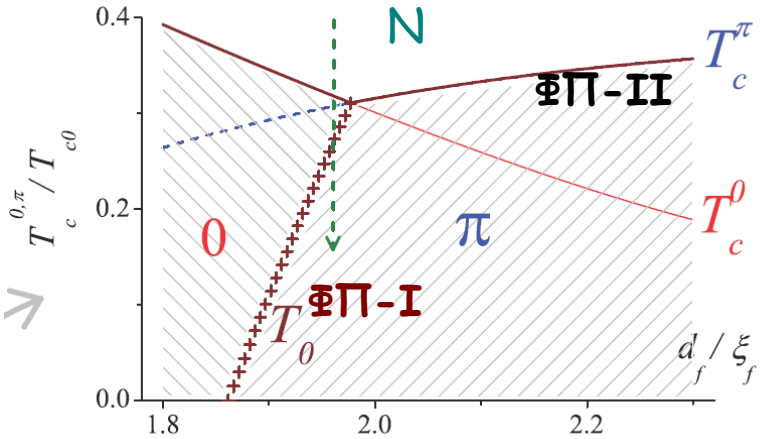
Экранирующие свойства SFS структур: приближение Гинзбурга-Ландау

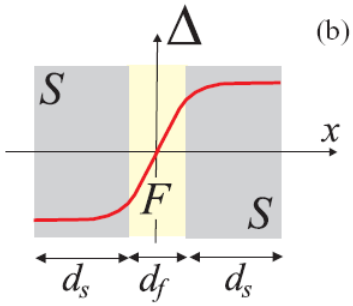
Уравнения Узаделя → $F_{GL}^{0,\pi}(T) = E_0\left[a^{0,\pi}\frac{T-T_c^{0,\pi}}{T_c^{0,\pi}}\Delta^2 + \frac{b^{0,\pi}}{2}\Delta^4\right]$

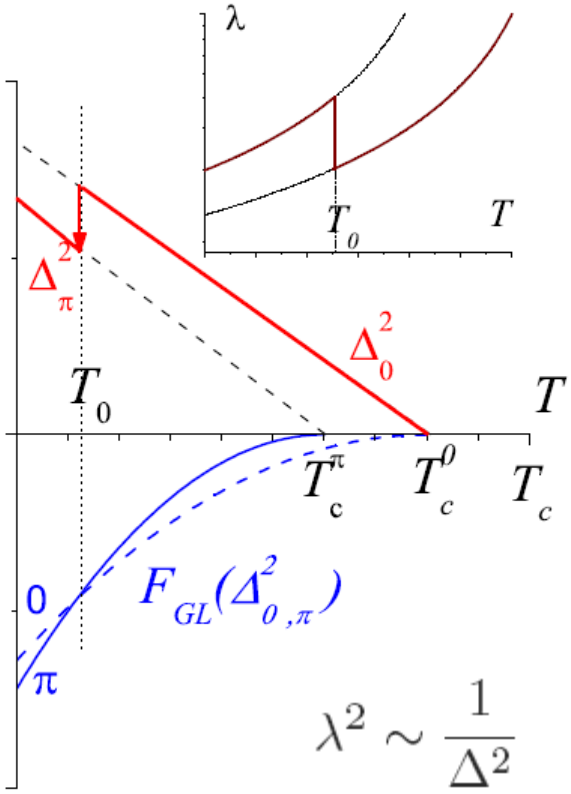
$$\Delta_{0,\pi}^2 = \frac{a^{0,\pi}}{b^{0,\pi}}\frac{T_c^{0,\pi}-T}{T_c^{0,\pi}}$$

$$E^{0,\pi}(T) = -E_0\frac{\left[a^{0,\pi}\left(T_c^{0,\pi}-T\right)/T_c^{0,\pi}\right]^2}{2b^{0,\pi}}$$

