



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

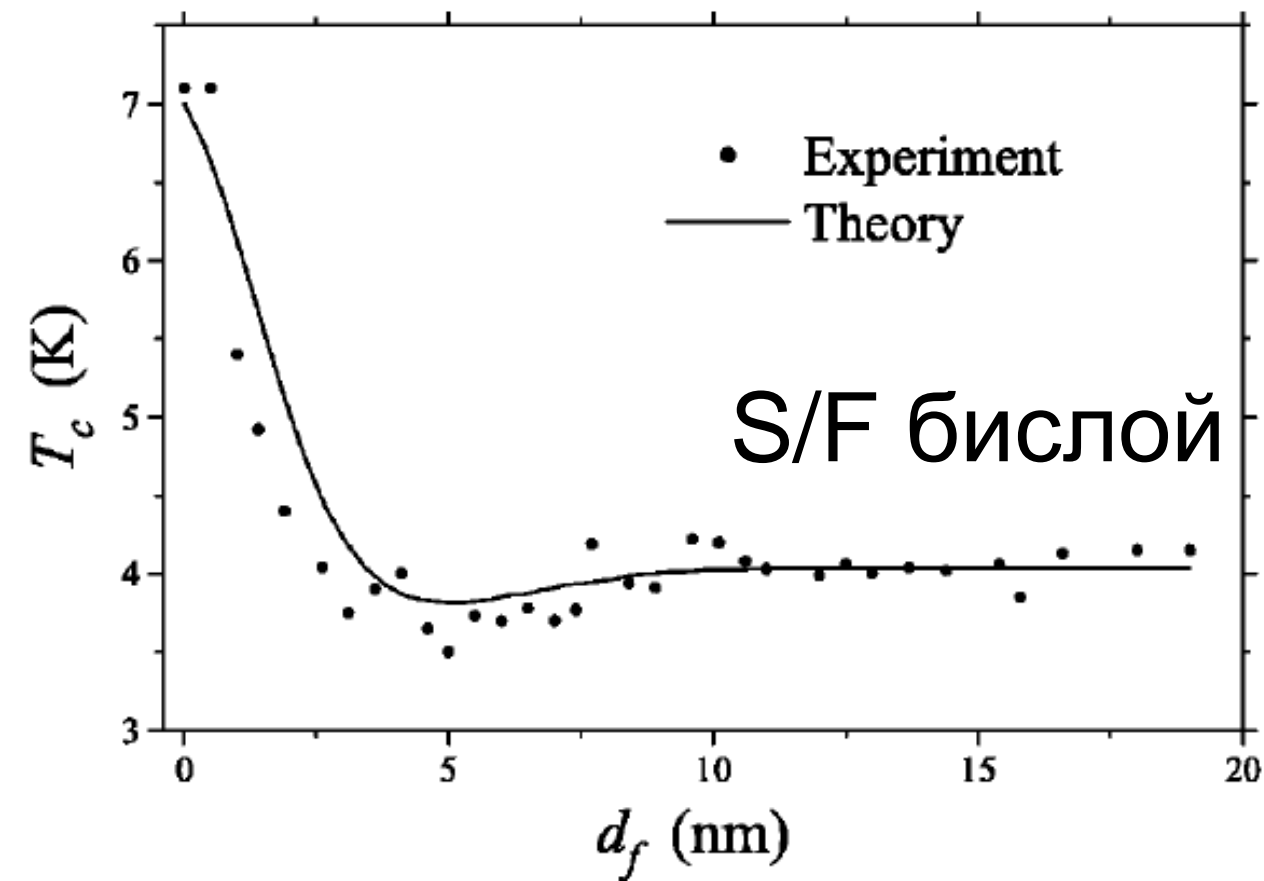


Департамент электронной инженерии  
Научно-учебная лаборатория квантовой  
наноэлектроники

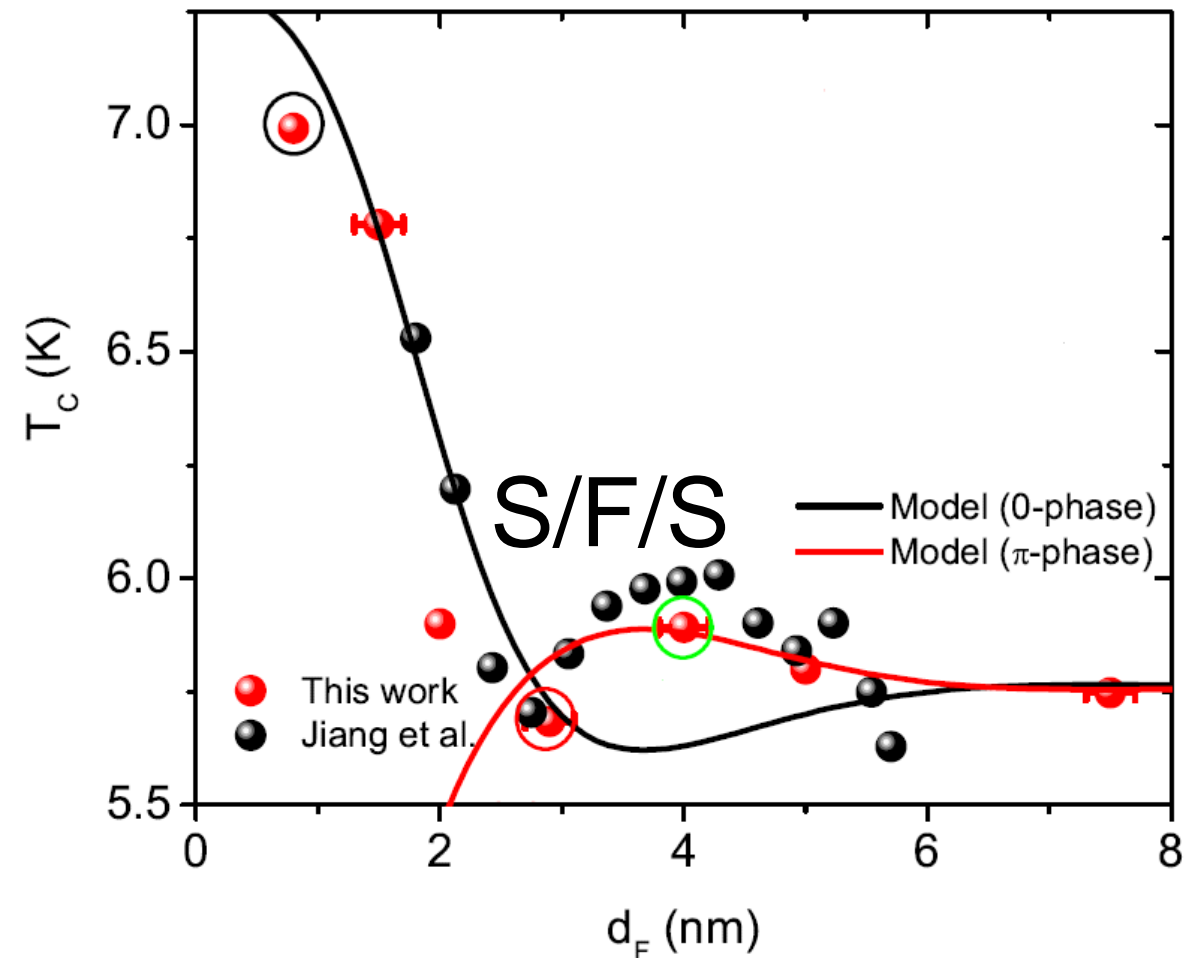
# КОНКУРИРУЮЩИЕ 0- И ПИ- СОСТОЯНИЯ В СЛОИСТЫХ S/F СТРУКТУРАХ: МУЛЬТИМОДОВЫЙ МЕТОД

