

Летняя научная школа  
“Нанофизика низких температур”

Фонд  
Дмитрия Зимина  
«ДИНАСТИЯ»

**Валерий Рязанов**

*Заведующий лабораторией сверхпроводимости  
Института физики твердого тела РАН*

**Вт. 21 августа 2007, 16:30 - 18:00**

***Гибридные структуры сверхпроводник-металл***

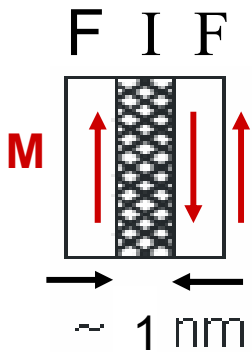
Лекция 2

# План лекции

- Андреевское отражение на FS-границе раздела
- Кросс-андреевское отражение и ко-туннелирование
- $\pi$ -контакты-джозефсоновские переходы с инверсией разности сверхпроводящих фаз
- Мезоскопический SNS  $\pi$ -контакт
- Осцилляции параметра порядка вблизи SF-границы
- Джозефсоновские SFS  $\pi$ -контакты
- Периодическая зависимость крит тока от толщины F
- Возвратная температурная зависимость крит тока
- Спонтанный магнитный поток в сетках  $\pi$ -контактов
- Возможные приложения  $\pi$ -контактов

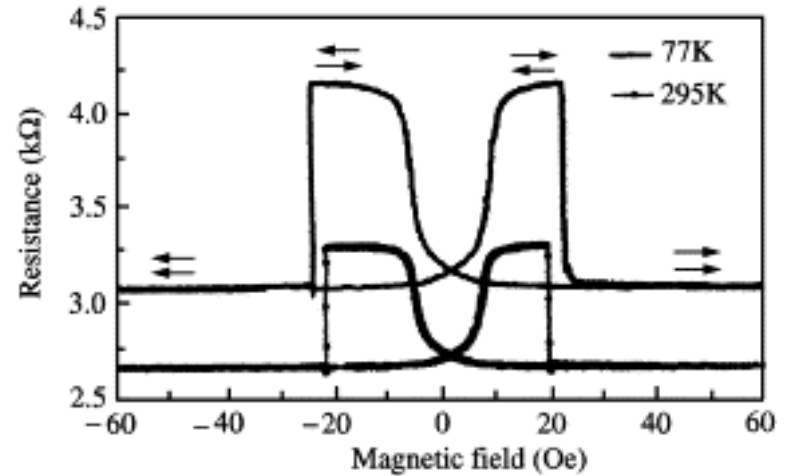
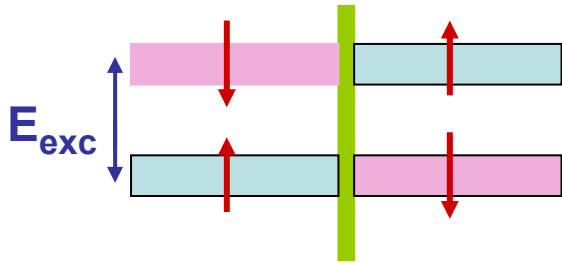
# Обменное зонное расщепление. Эффект гигантского магнетосопротивления в туннельных FIF контактах

Магнитный туннельный переход



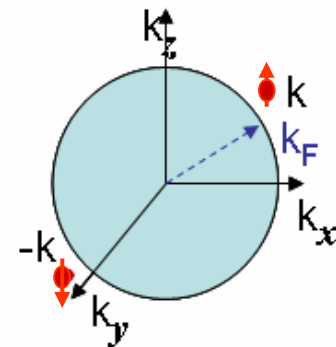
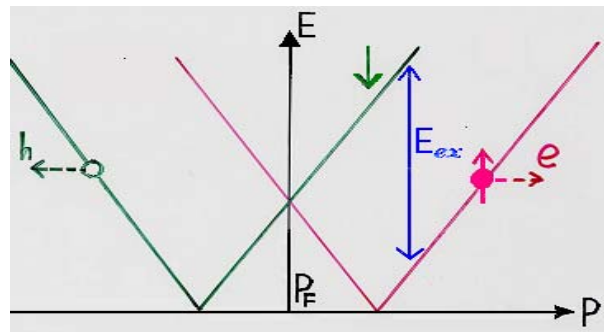
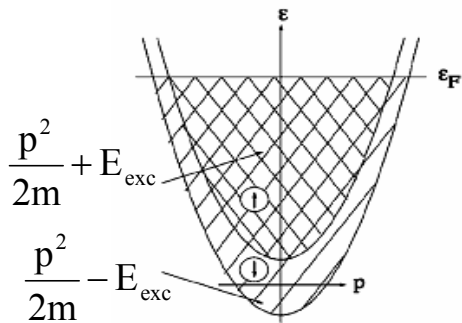
Giant magnetoresistance

GMR (TMR) -effect

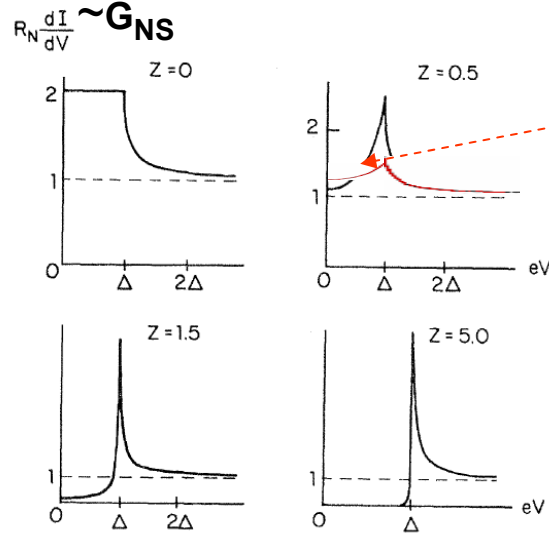
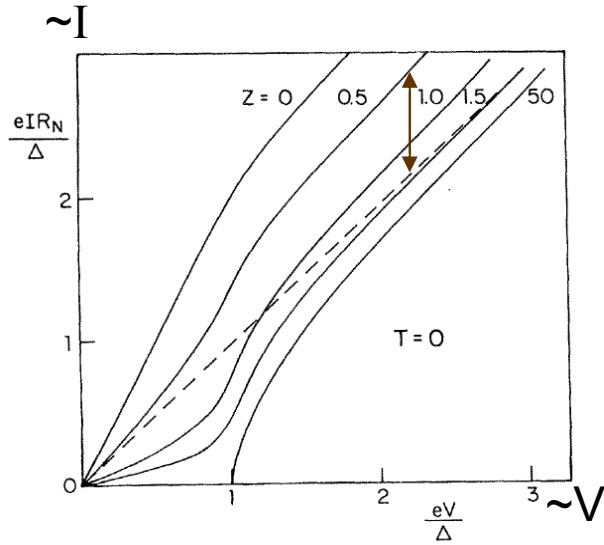


Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ni<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>

## Подавление андреевского отражения на FS-границе

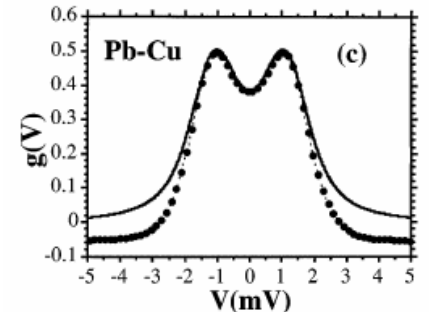
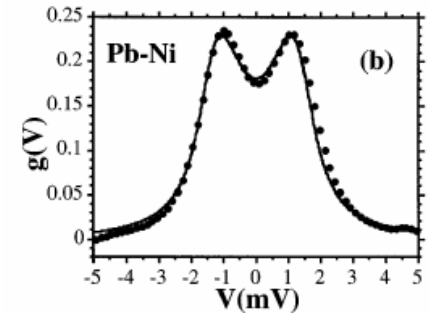
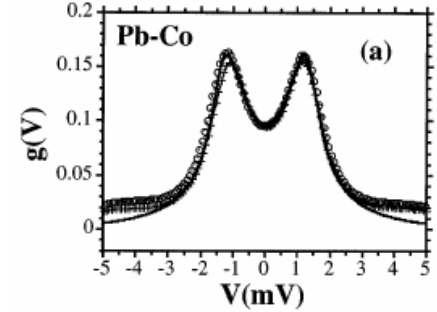


# Измерение спиновой поляризации с помощью SF-контактов



$$I_{NS}(E)dE \sim [1+A(E)-R] dE$$

$$A \rightarrow A(1-P)$$



Upadhyay et al, PRL **81**, 3247 (1998)

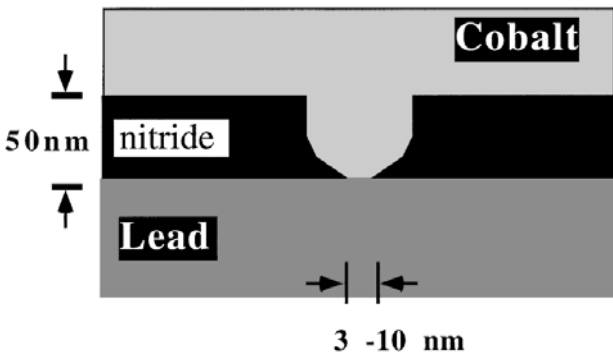
$$g(V) = \frac{G_{FS}(V) - G_{FN}(V)}{G_{FN}(0)}$$

$$P = (I_{\uparrow} - I_{\downarrow}) / (I_{\uparrow} + I_{\downarrow})$$

Co:  $0.37 \pm 0.02$

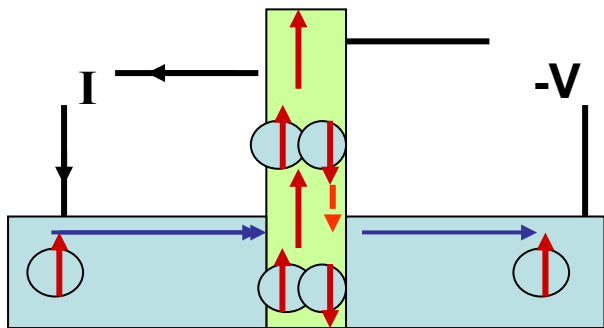
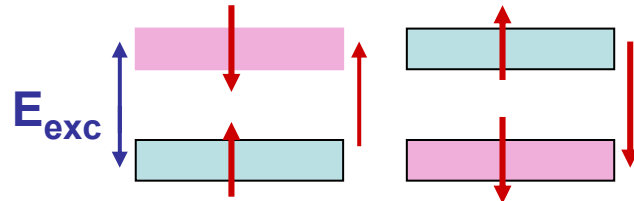
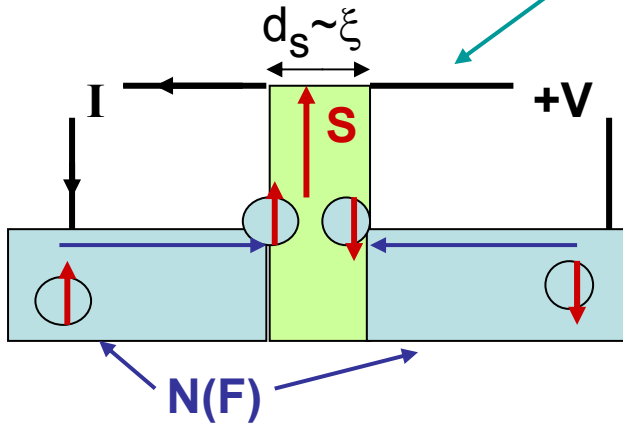
Ni:  $0.32 \pm 0.02$

(Fe  $\sim 0.45$ )

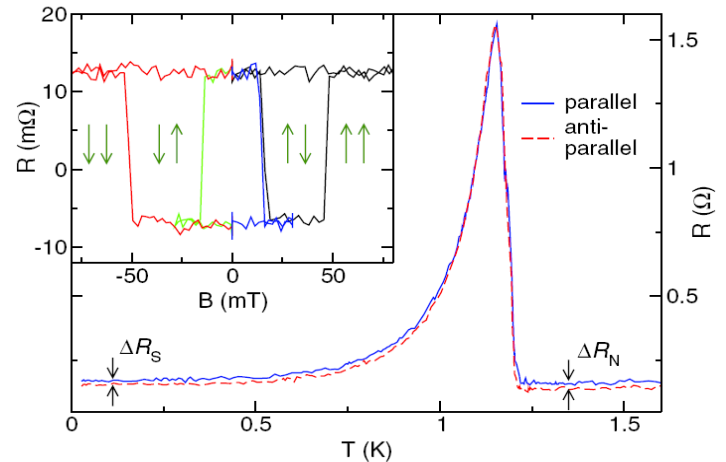
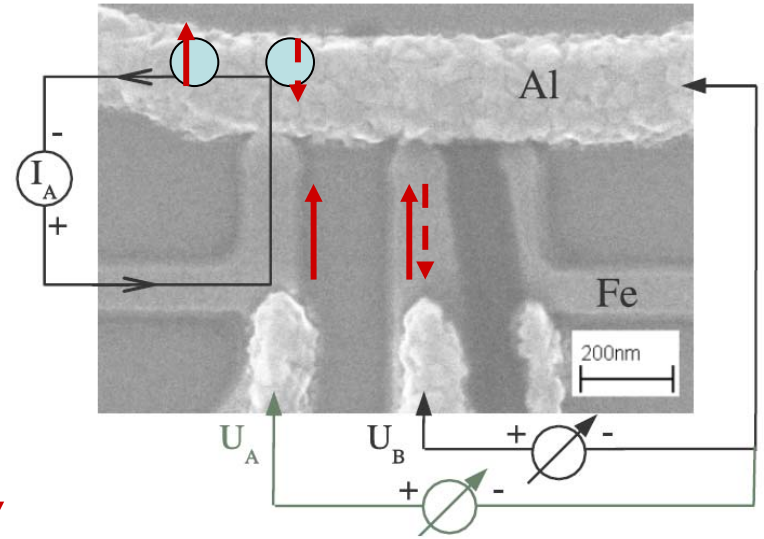