ФП-I: $E^0(T_0) = E^\pi(T_0) \qquad \Delta_\pi(T_0) < \Delta_0(T_0)$



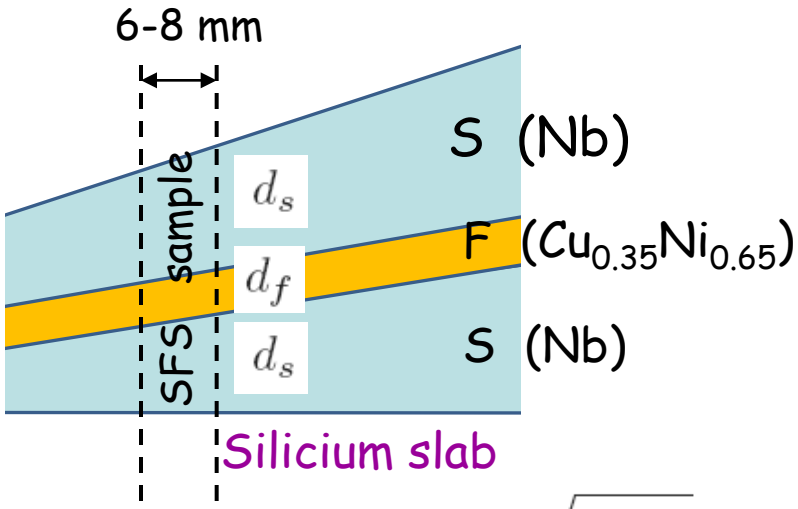




A.V. Samokhvalov, A.I Buzdin, PRB (2015)

ИФМ: Трехслойные структуры Nb/CuNi/Nb с эффектом близости

HV магнетронное распыление двух мишеней Ni и Cu.



$$d_s \sim \xi_s \qquad d_f \sim \xi_f = \sqrt{D_f/h}$$

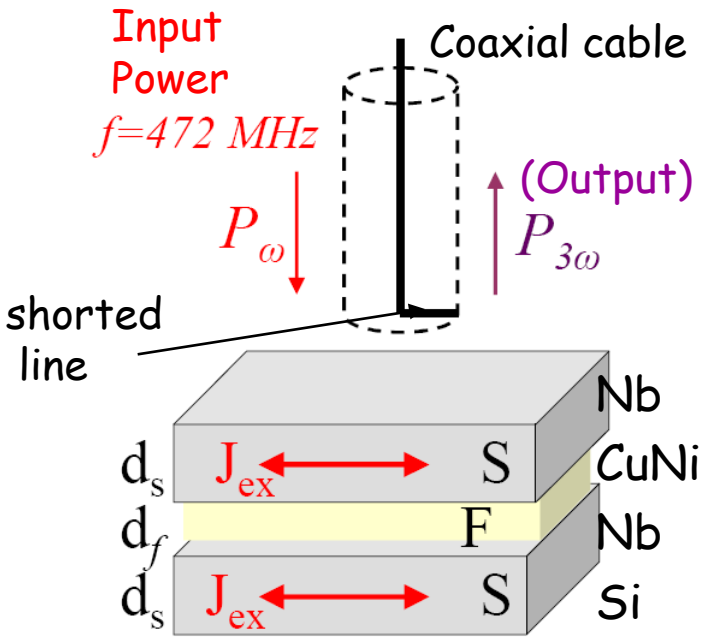
$Cu_{0.35}Ni_{0.65}$

$$T_{Curie} \simeq 250\,\mathrm{K} \quad d_f^{0-\pi} \simeq 4 \div 5\,\mathrm{nm}$$

С.Н.Вдовичев,Ю.Н.Ноздрин, Е.Е.Пестов П.А.Юнин, А.В.Самохвалов, П. в ЖЭТФ (2016)

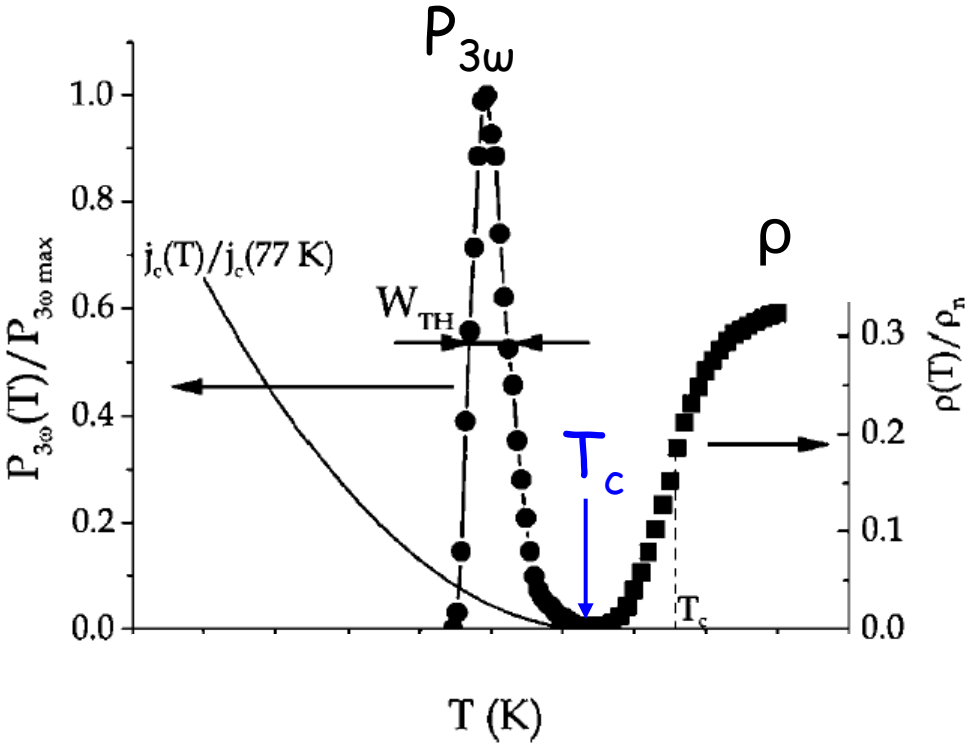
Ближнепольная нелинейная СВЧ микроскопия