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

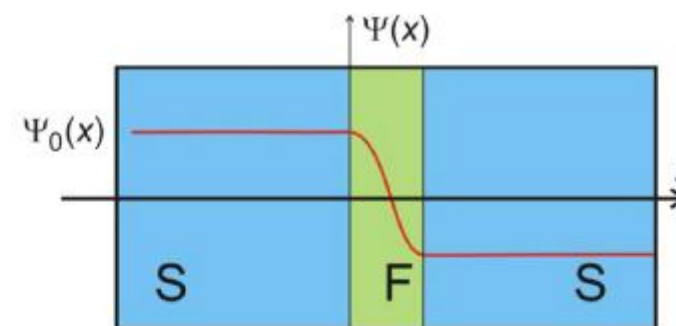
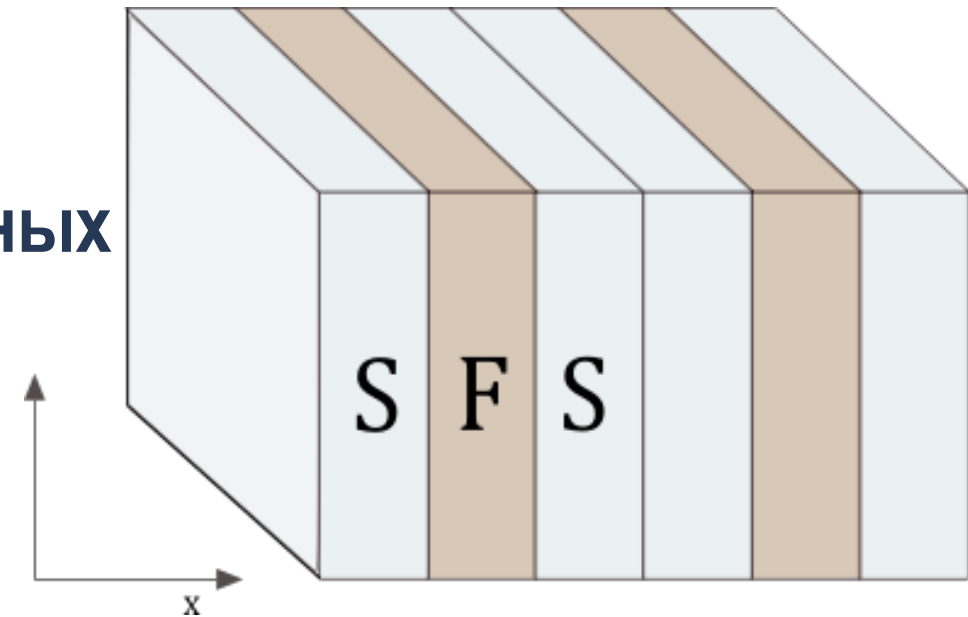
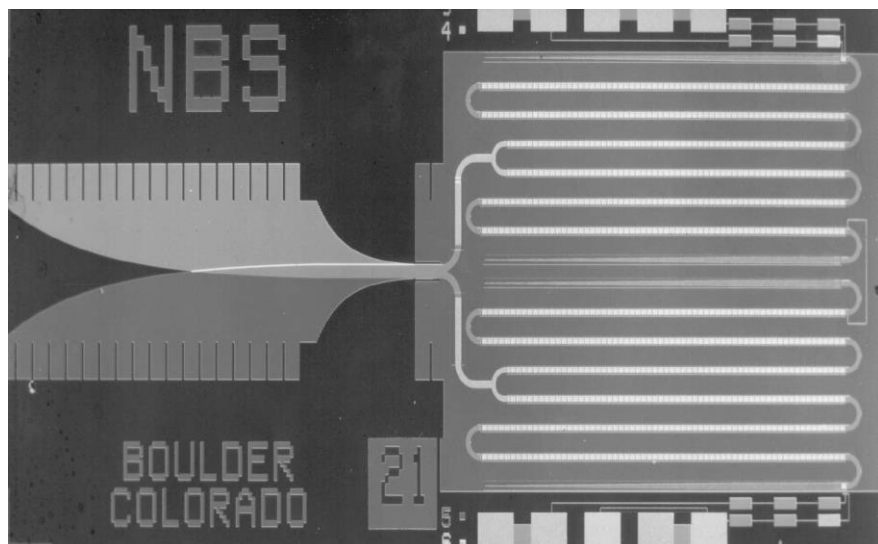


# ВВЕДЕНИЕ

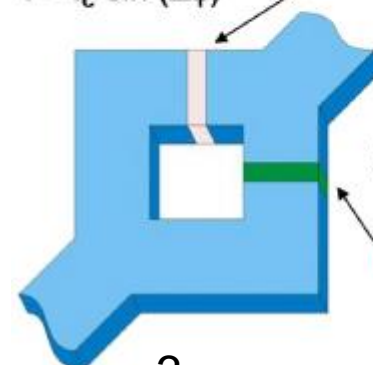
## Цель

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

## Актуальность



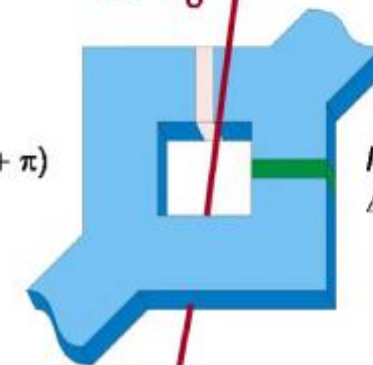
$I = I_c \sin(\Delta\varphi)$  0-junction