# Нелокальное кросс-андреевское отражение

Beckmann, Weber, Loehneysen, PRL **93**, 197003 (2004)

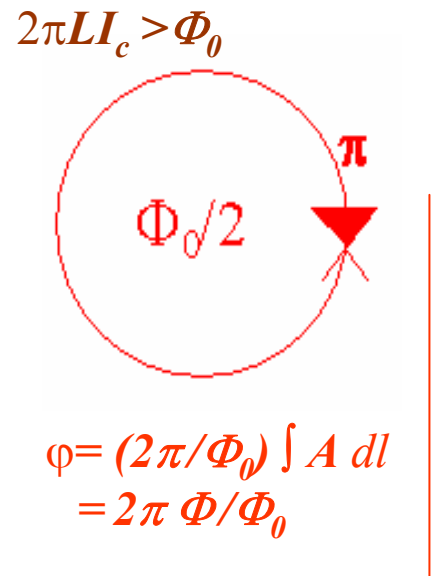
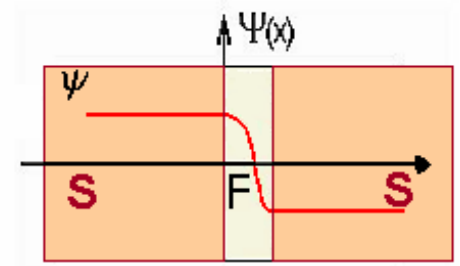


упругое ко-туннелирование



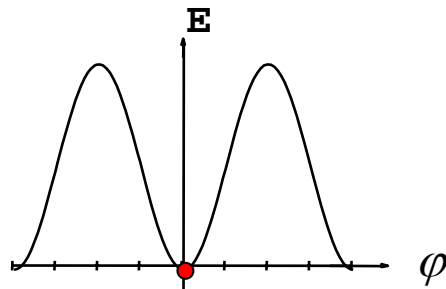
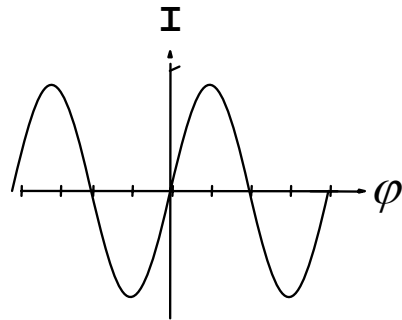
# π-КОНТАКТЫ

Булаевский, Кузий, Собянин, 1977



**0-контакт**  
минимум энергии при 0

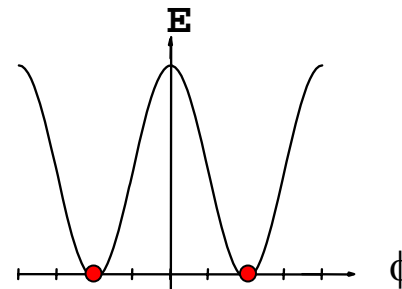
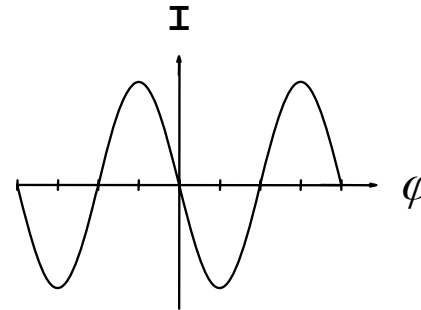
$$I_s(\varphi) = I_c \sin \varphi$$



$$E = E_J [1 - \cos(\varphi)]$$

**π-контакт**  
минимум энергии при π

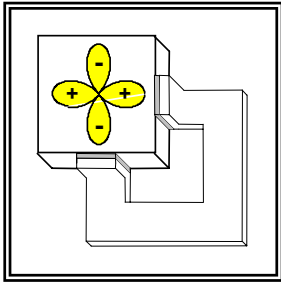
$$I_s(\varphi) = I_c \sin(\varphi + \pi) = -I_c \sin \varphi$$



