



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



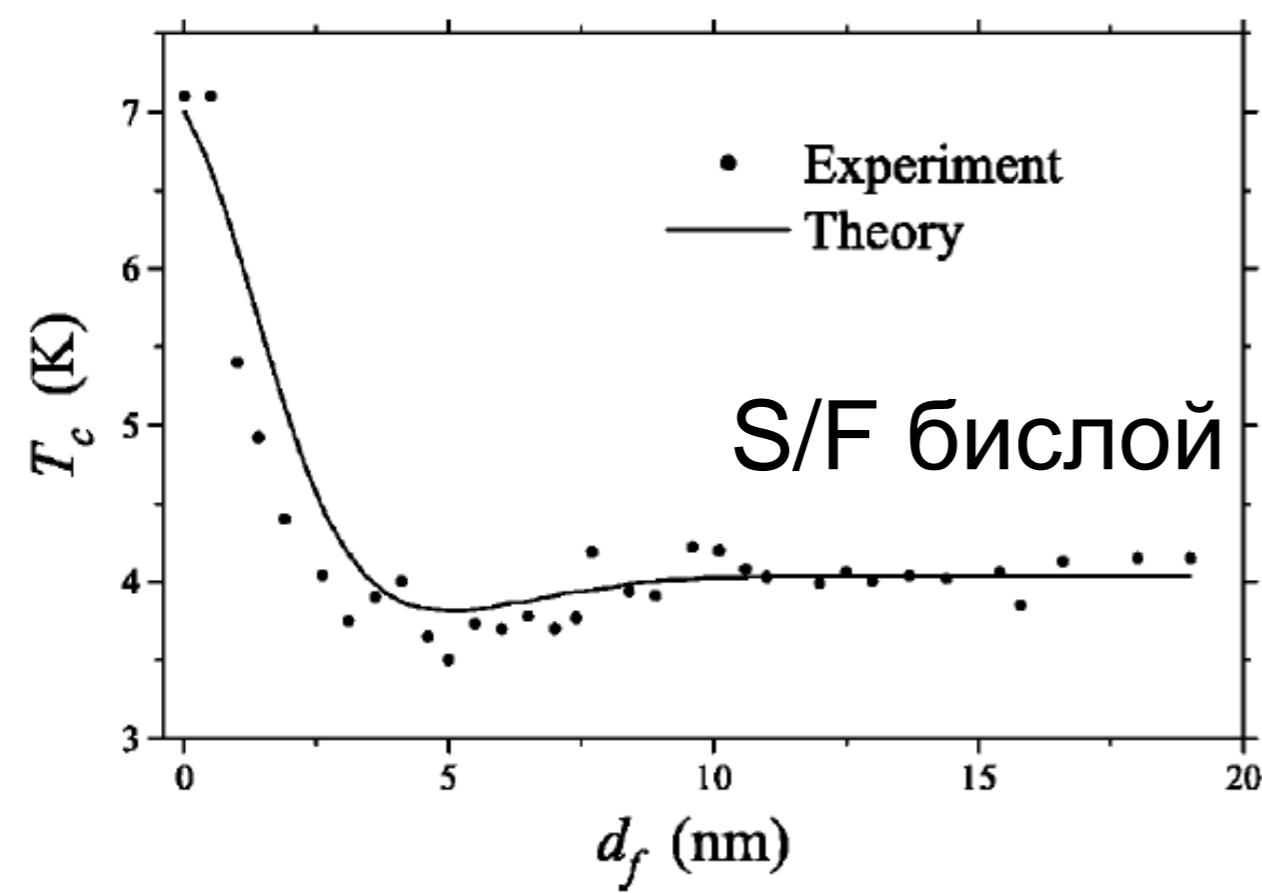
Московский институт электроники
и математики НИУ ВШЭ

Департамент электронной инженерии
Научно-учебная лаборатория квантовой
nanoэлектроники

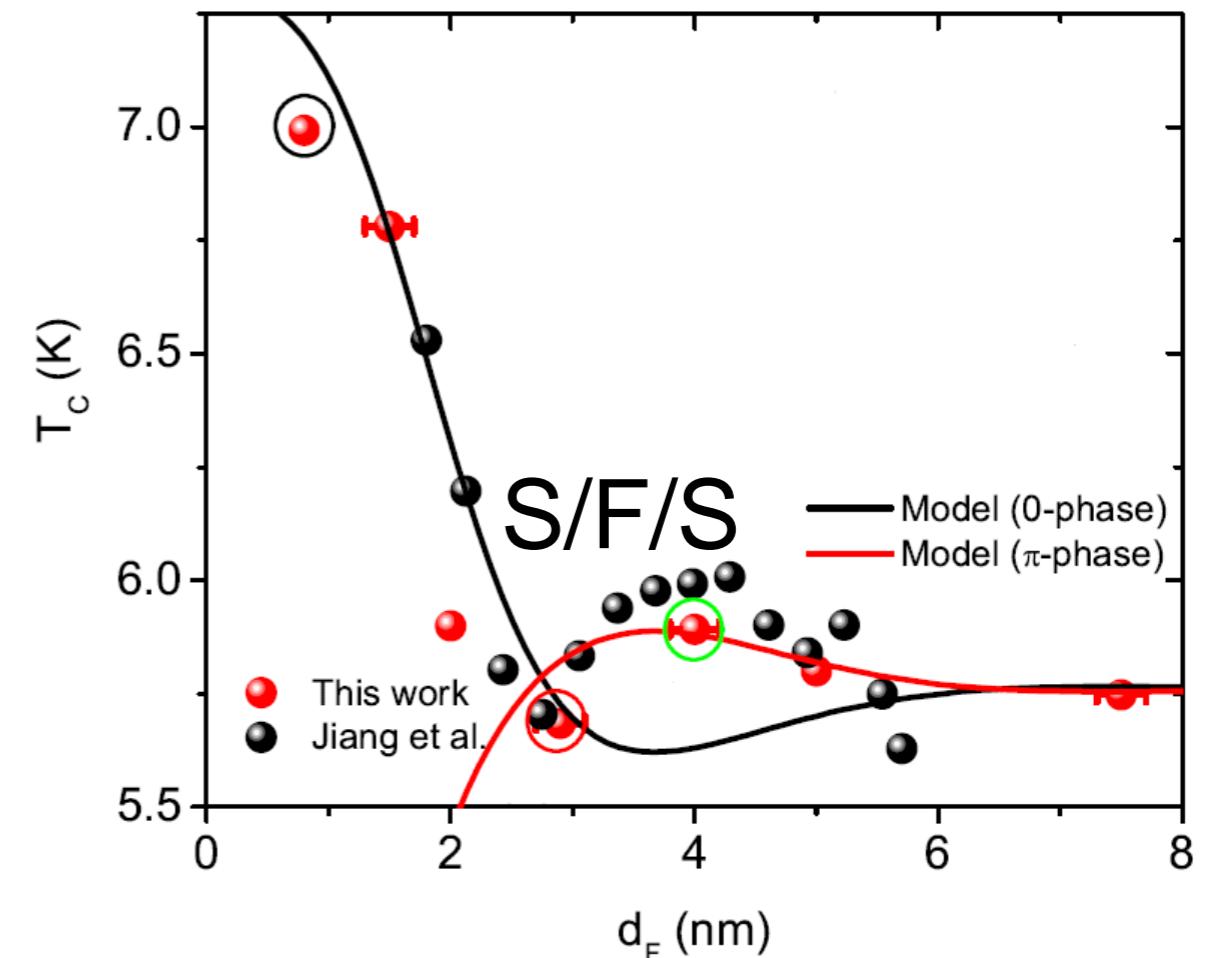
КОНКУРИРУЮЩИЕ 0- И ПИ- СОСТОЯНИЯ В СЛОИСТЫХ S/F СТРУКТУРАХ: МУЛЬТИМОДОВЫЙ МЕТОД

Карабасов Т.И.
Науч. Руководитель: Васенко А.С.