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

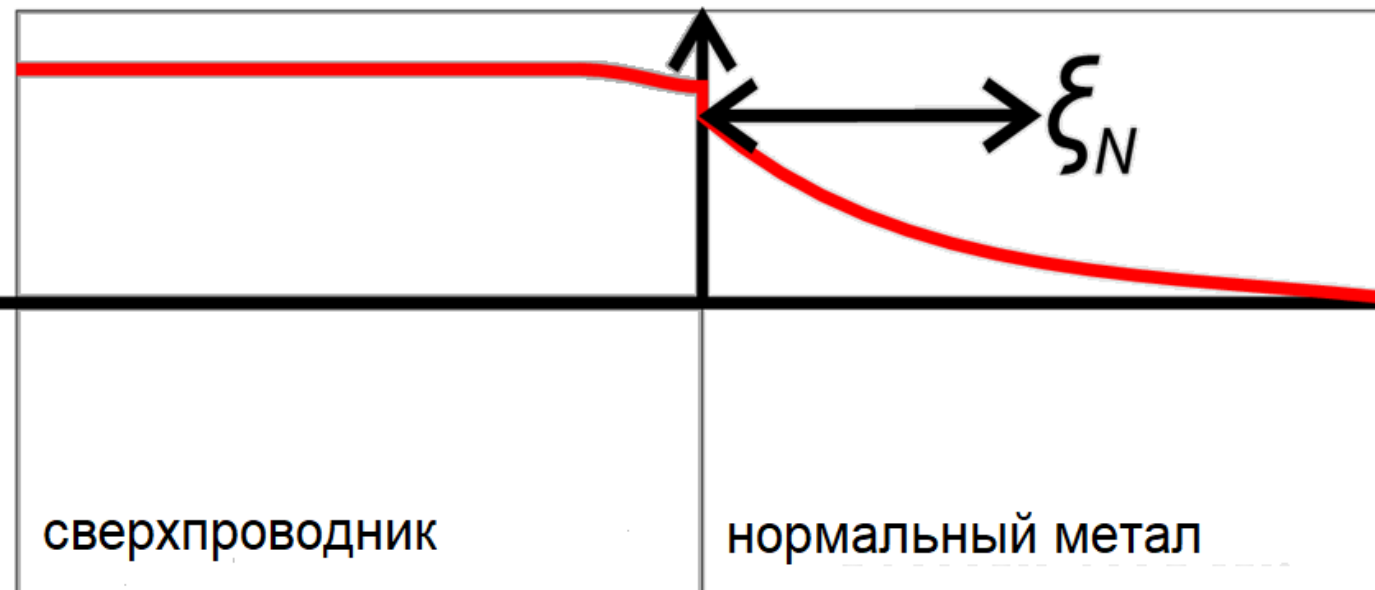
$\pi$ -junction

$\frac{1}{2} \Phi_0$



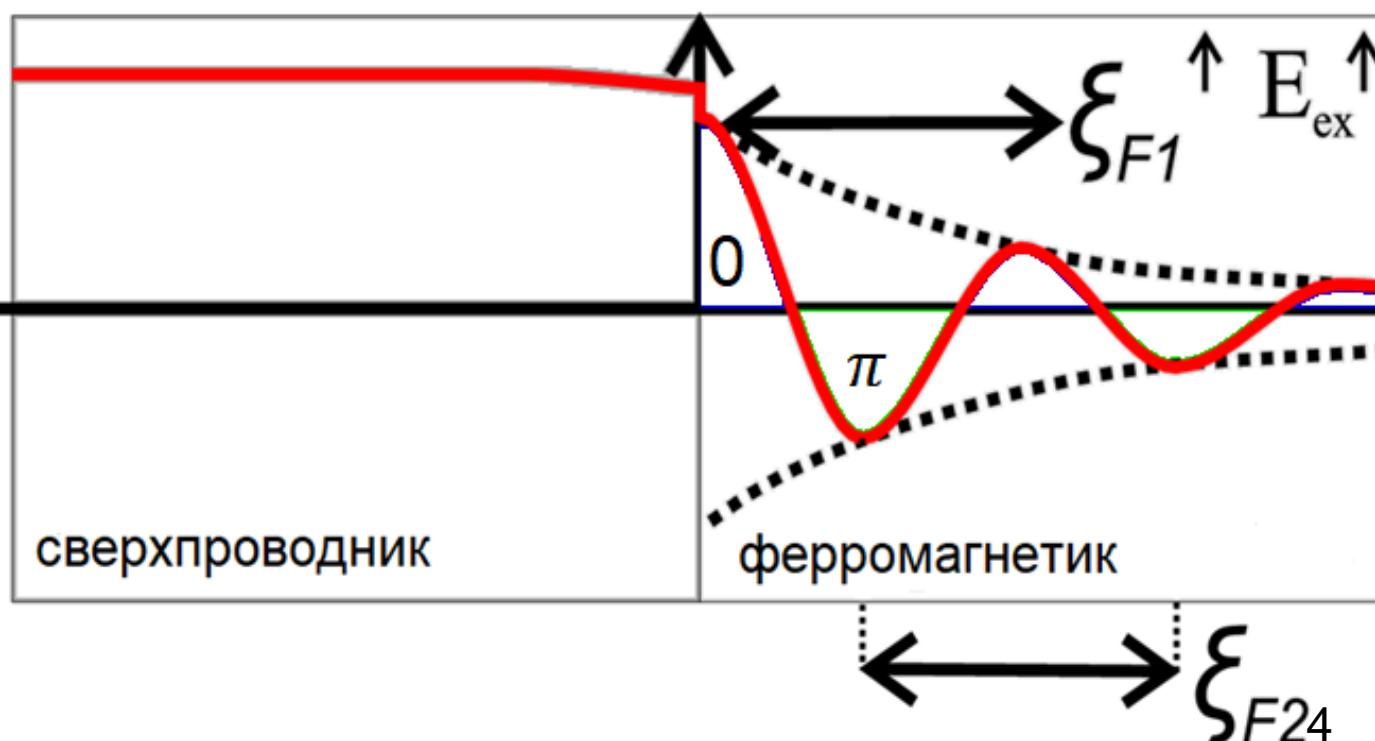
$I = I_c \sin(\Delta\varphi + \pi)$   
 $\Delta\varphi = \pi$

# ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ И МОДУЛЯЦИЯ $\Psi(x)$



Схематичное поведение волновой функции на границе S/N

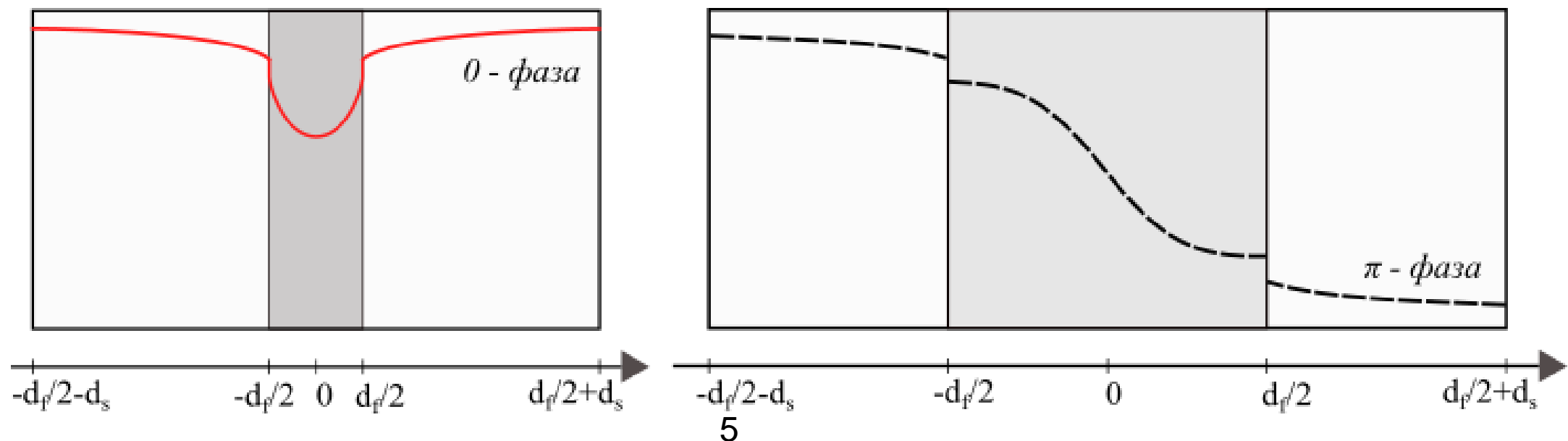
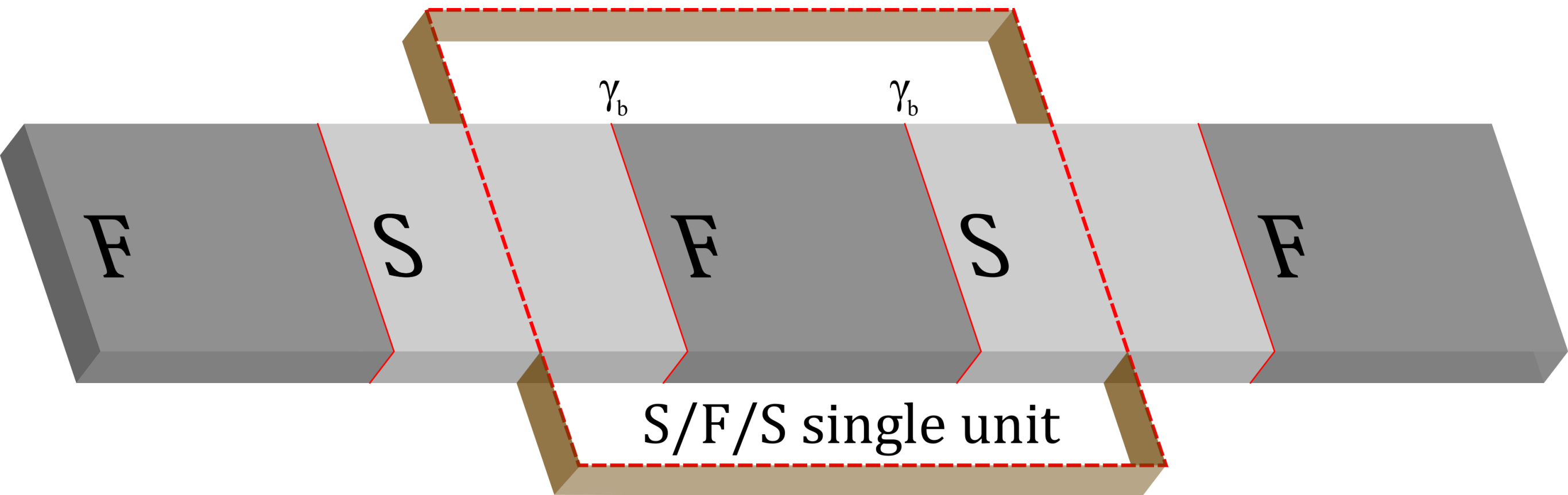
$$d_N \quad \Psi_N(x) = \Psi_0 e^{-\frac{d_N}{\xi_N}}$$



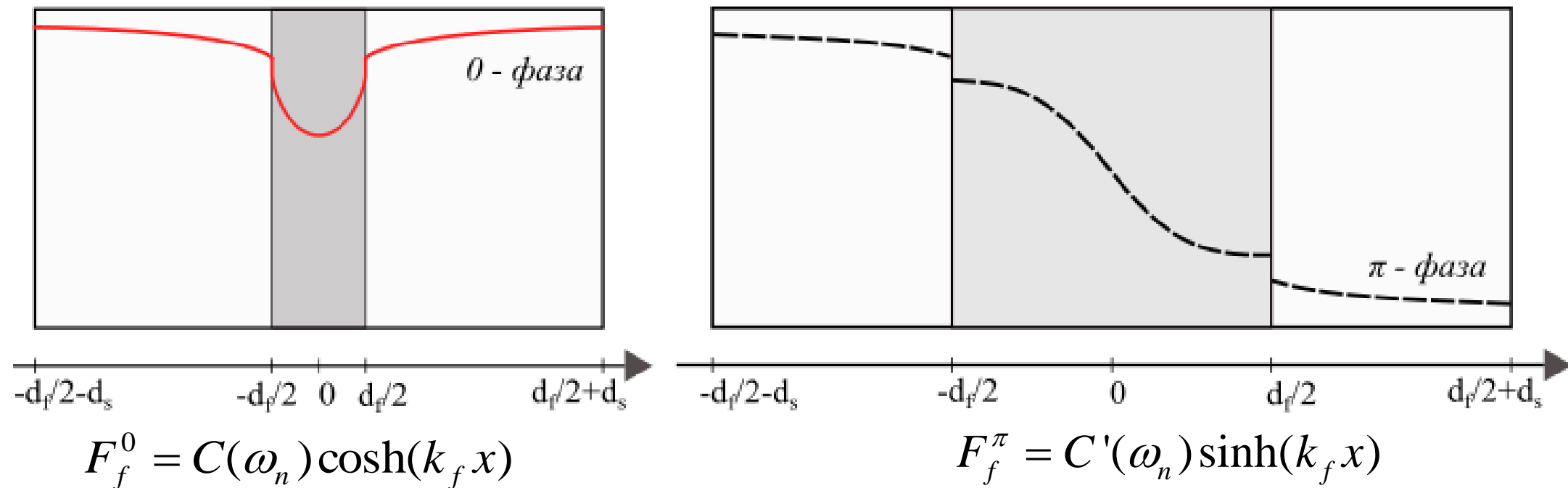
Схематичное поведение волновой функции на границе S/F

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

# S/F/S КАК ЕДИНИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ



# МОДЕЛЬ



**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  $T_s$

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

+

граничные 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 **одномоновом** приближении решение уравнения находится в виде:

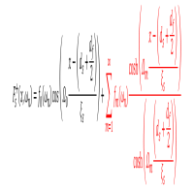
$$F_s^+(x, \omega_n) = f(\omega_n) \cos\left(\Omega \frac{x}{\xi_s}\right)$$

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

Обычно используется одномодовый метод

\* Y. V. Fominov, N. M. Chtchelkatchev, and A. A. Golubov,  
Phys. Rev. B 66, 014507 (2002).





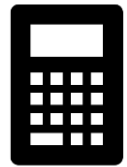
# МУЛЬТИМОДОВАЯ АППРОКСИМАЦИЯ (MULTIMODE APPROXIMATION)\*

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

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

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

\* Y. V. Fominov, N. M. Chtchelkatchev, and A. A. Golubov, Phys. Rev. B 66, 014507 (2002).