$$E = E_J [1 - \cos(\pi + \varphi)] = E_J [1 + \cos \varphi]$$

*В кольцах с π-контактами возникают двукратно-вырожденные состояния*

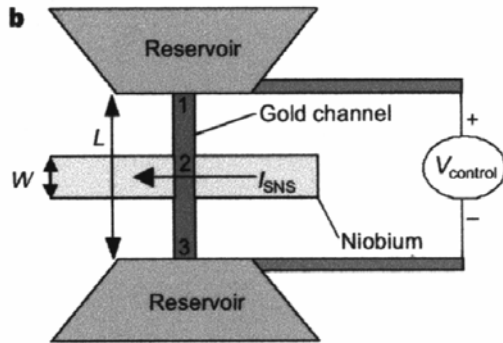
# Типы $\pi$ - контактов



d-wave  
**HTSC**

**Experiment:** Van Harlingen et al., 1993

**Theory:** Geshkenbein et al., 1987

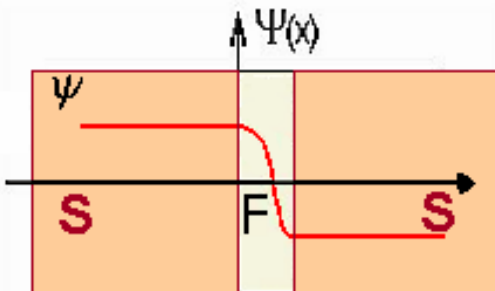


Мезоскопические  
SNS переходы

**Experiment:** Klapwijk et al., 1999

**Theory:** Volkov 1995

**Wilhelm et al., 1998**



SFS переходы

**Exper.:** V.R. et al., 2000

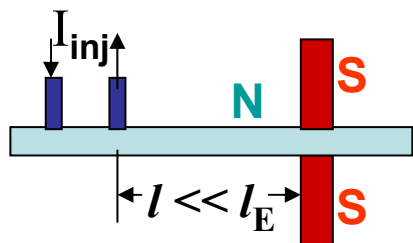
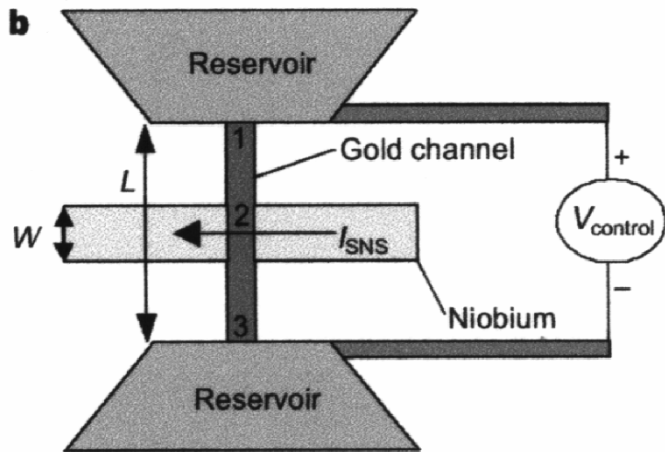
**Theory:**

**Buzdin, Bulaevsky et al., 1982**

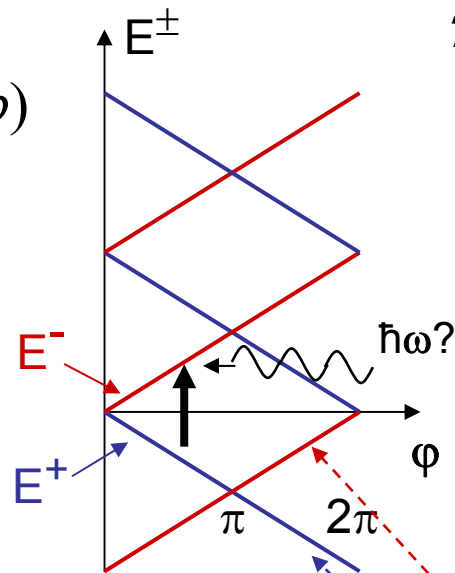
# Мезоскопические SNS $\pi$ -контакты

Baselmans et al эксперимент (Nature 397, 43, 1999)

$$E^{\pm} = \frac{\hbar v_F}{2d_n} \left( 2\pi n + 2 \arccos \frac{E}{\Delta} \mp \varphi \right)$$

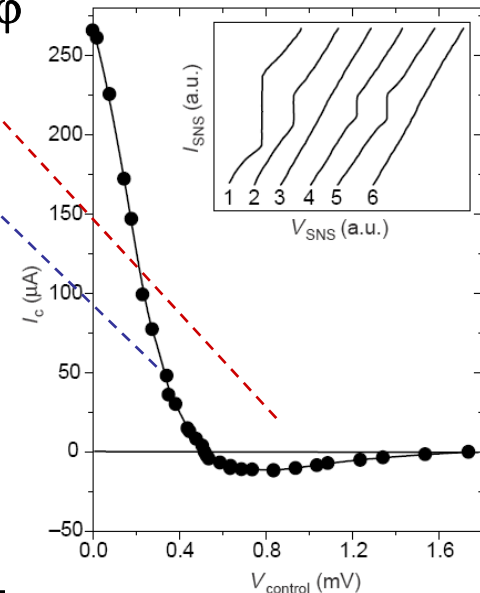


$$I_C \sin \varphi \rightarrow -I_C \sin \varphi = I_C \sin(\varphi + \pi)$$



**Theory: Volkov 1995**  
**Wilhelm et al., 1998**

$$j_s \sim -\frac{\varphi}{d_n}$$





# Неоднородные состояния в магнитных сверхпроводниках

A.I.Buzdin. Rev. Mod. Phys. 77 (2005) 1321

LOFF-состояния: Ларкин, Овчинников (1964)

Fulde, Ferrel (1964)

*Однородное состояние:*  $F = a |\Psi|^2 + \gamma |\nabla\Psi|^2 + (b/2) |\Psi|^4$

однородный равновесный параметр порядка  $|\Psi|^2 = -a/b$

*Учет парамагнитных эффектов* за счет  $H, E_{ex}$  (распаривание  $\sim \mu_B H$ )

При больших  $E_{ex}/T$  коэффициент  $\gamma$  — отрицателен, т.е. градиенты пар. порядка выгодны!

Необходим учет следующих членов в разложении:

$$F = \dots + (\eta(H, T)/2) |\nabla^2\Psi|^2$$

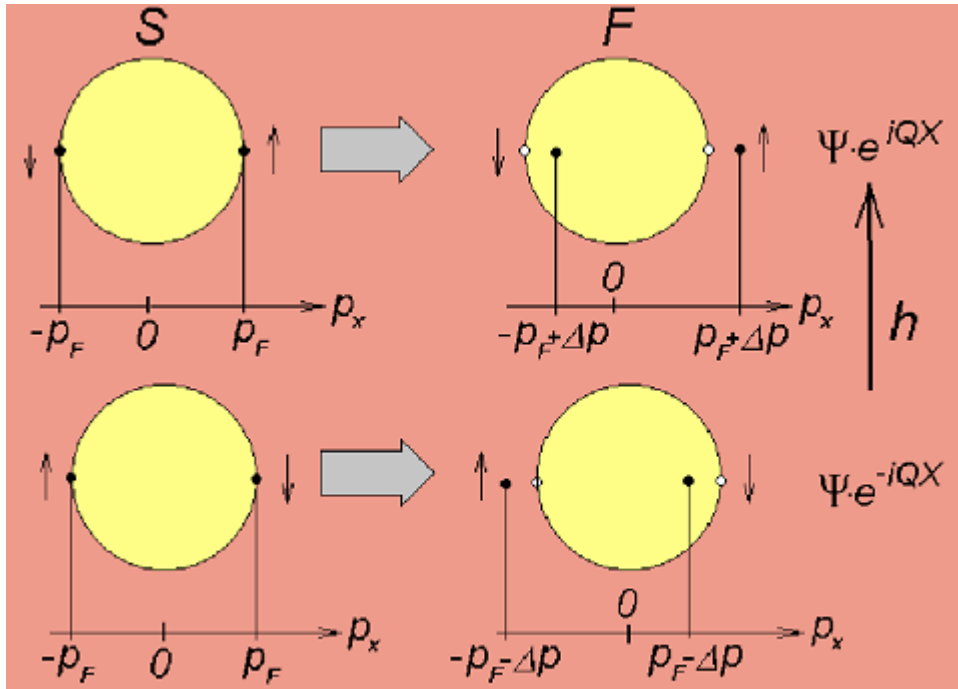
Минимизация дает **неоднородное** состояние с  $\Psi = \Psi_0 \exp(iQr)$ ,