ближнеполевой СВЧ зонд
(Size: 2mm x 0.05mm)



Samples: $Nb/Cu_{0.35}Ni_{0.65}/Nb$
Size: ~ 8 mm x 8 mm

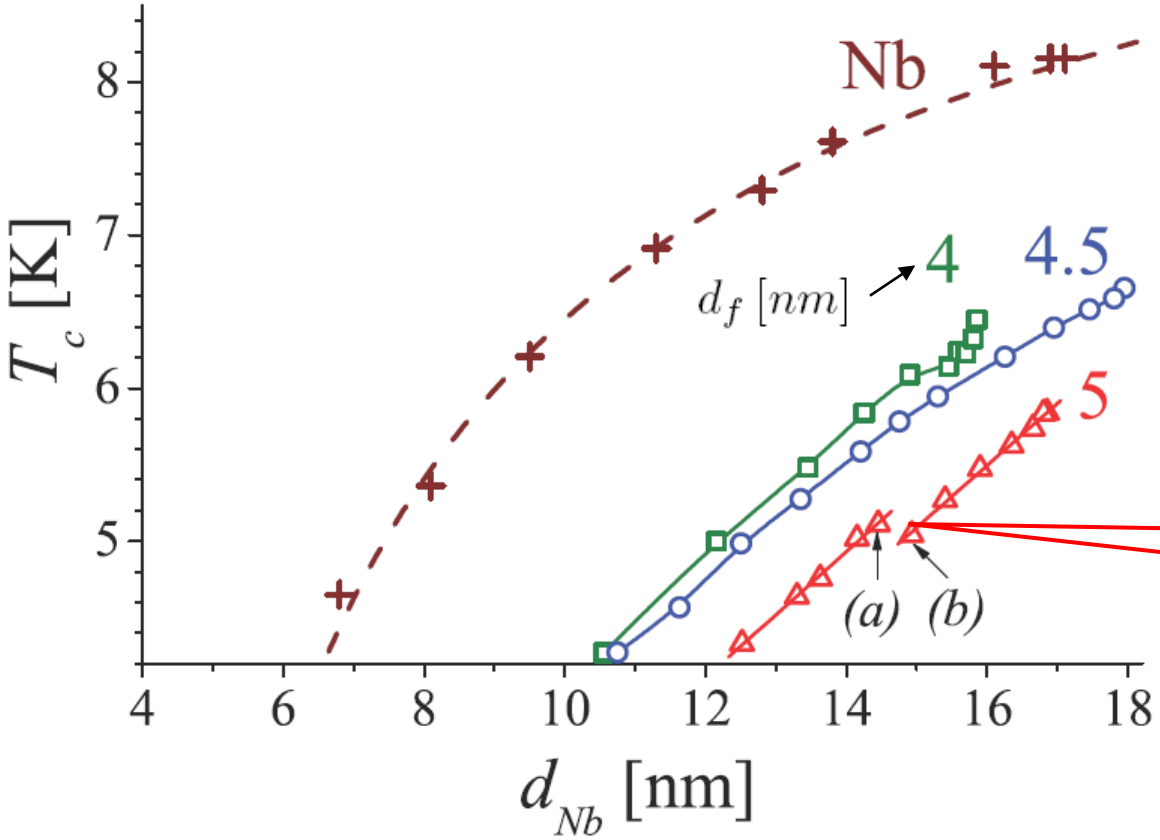
Нелинейный СВЧ отклик

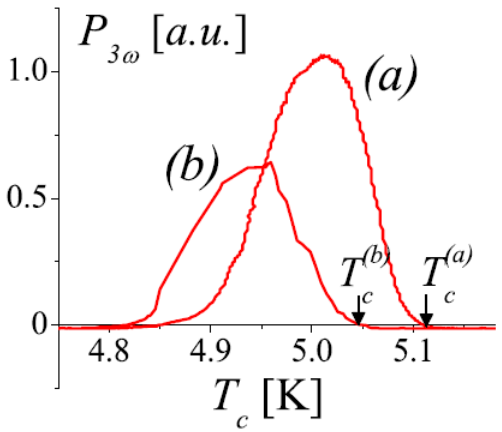


Ю.Н. Ноздрин, Е.Е.Пестов

E.E. Pestov et.al., IEEE Tran. on Appl. Supercond. **11**, 131 (2001);
S.V. Baryshev et.al., PRB **76** 054520 (2007)

Критическая температура Nb/CuNi/Nb