# РЕЗУЛЬТАТЫ

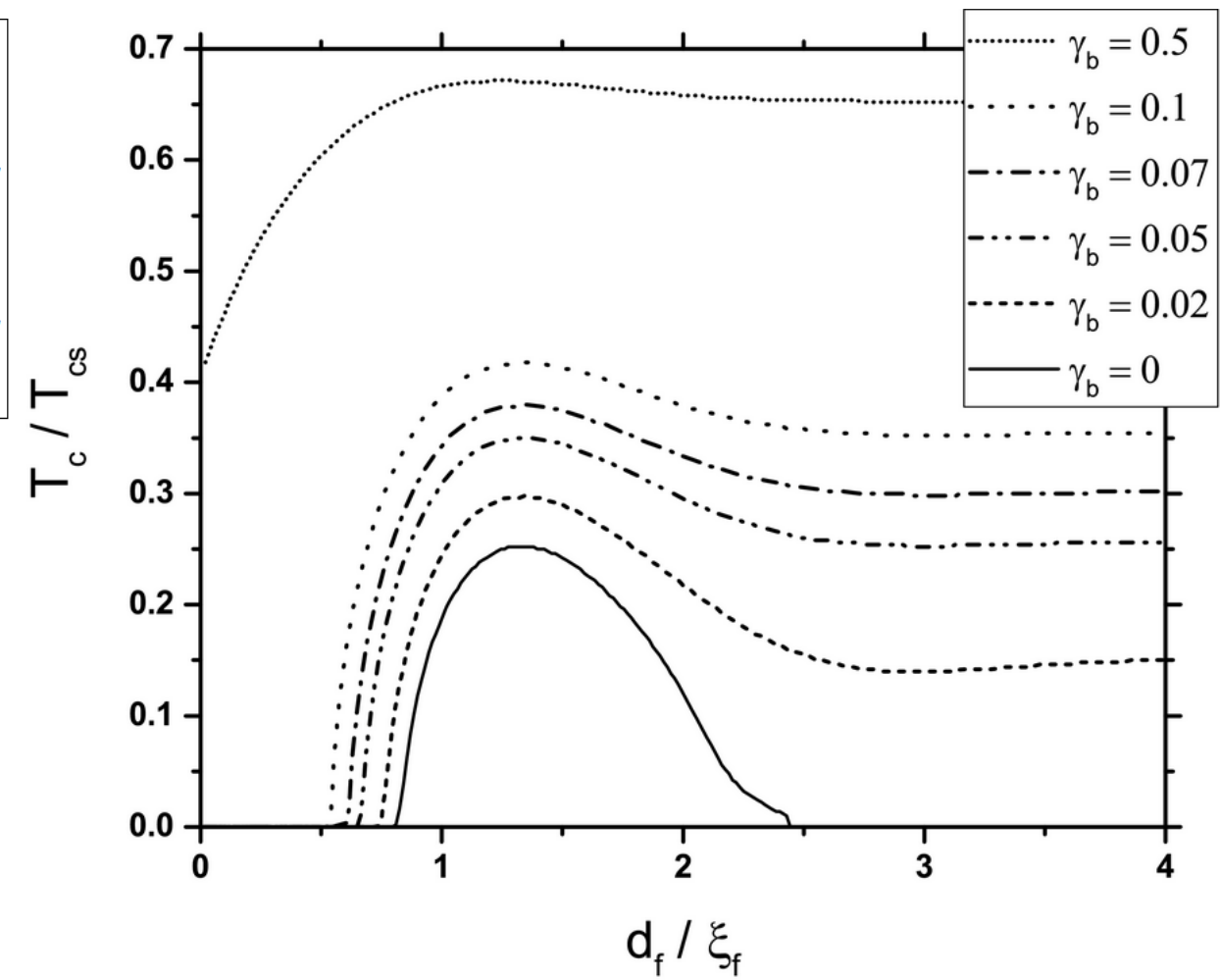
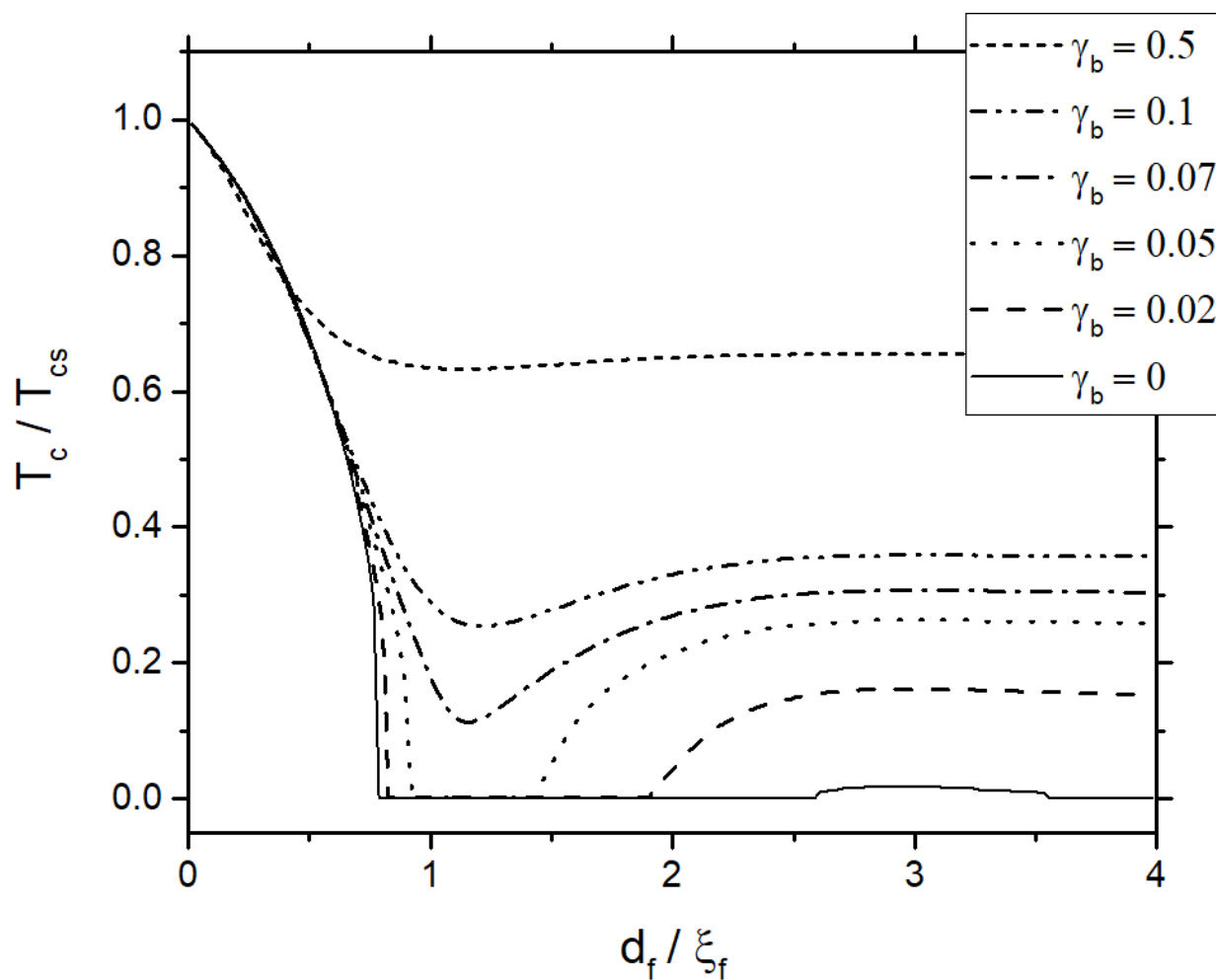


График зависимости критической температуры сверхпроводника от толщины ферромагнитного слоя для  $\pi$  - состояния (справа) и для 0 - состояния (слева).