где  $Q$  — волновой вектор, **ненулевой импульс пары** (в чистом пределе)

$$a\Psi - \gamma \Delta\Psi + (\eta/2) \Delta^2\Psi = 0 \quad a = -\gamma Q^2 - (\eta/2)Q^4$$

$$a = \alpha(T_{ci} - T_{cu}) = \gamma^2/(2\eta) \text{ для максимальной } T_{ci}$$

# Спаривание с ненулевым импульсом вблизи SF-границы



Чистый предел

$Q \neq 0$  – импульс центра масс пар

$$p'^2/2m - p^2/2m = p_F Q/m = E_{ex};$$

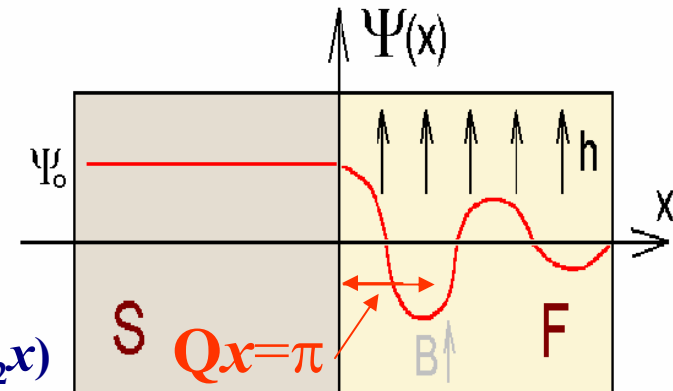
$$Q \sim E_{ex} / v_F$$

$$\Psi(x) = \Psi_0 (e^{i2Qx} + e^{-i2Qx})/2 =$$

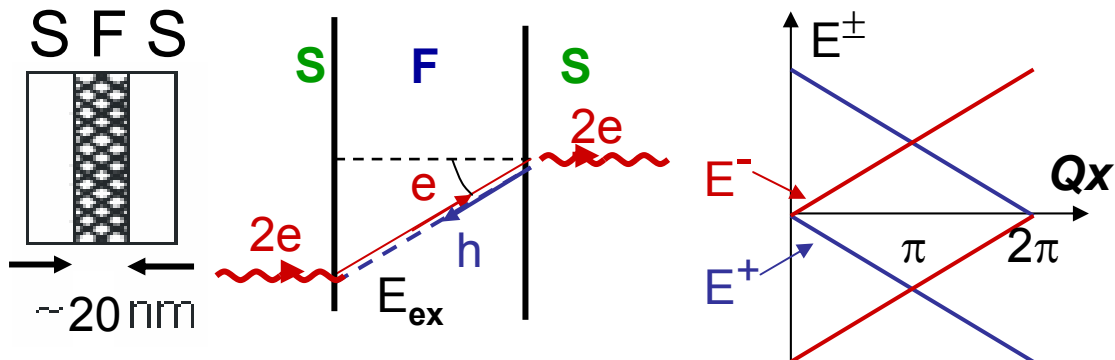
$$= \Psi_0 \text{Cos}(2Qx)$$

$$\alpha \Psi - \gamma \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\eta}{2} \frac{\partial^4 \Psi}{\partial x^4} = 0 \quad (\text{“ГЛ-3” для 1D})$$

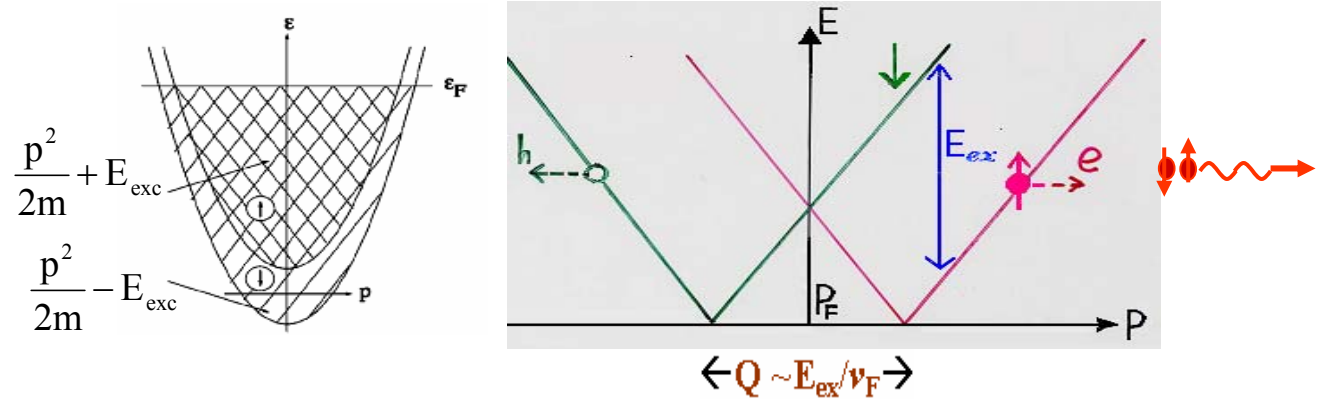
$$\Psi(x) \sim \exp(-k_1 x) \cos(-k_2 x)$$



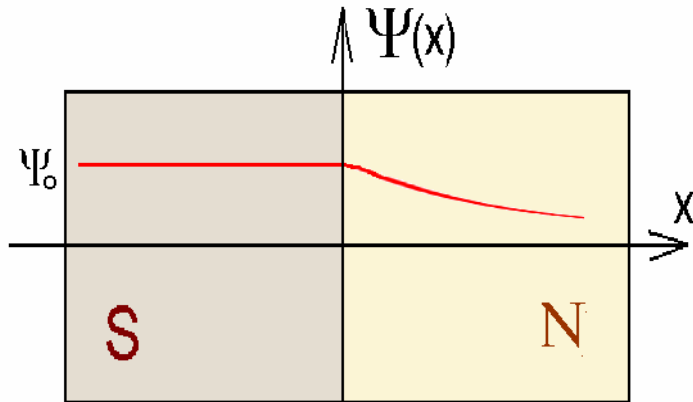
# Андреевские уровни в SFS переходе



$$E^\pm = \frac{\hbar v_F}{2d_n} (2\pi n + 2 \arccos \frac{E}{\Delta} \mp \varphi + Qx)$$