Москва, 2018



Y. V. Fominov, N. M. Chtchelkatchev, and A. A. Golubov, Physical Review B 66, 014507 (2002).



J. S. Jiang, D. Davidović, D. H. Reich, and C. L. Chien, Phys. Rev. Lett. 74, 314 (1995).

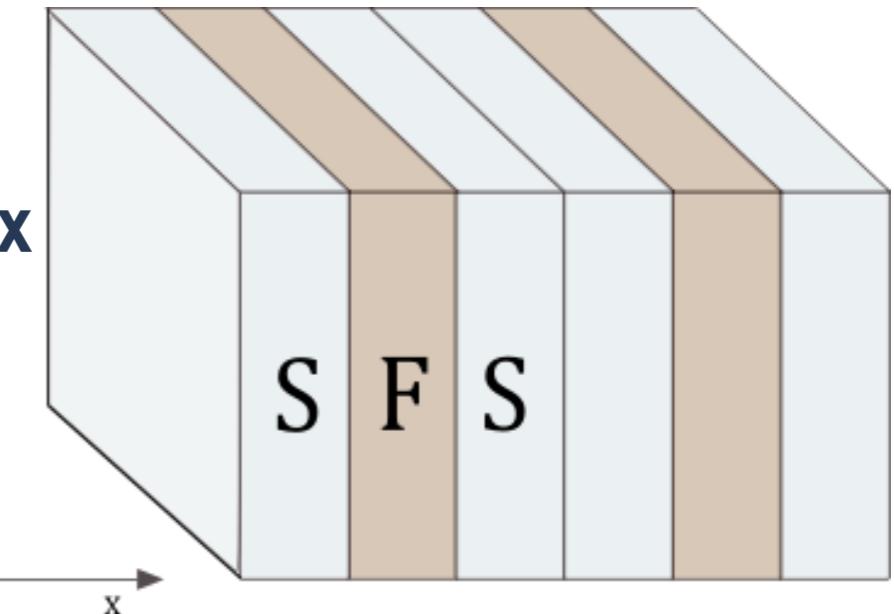
Критическая температура ведет себя немонотонно
при изменении толщины ферромагнетика



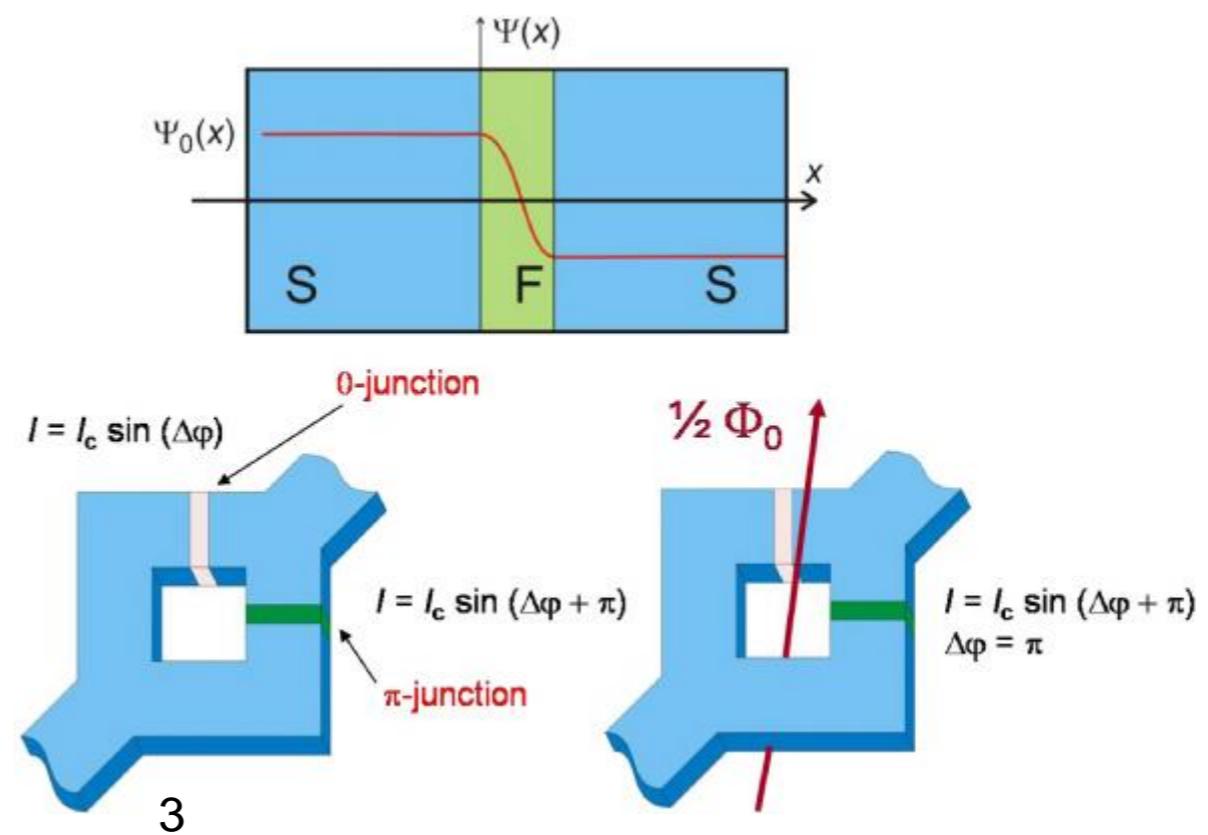
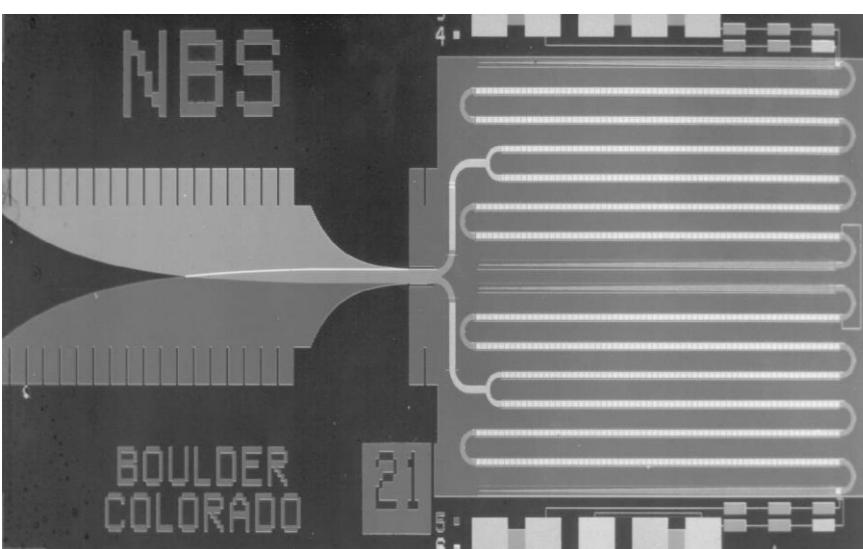
ВВЕДЕНИЕ