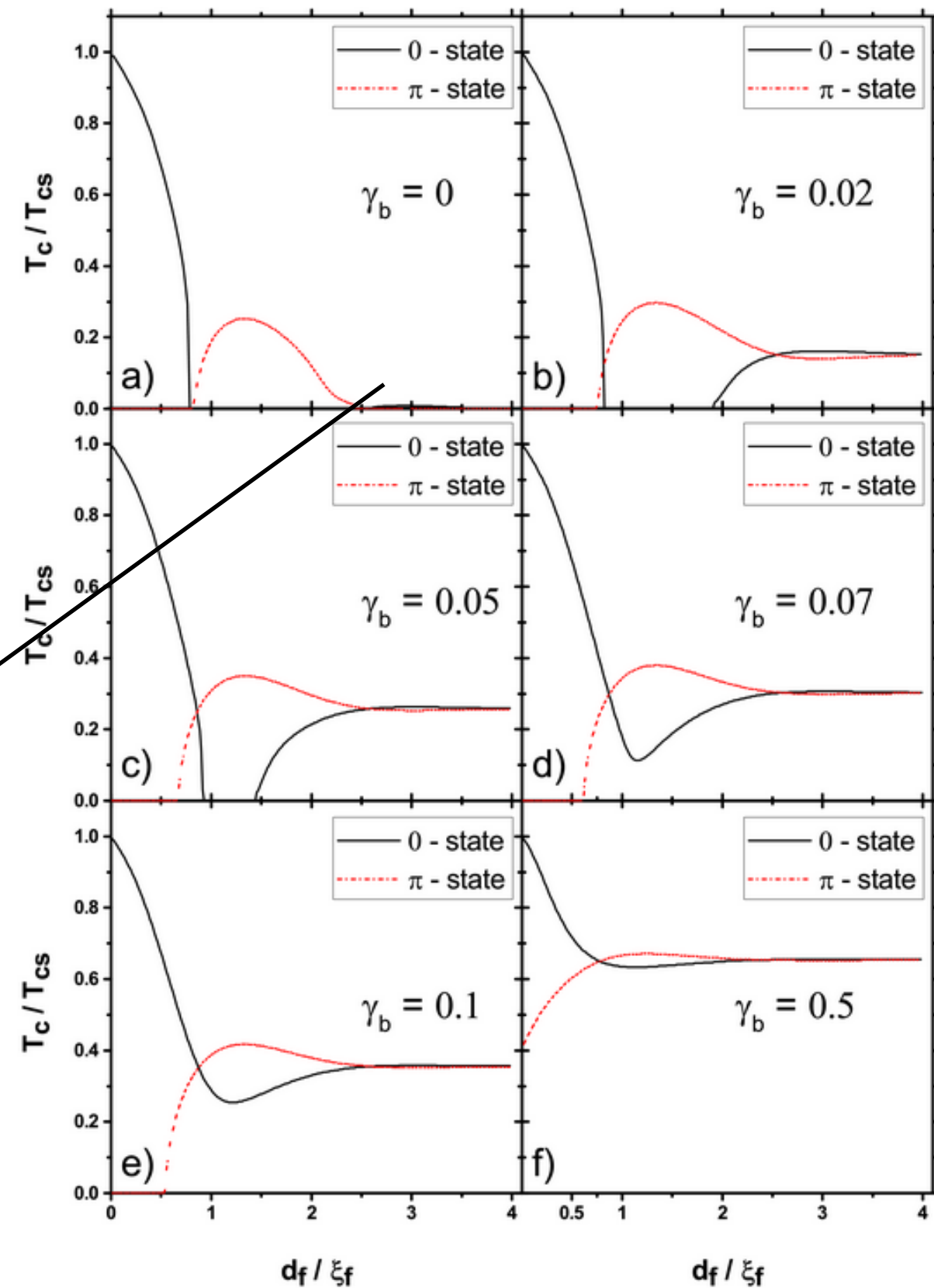
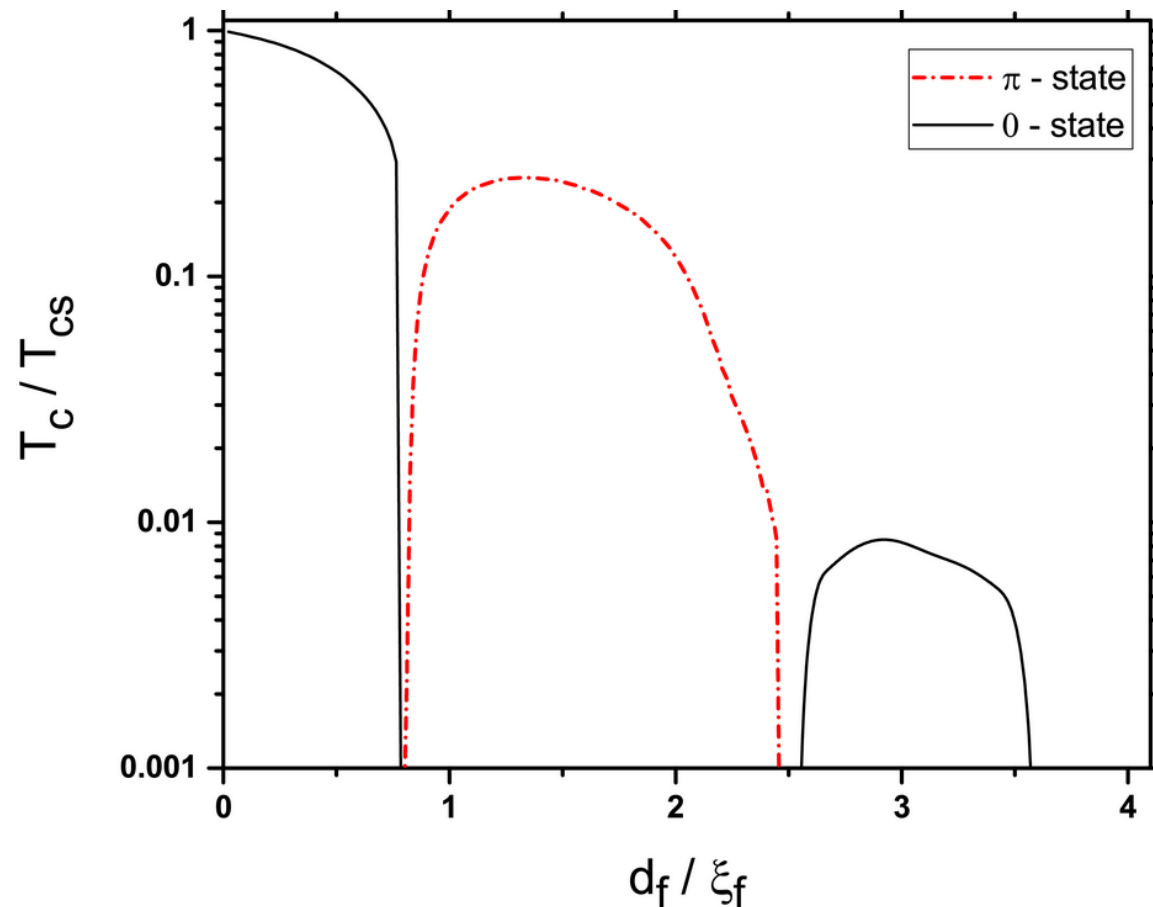
$\gamma_b$  - параметр пропорциональный сопротивлению на переходе S/F