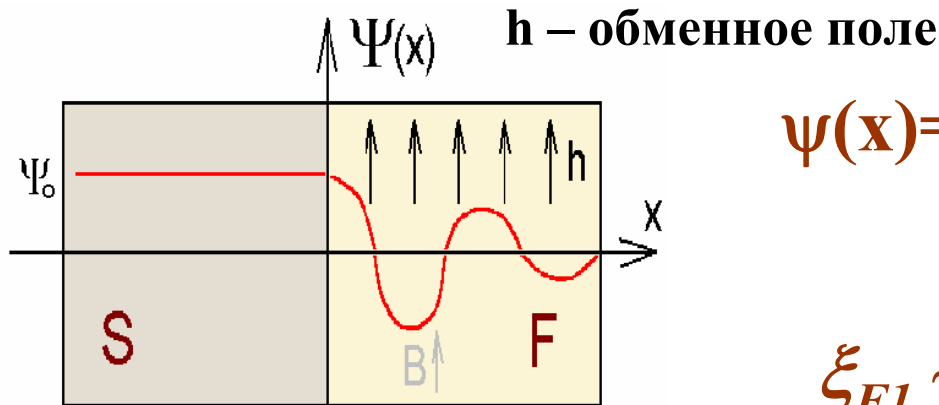
## Эффект близости в SF-структурах



$$\psi(x) = \psi_0 \exp(-kx) = \psi_0 \exp(-x/\xi_N)$$

Время распаривания  $\tau \sim \hbar/k_B T$

$$\xi_N \sim (D\tau)^{1/2} \sim (\hbar D/k_B T)^{1/2}$$



$$\psi(x) = \psi_0 \exp(-x/\xi_{F1}) \cos(x/\xi_{F2})$$

$$\tau \sim \hbar/E_{ex}, \quad (E_{ex} \gg k_B T)$$

$$\xi_{F1} \sim (\hbar D/E_{ex})^{1/2}$$

Буздин, Булаевский, Панюков *Письма в ЖЭТФ* 35 147 (1982)

Буздин, Вуйчич, Куприянов *ЖЭТФ* 101 231 (1992)

# Комплексная длина когерентности Период пространственных осцилляций

## SN-граница

$$\psi(x) \sim \exp(-k_N x),$$

$$k_N = 1/\xi_N -$$

– действительная

## Диффузный случай

$$\xi_N = [\hbar D / (2\pi k_B T)]^{1/2}$$

## SF-граница

$$\psi(x) \sim \exp(-k_F x),$$

$k_F$  – комплексная!

$$k_F = k_{F1} + i Q$$

$$Q \sim E_{ex} / v_F \text{ (чистый сл.)}$$

$\xi_F = 1/k_F$  – комплексная длина когерентности

---


$$\xi_F = (\hbar D / i E_{ex})^{1/2} \quad (E_{ex} \gg k_B T)$$

---

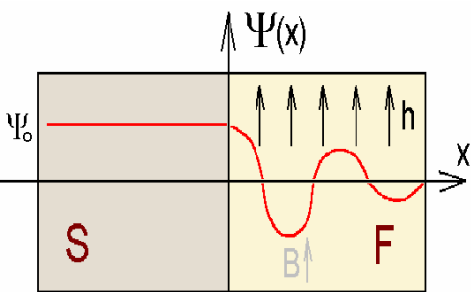

$$\psi(x) \sim \exp(-x/\xi_F) \sim \exp(-x/\xi_{F1}) \cos(-ix/\xi_{F2})$$

$\xi_{F1}$  – длина затухания,

$\lambda_{ex} = 2\pi\xi_{F2}$  – период пространственных осцилляций

Co, Fe, Ni:  $\xi_{F1} = \xi_{F2} = (\hbar D / E_{ex})^{1/2} < 1 \text{ nm}$

# Зависимость критического тока от толщины F-слоя



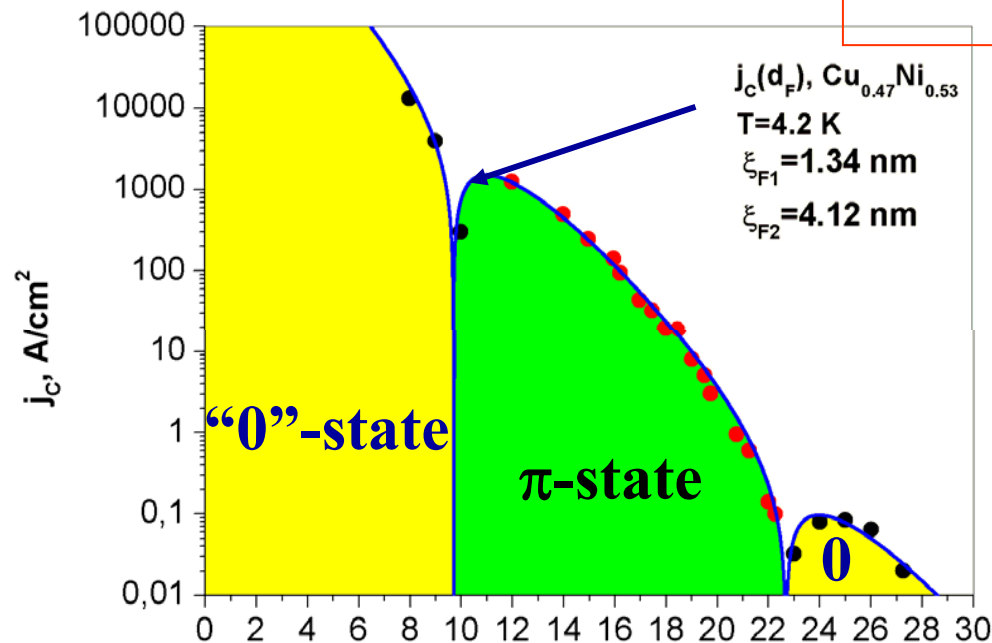
$$j_c = j_{c0} \exp(-d_F / \xi_{F1}) \left| \cos(d_F / \xi_{F2}) + (\xi_{F1} / \xi_{F2}) \sin(d_F / \xi_{F2}) \right|$$

при  $d_F \gg \xi_{F1}$ ;  $\xi_{F2} > \xi_{F1}$

**Nb-Cu<sub>0.47</sub>Ni<sub>0.53</sub>-Nb**

Oboznov et al, PRL 96, 197003 (2006)