Цель

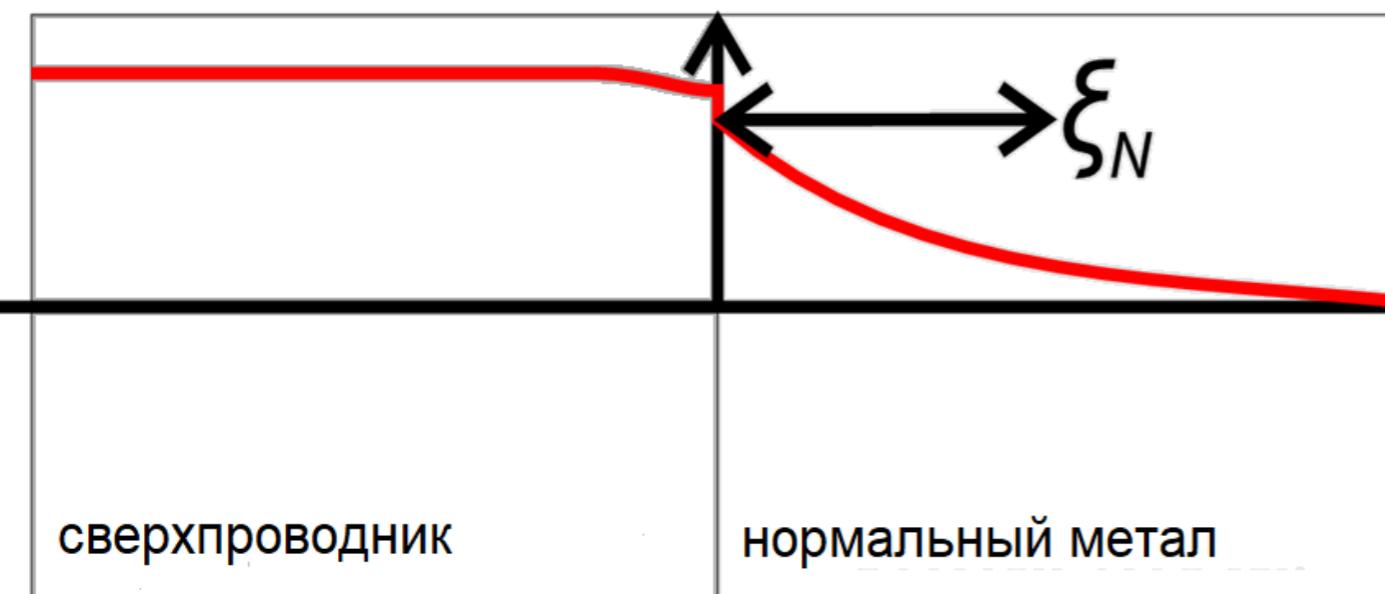
Расчет критической температуры для многослойных
S/F структур *одномодовым* и *мультимодовым*
методами