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

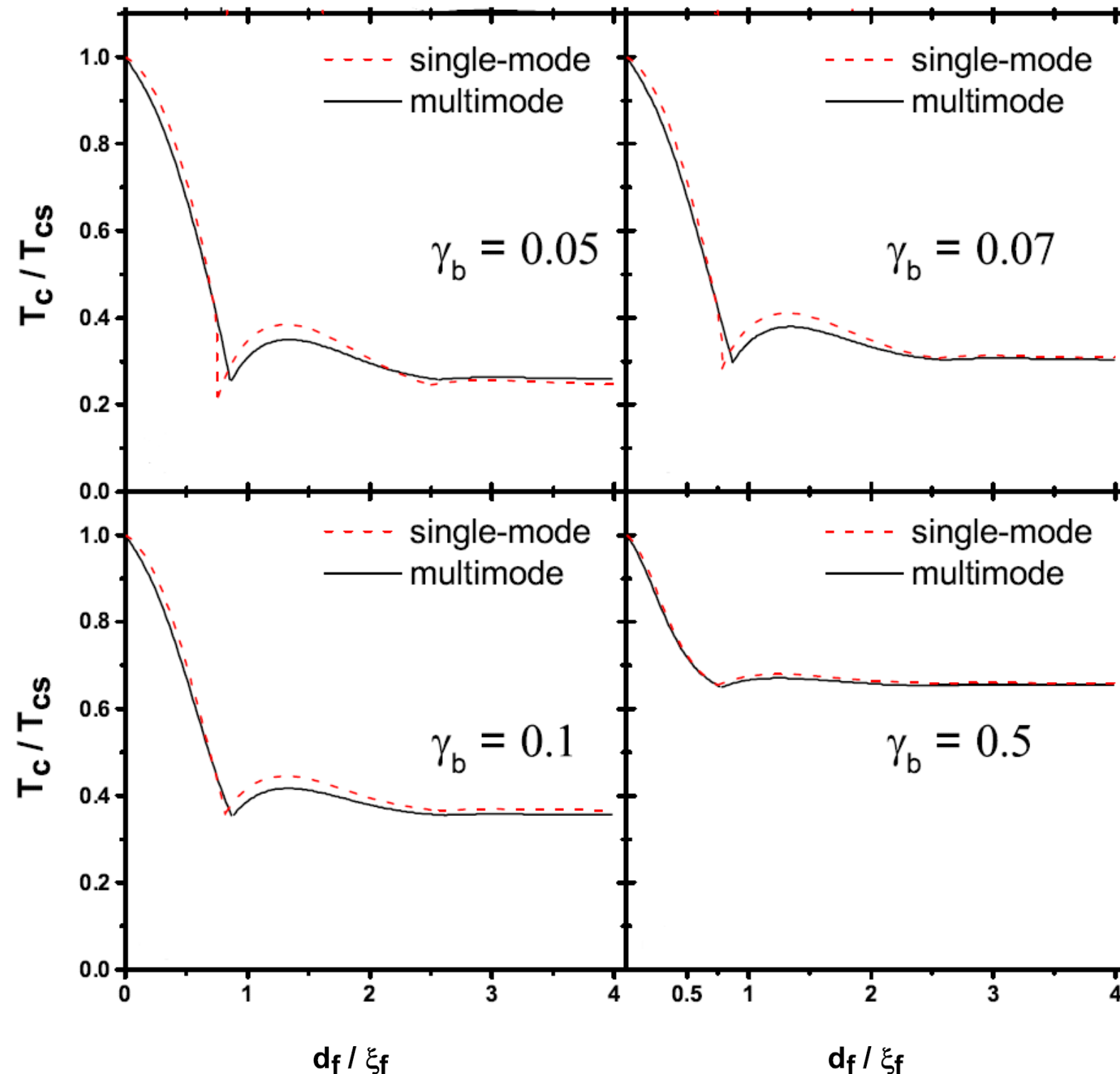
# Зависимость $T_c(d_f)$ в S/F/S структуре