$$\lambda_{ex} = 2\pi\xi_{F2}$$



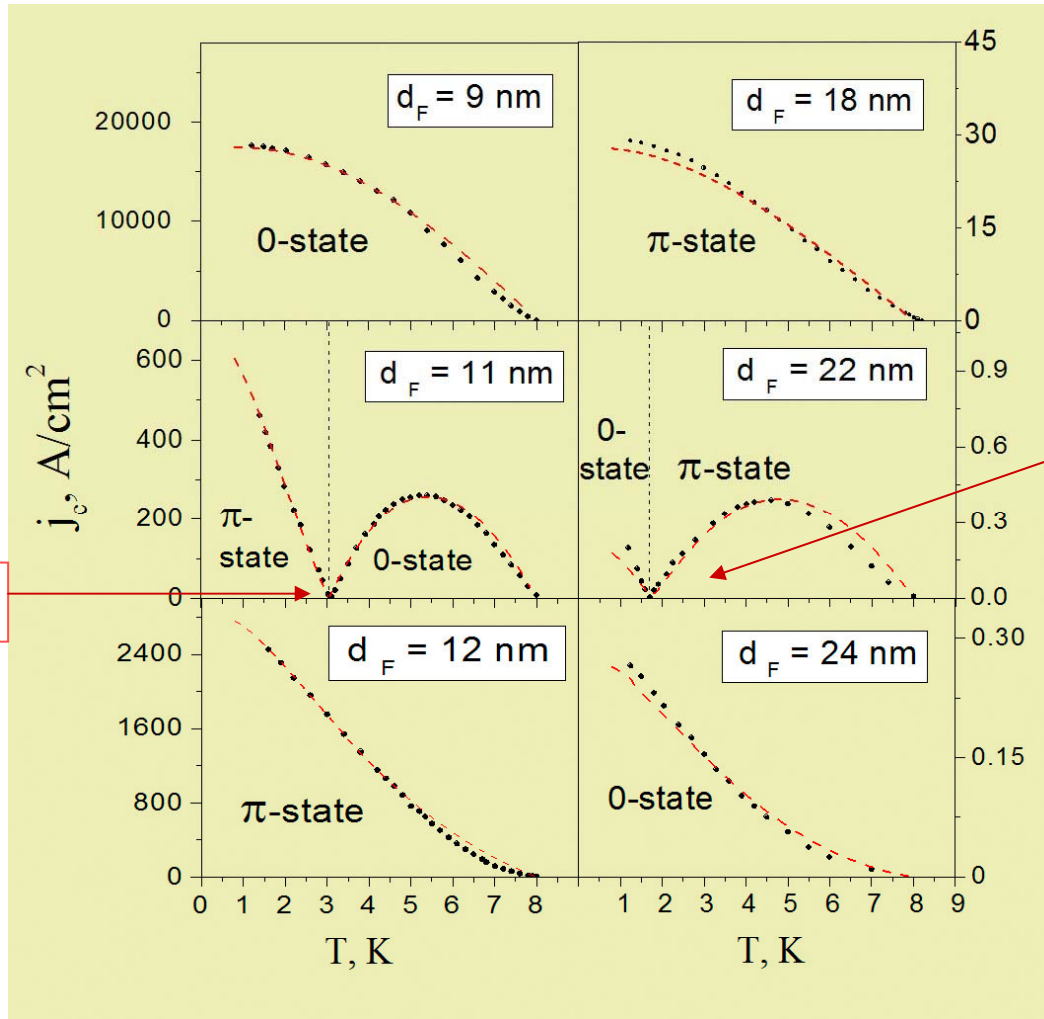
**“0”-state**  
 $I = I_c \sin\varphi$

**$\pi$ -state**

**“0”-state**  
 $I = I_c \sin\varphi$

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

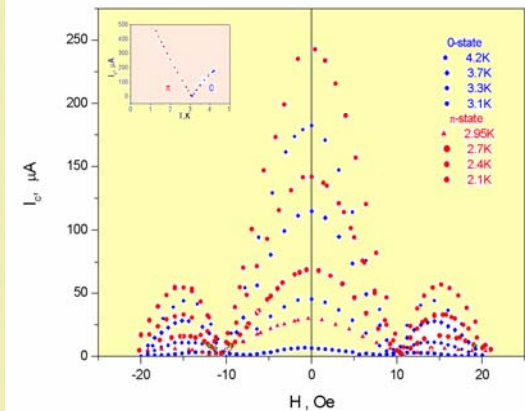
# Зависимость критического тока от температуры



**Nb-Cu<sub>0.47</sub>Ni<sub>0.53</sub>-Nb**  
**d<sub>F1</sub> = 10-11 nm**  
**d<sub>F2</sub> = 22 nm**

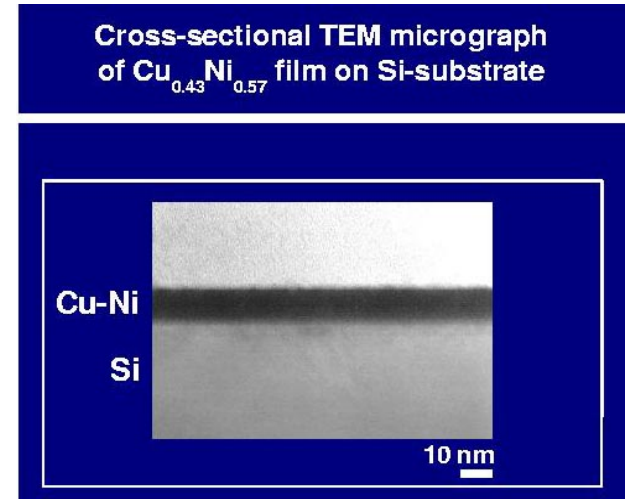
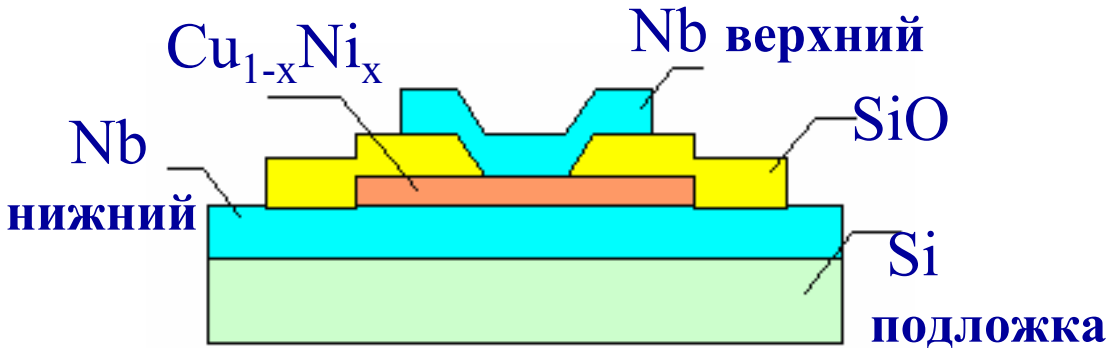
**pi-0-переход**

**0- pi-переход**



Oboznov, Bolginov, Feofanov, Ryazanov, and Buzdin, PRL 96, 197003 (2006)

# SFS слабые связи со слабыми ферромагнетиками



$x=0.52-0.57$ ;  $T_{\text{Кюри}}=20-150$  К;  $d_F=15-30$  nm;