Актуальность

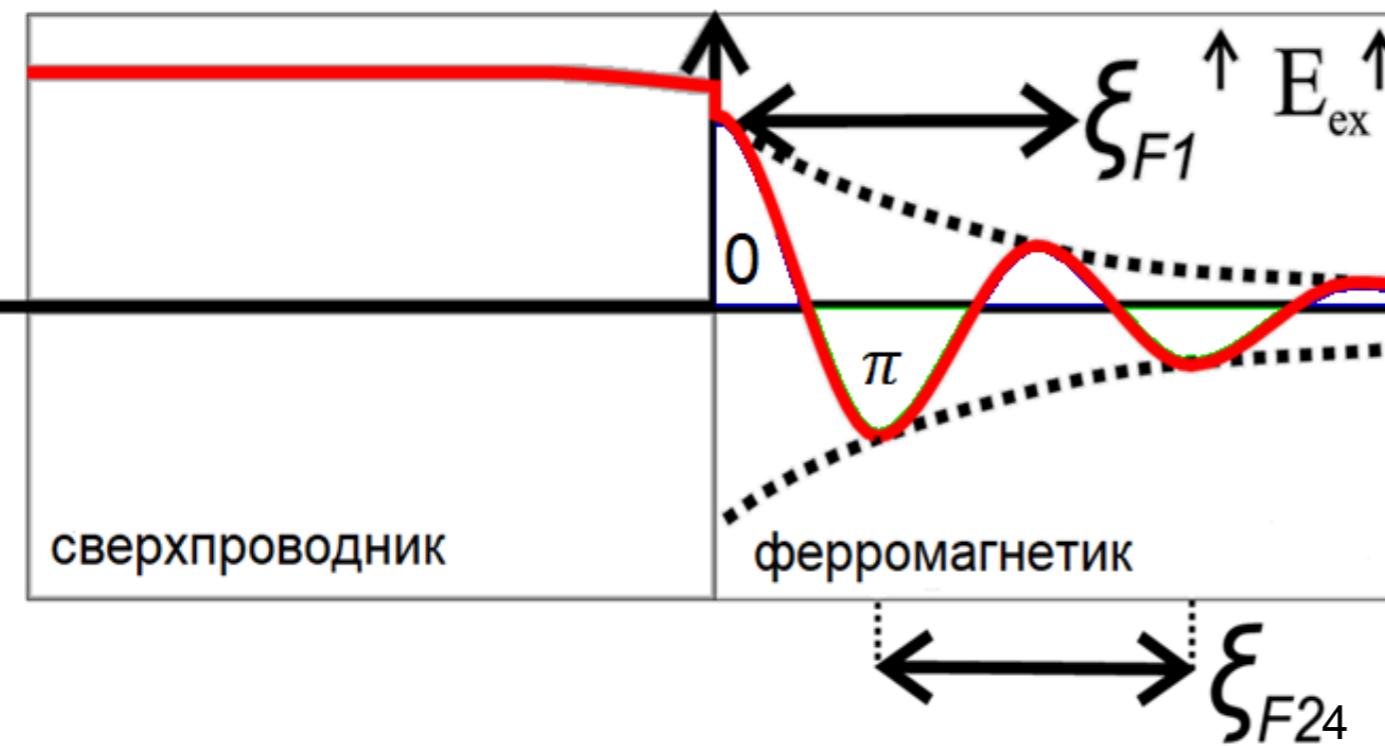


ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ И МОДУЛЯЦИЯ $\Psi(x)$



Схематичное поведение волновой функции на границе S/N

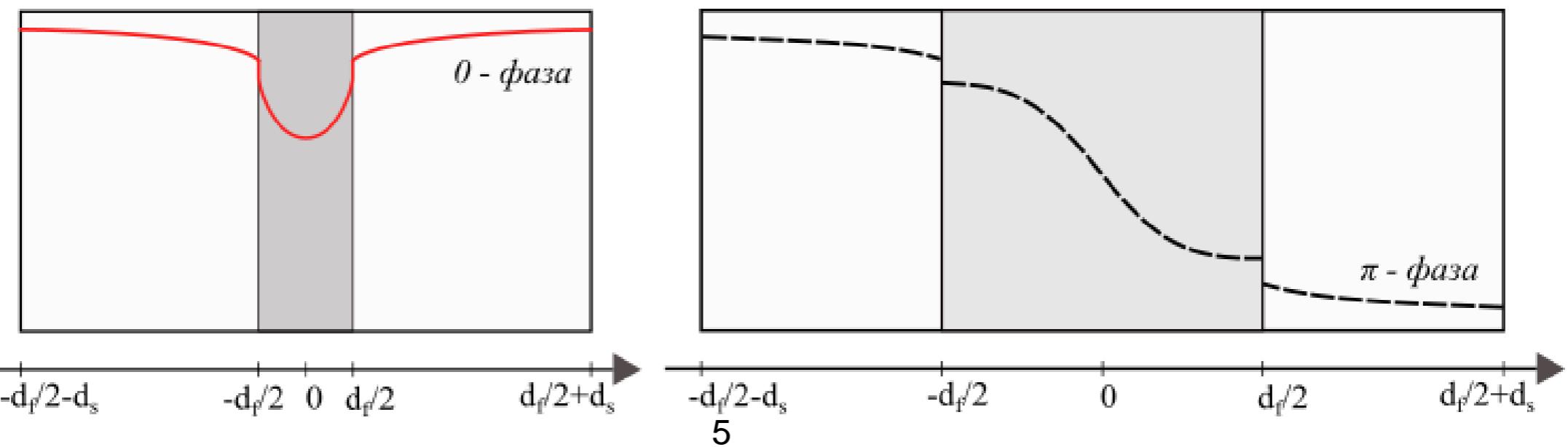
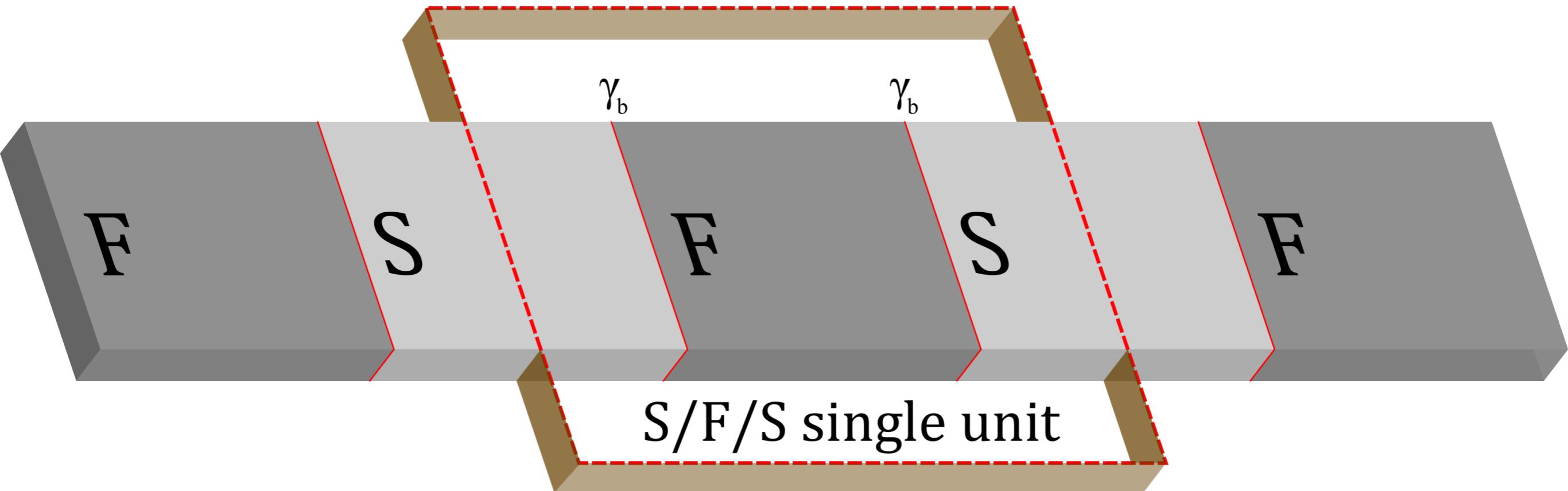
$$\xrightarrow{d_N} \Psi_N(x) = \Psi_0 e^{-\frac{d_N}{\xi_N}}$$



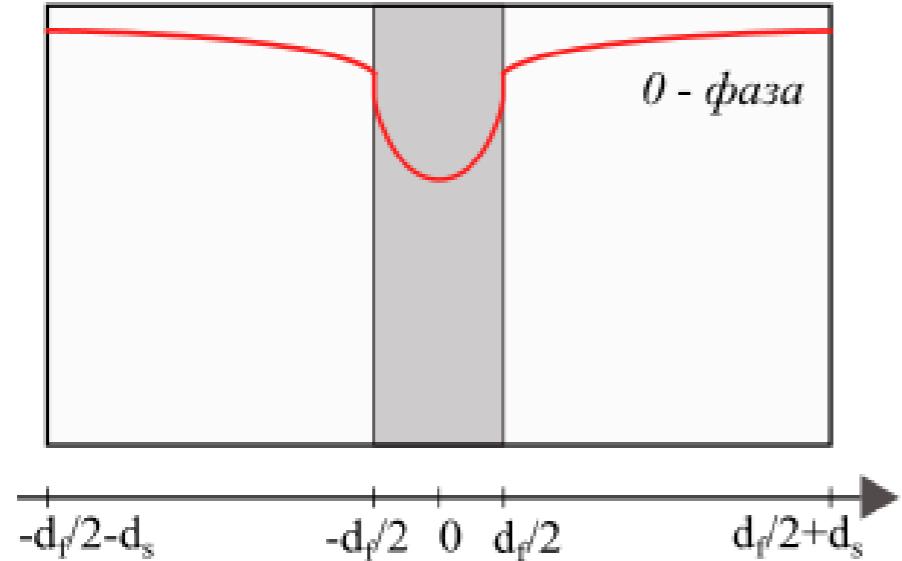
Схематичное поведение волновой функции на границе S/F

$$d_F \Psi_F(x) = \Psi_0 e^{-\frac{d_F}{\xi_{F1}}} \cos\left(\frac{d_F}{\xi_{F2}}\right)$$

S/F/S КАК ЕДИНИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

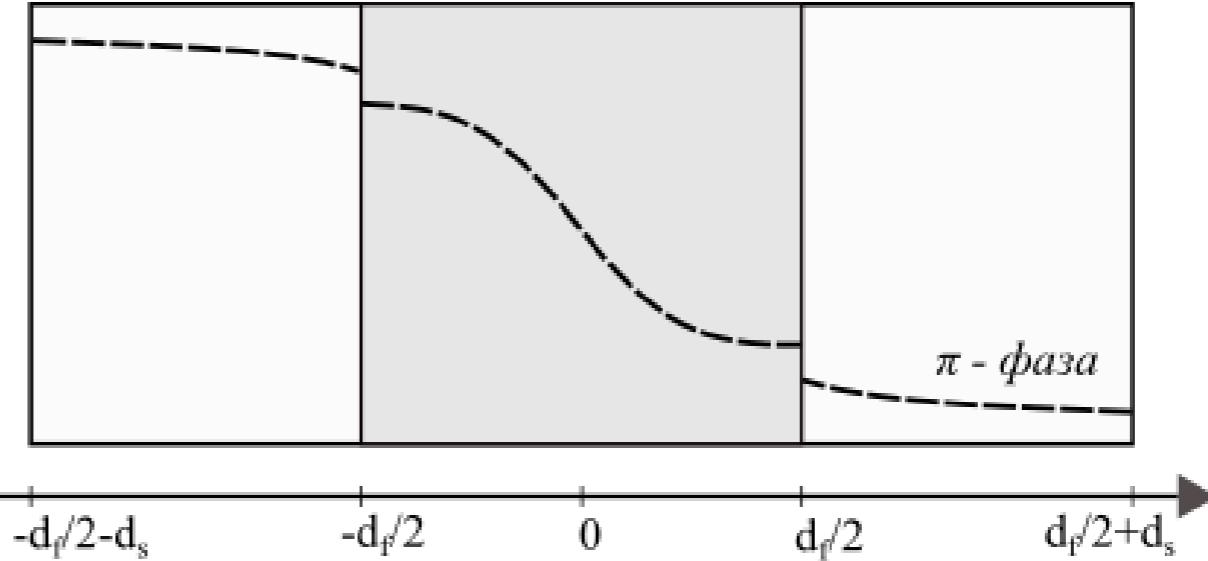


МОДЕЛЬ



$-d_f/2 - d_s \quad -d_f/2 \quad 0 \quad d_f/2 \quad d_f/2 + d_s$

$$F_f^0 = C(\omega_n) \cosh(k_f x)$$



$-d_f/2 - d_s \quad -d_f/2 \quad 0 \quad d_f/2 \quad d_f/2 + d_s$

$$F_f^\pi = C'(\omega_n) \sinh(k_f x)$$

S-сверхпроводник

$$\xi_s^{-2} \pi T_{cs} \frac{d^2 F_s^+}{dx^2} - \omega_n F_s^+ + 2\Delta = 0$$

F-ферромагнетик

$$\xi_n^{-2} \pi T_{cs} \frac{d^2 F_f}{dx^2} - (|\omega_n| + iE_{ex} \operatorname{sgn} \omega_n) F_f = 0$$