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

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



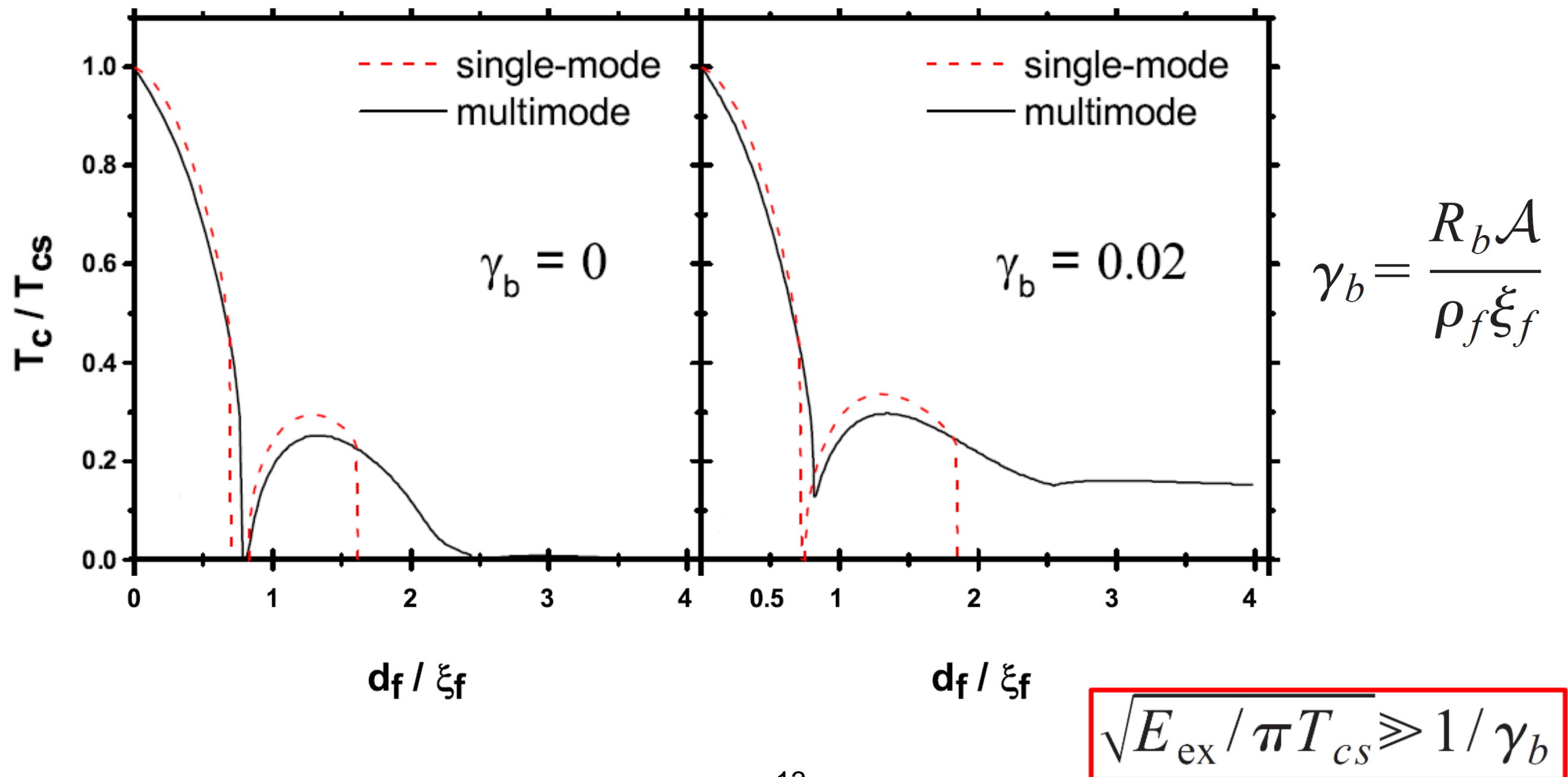
# Сравнение SMA и MMA методов



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

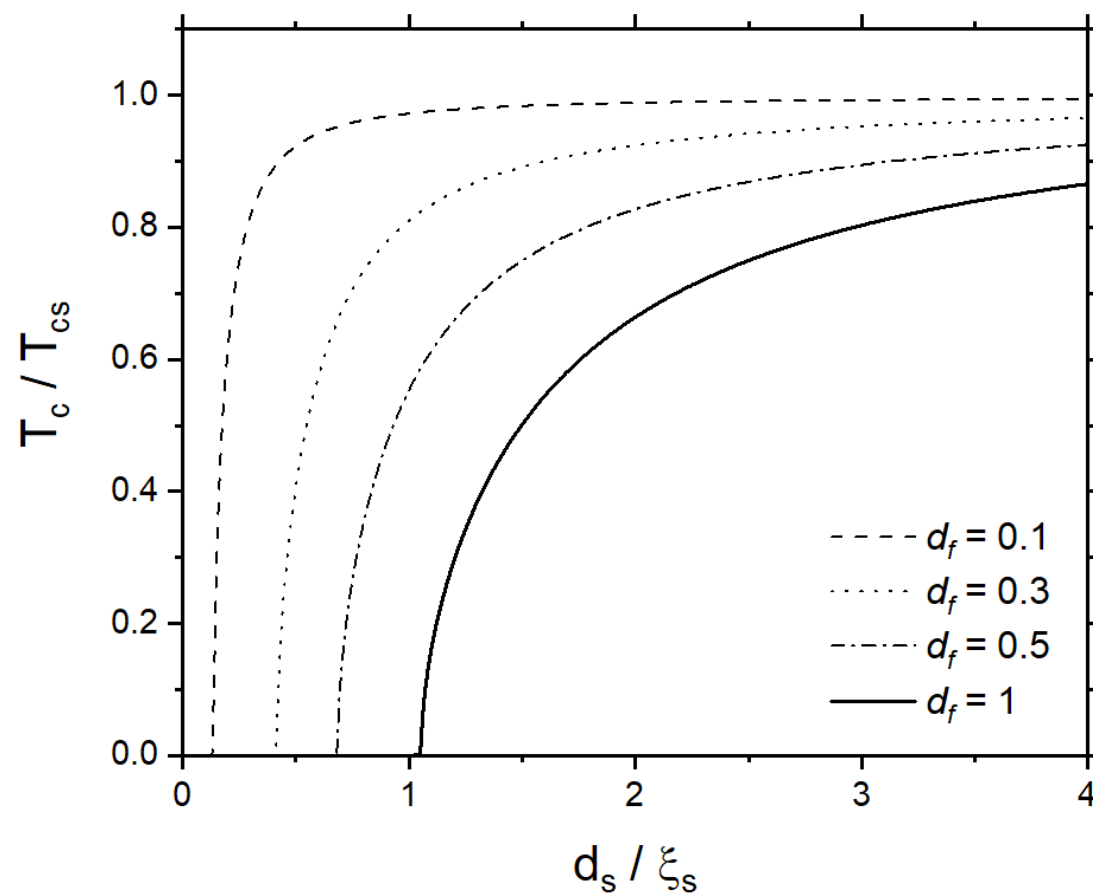
$$\sqrt{E_{ex} / \pi T_{cs}} \geq 1 / \gamma_b$$

# Сравнение SMA и MMA методов

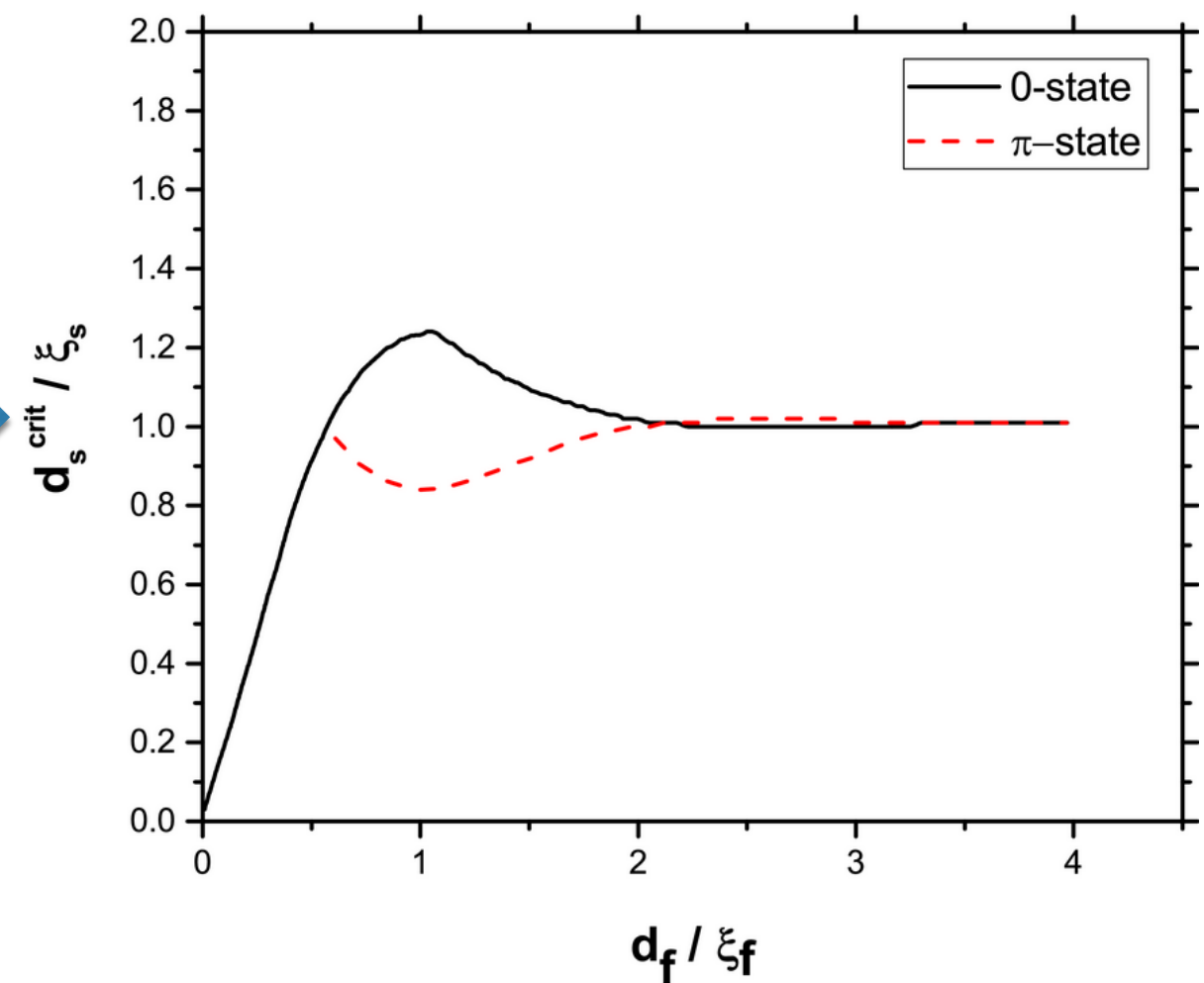


# Критическая толщина сверхпроводника $d_s^{crit}$

Кривые  $T_c(d_s)$  для различных  $d_f$



Критическая толщина сверхпроводника при 0 и  $\pi$  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