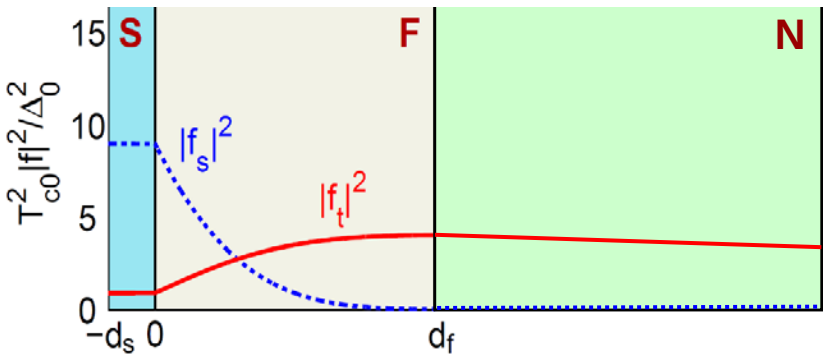


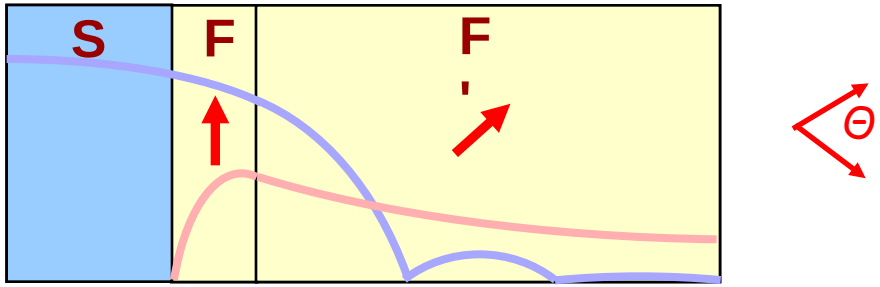
0–π переход

Что дальше ? (Заключение)

Состояния ЛОФФ в S/F/N и S/F/F' системах

$$\lambda^{-2}(x) = \frac{16\pi^3 T_c \sigma}{ec\Phi_0} \sum_{\omega_n > 0} \left(|f_s|^2 - |\vec{f}_t|^2 \right)$$





Ухудшение экранировки – тест продольного ЛОФФ состояния

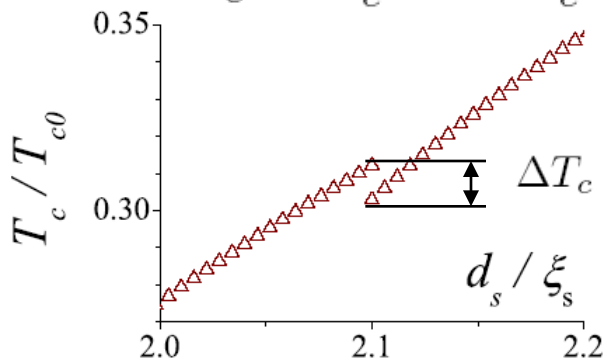
Благодарности:

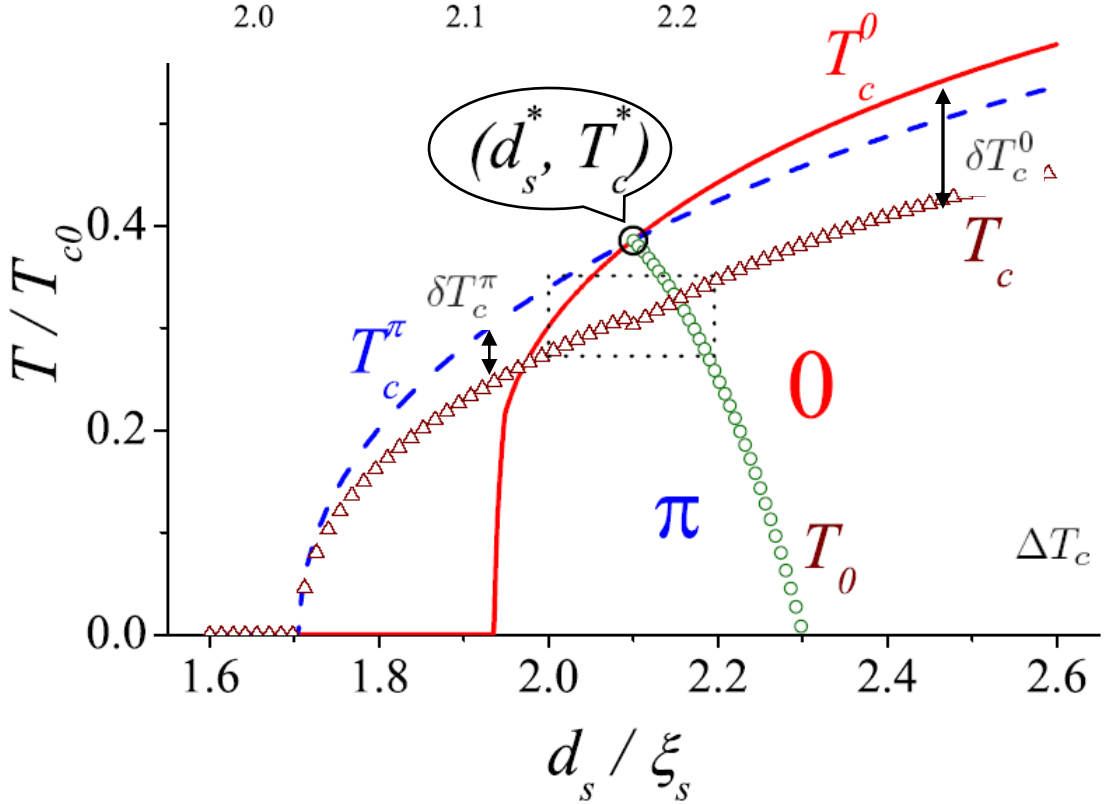
Проекту РНФ № 15-12-10020
«Транспортные и электродинамические свойства гибридных структур для сверхпроводниковой криоэлектроники и спинтроники»
(руководитель А.С. Мельников)

Всем присутствующим – за внимание !

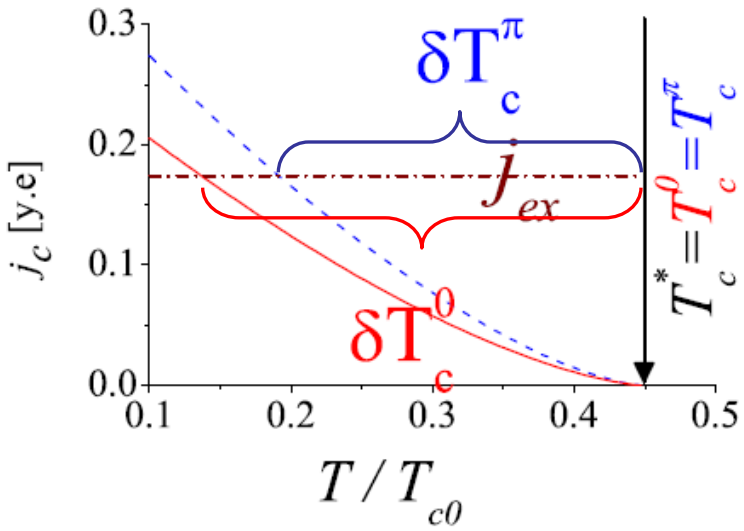
Фазовые переходы в SFS структурах с тонкими S слоями

$$T_c = T_c^{0,\pi} - \delta T_c^{0,\pi}$$





0 - π переход



$$\Delta T_c = \delta T_c^\pi - \delta T_c^0 < 0$$

at $d_s = d_s^*$

$$\Delta T_c = -T_c^* \left(\frac{j_{ex}}{j_{c0}}\right)^{2/3} \left[\frac{(b^0)^{2/3}}{a_0} - \frac{(b^\pi)^{2/3}}{a_\pi}\right]_{d_s = d_s^*}$$