В системе реализуется только **одна** фаза
в зависимости от толщины d_f



МОДЕЛЬ

Самосогласованное уравнение для T_{cs}

$$\Delta \ln \frac{T_{cs}}{T} = \pi T \sum_{\omega_n > 0} \left(\frac{2\Delta}{\omega_n} - F_s^+ \right)$$



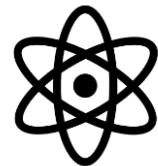
границы условия

На границе S/F

$$\xi_s \frac{dF_s^+(d_f/2)}{dx} = W(\omega_n) F_s^+(d_f/2)$$

На границе с вакуумом:

$$\frac{dF_s(d_s + d_f/2)}{dx} = 0$$



ОДНОМОДОВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ (SINGLEMODE APPROXIMATION)*

- При **одномодовом** приближении решение уравнения находится в виде:

$$F_s^+(x, \omega_n) = f(\omega_n) \cos\left(\Omega \frac{x}{\xi_s}\right)$$

$$\Delta(x) = \delta \cos\left(\Omega \frac{x}{\xi_s}\right)$$

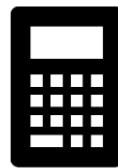
Обычно используется **одномодовый метод**

$$F_s^+(x, \omega_n) = f_0(\omega_n) \cos\left(\Omega_0 \frac{x - (d_s + \frac{d_f}{2})}{\xi_s}\right) + \sum_{m=1}^{\infty} f_m(\omega_n) \frac{\cosh\left(\Omega_m \frac{x - (d_s + \frac{d_f}{2})}{\xi_s}\right)}{\cosh\left(\Omega_m \frac{(d_s + \frac{d_f}{2})}{\xi_s}\right)}$$

- **Мультимодовая** аппроксимация отличается тем что решение уравнения задается как:

$$F_s^+(x, \omega_n) = f_0(\omega_n) \cos\left(\Omega_0 \frac{x - (d_s + \frac{d_f}{2})}{\xi_s}\right) + \sum_{m=1}^{\infty} f_m(\omega_n) \frac{\cosh\left(\Omega_m \frac{x - (d_s + \frac{d_f}{2})}{\xi_s}\right)}{\cosh\left(\Omega_m \frac{(d_s + \frac{d_f}{2})}{\xi_s}\right)}$$

$$\Delta(x) = \delta_0 \cos\left(\Omega_0 \frac{x - (d_s + \frac{d_f}{2})}{\xi_s}\right) + \sum_{m=1}^{\infty} \delta_m \frac{\cosh\left(\Omega_m \frac{x - (d_s + \frac{d_f}{2})}{\xi_s}\right)}{\cosh\left(\Omega_m \frac{(d_s + \frac{d_f}{2})}{\xi_s}\right)}$$



РЕЗУЛЬТАТЫ

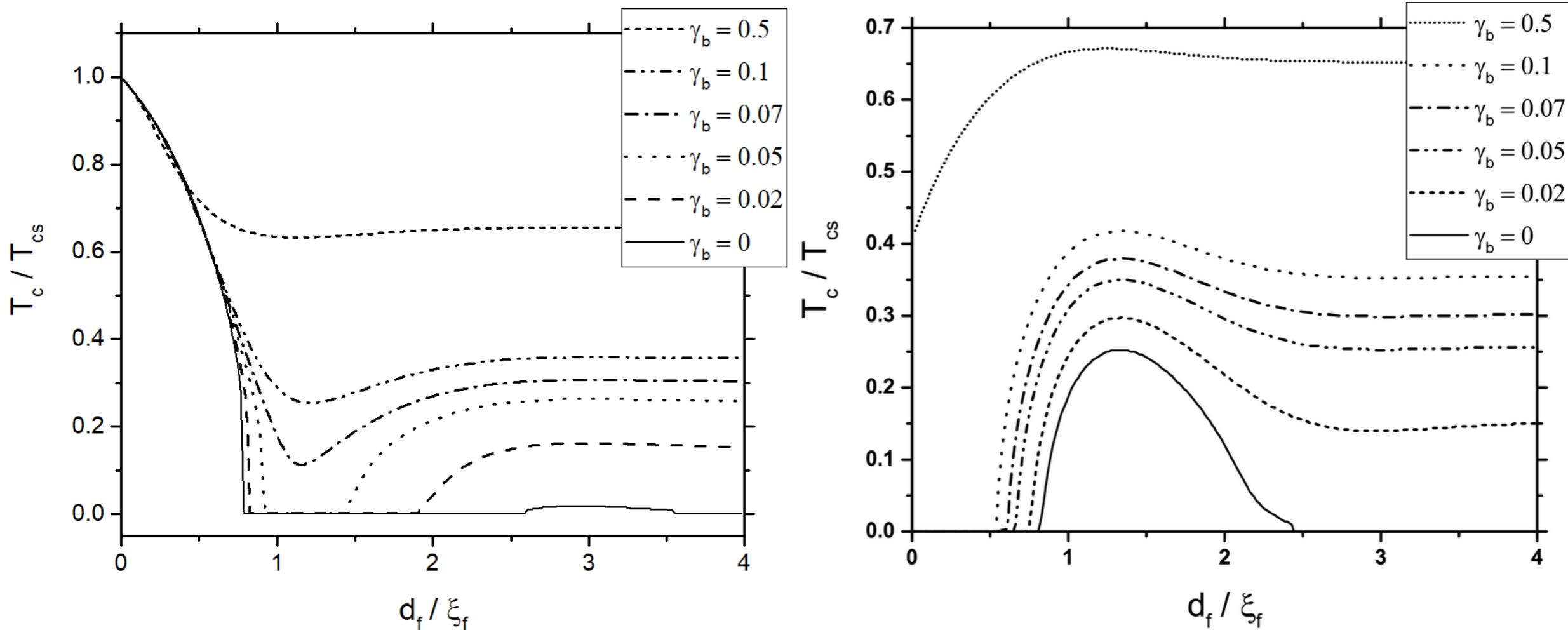


График зависимости критической температуры сверхпроводника от толщины ферромагнитного слоя
для π - состояния (справа) и
для 0 - состояния (слева).

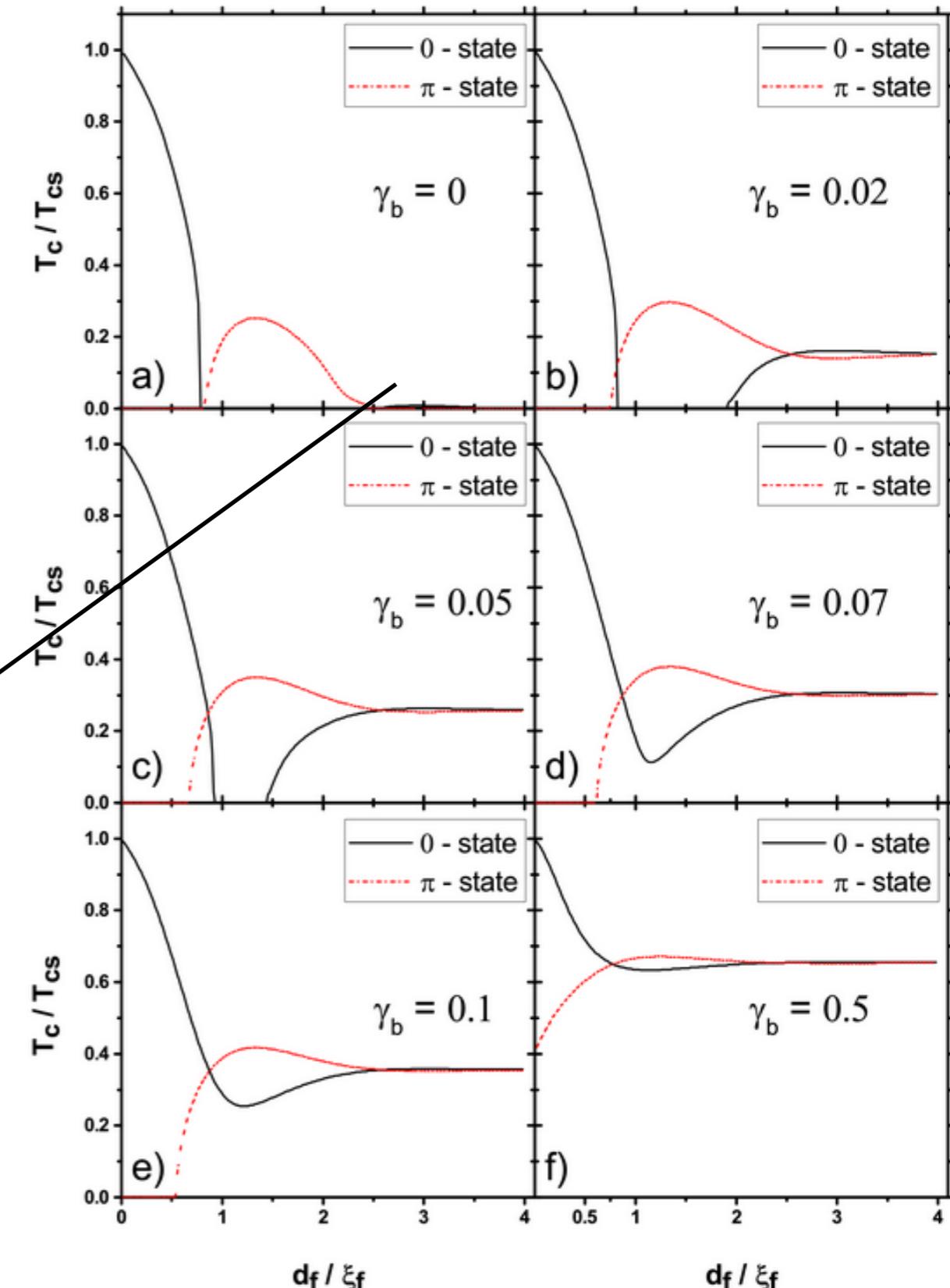
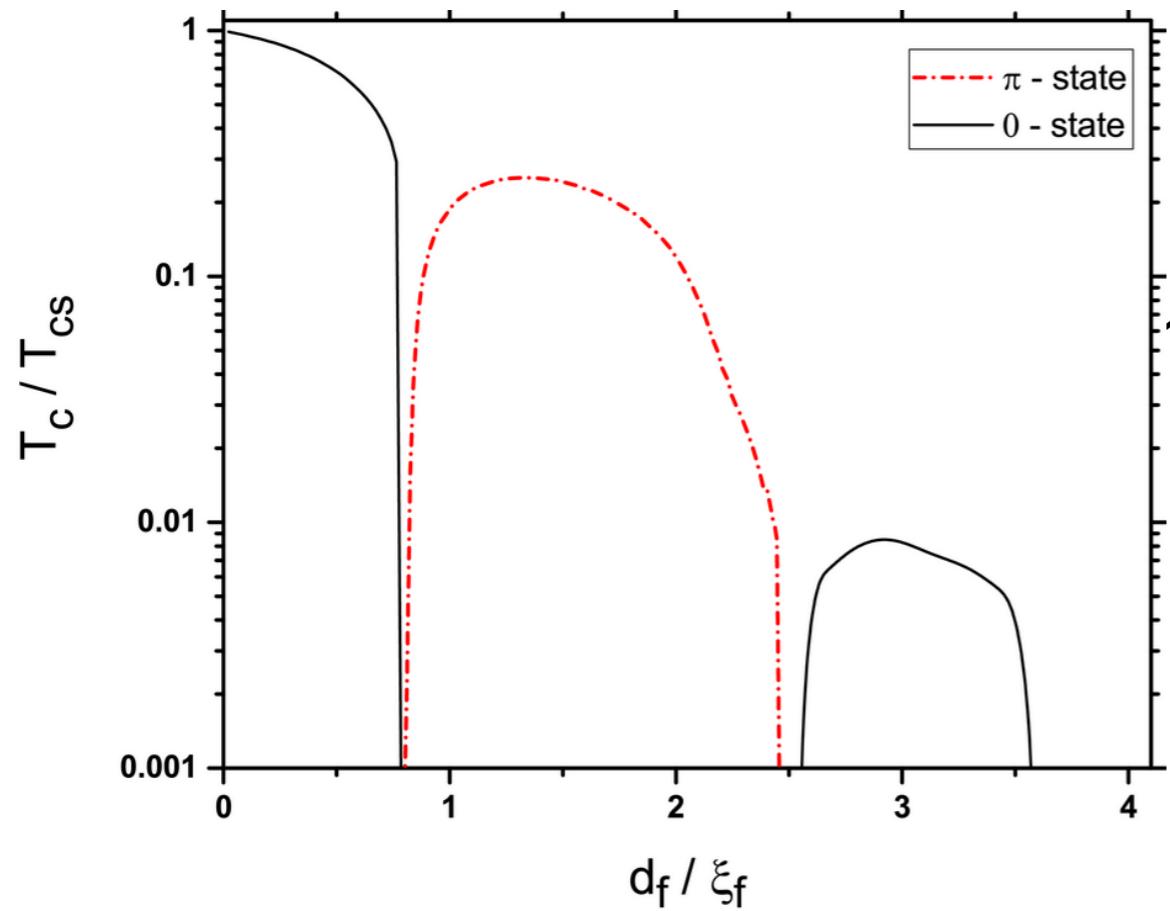
γ_b - параметр пропорциональный сопротивлению на переходе S/F

$$\gamma_b = \frac{R_b A}{\rho_f \xi_f}$$

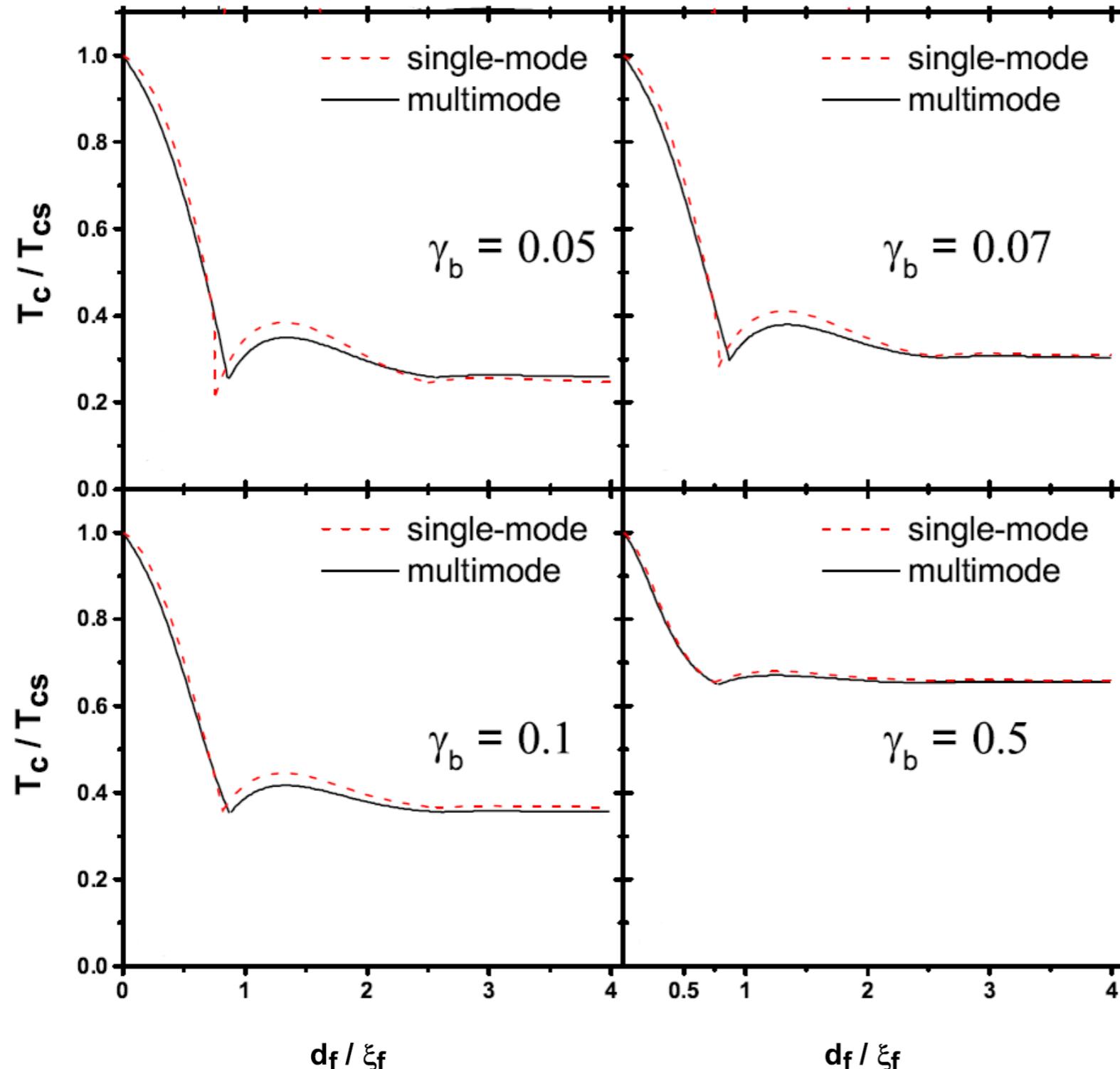
Зависимость $T_c(d_f)$ в S/F/S структуре

Графики зависимостей критической температуры сверхпроводника от толщины ферромагнитного слоя в S/F/S системе

Второй период осцилляции при $\gamma_\beta = 0$



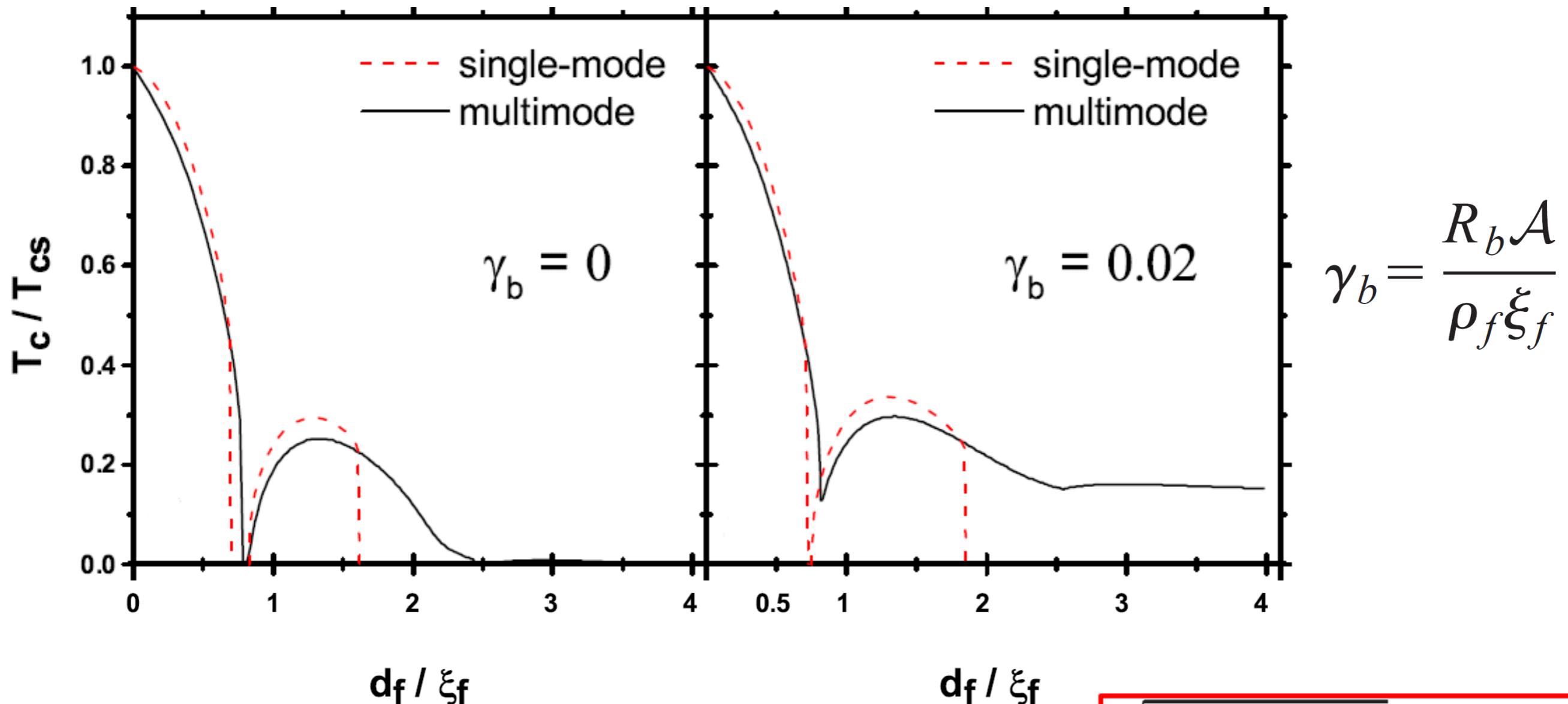
Сравнение СМА и ММА методов



$$\gamma_b = \frac{R_b A}{\rho_f \xi_f}$$

$\sqrt{E_{ex} / \pi T_{cs}} \gg 1 / \gamma_b$

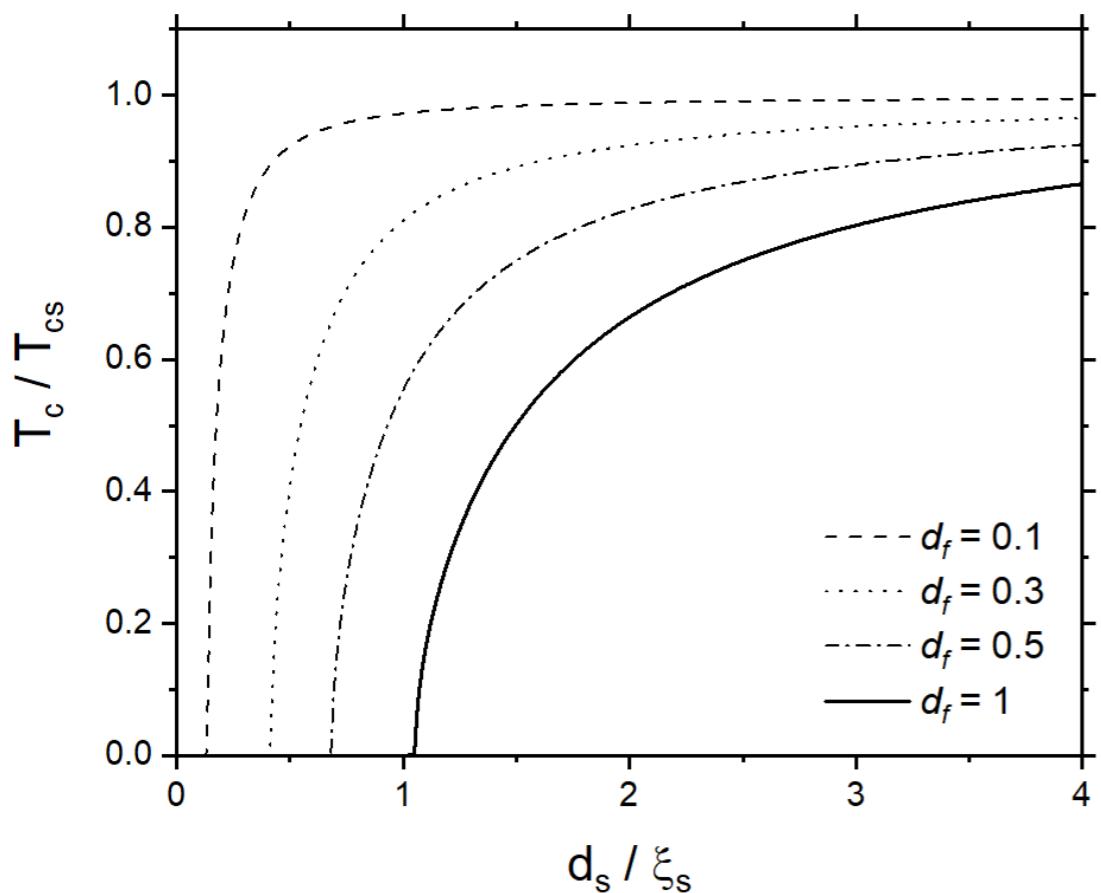
Сравнение СМА и ММА методов



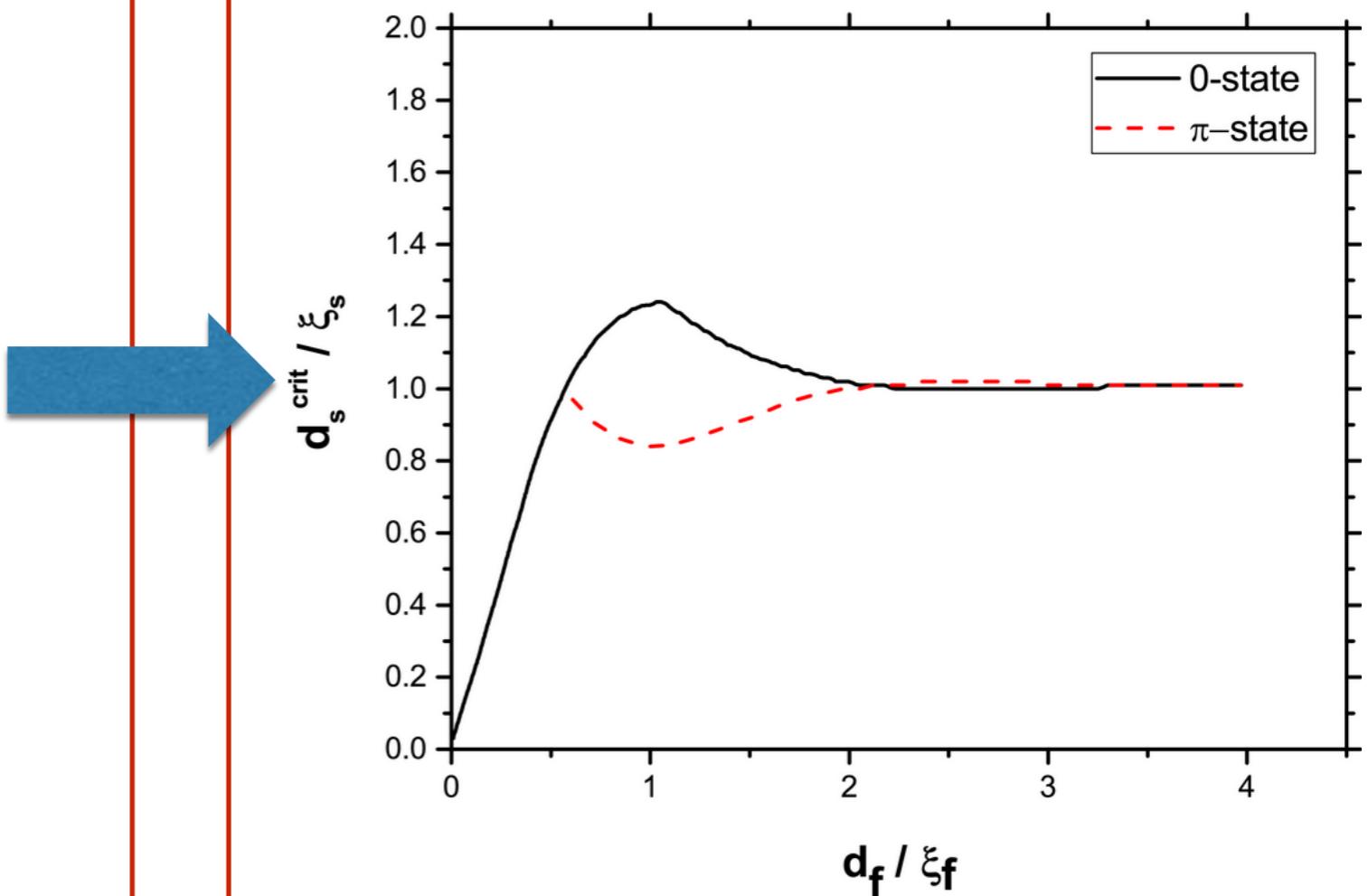
$$\sqrt{E_{ex} / \pi T_{cs}} \gg 1 / \gamma_b$$

Критическая толщина сверхпроводника d_s^{crit}

Кривые $T_c(d_s)$ для различных d_f



Критическая толщина сверхпроводника при 0 и π состояниях





ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Представлены результаты расчетов зависимости критической температуры в S/F/S структурах при помощи одномодовой и мультимодовой аппроксимаций
- Данные результаты могут быть использованы для случая многослойных S/F систем
- Сравнение одномодовой и мультимодовой методов
- Показано поведение критической толщины сверхпроводника



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Адрес: г. Москва Таллинская 34