*Комплексная длина когерентности в ферромагнетике при  $E_{ex} \sim k_B T$*

$$\xi_F = \sqrt{\frac{\hbar D}{2(\pi k_B T + iE_{ex})}}$$

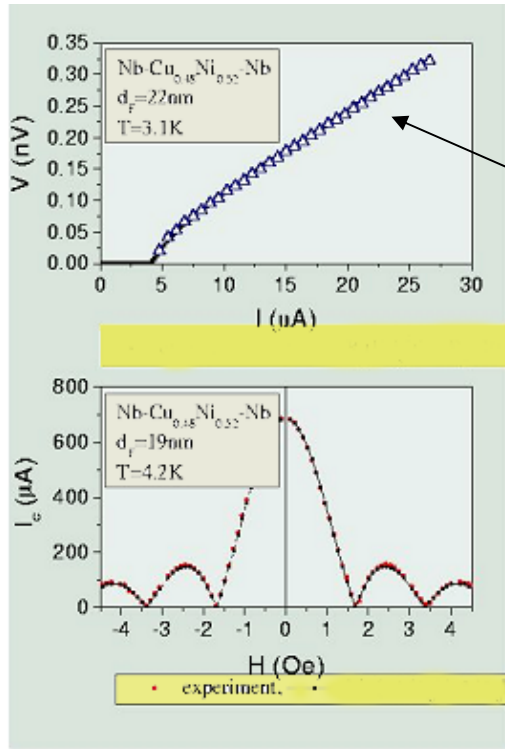
$$\xi_{F1} = \sqrt{\frac{\hbar D}{\sqrt{E_{ex}^2 + (\pi k_B T)^2} + \pi k_B T}}$$

$\xi_{F1}$  - характеристическая длина затухания  
 $2\pi\xi_{F2}$  - период осцилляций

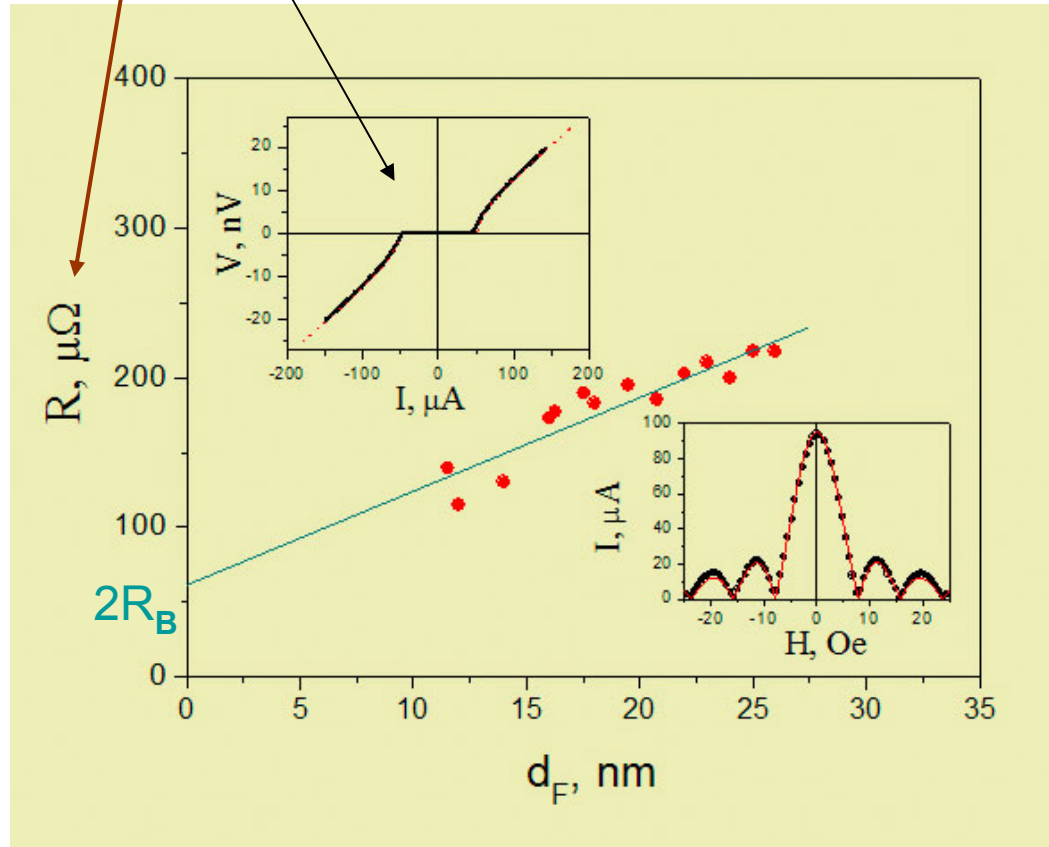
$$\xi_{F2} = \sqrt{\frac{\hbar D}{\sqrt{E_{ex}^2 + (\pi k_B T)^2} - \pi k_B T}}$$



# Характеристики SFS-переходов



$$V = R(I^2 - I_c^2)^{1/2}; \quad R \sim 10^{-4} \text{ Ом}$$

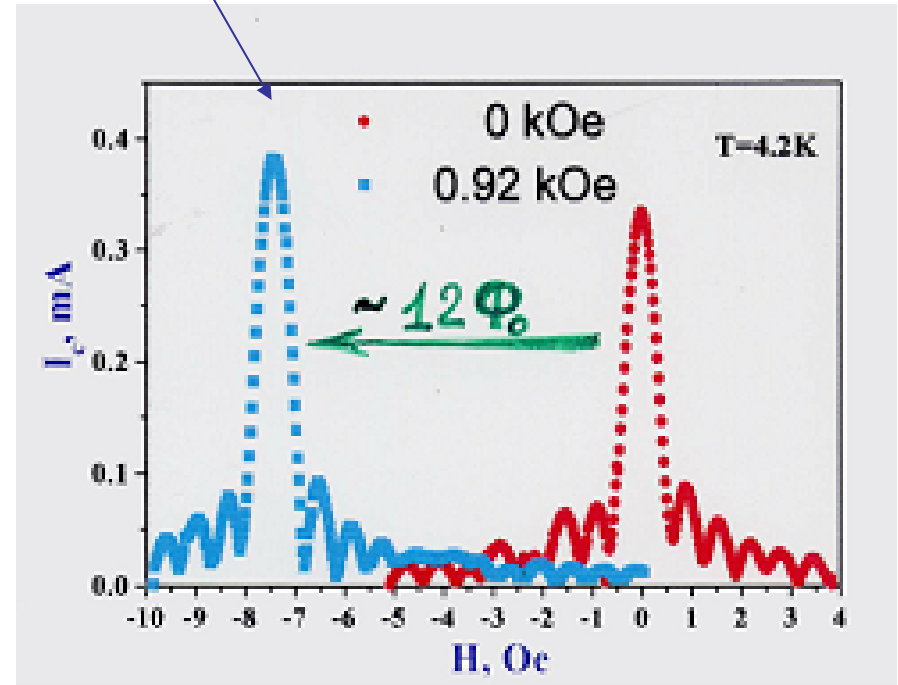
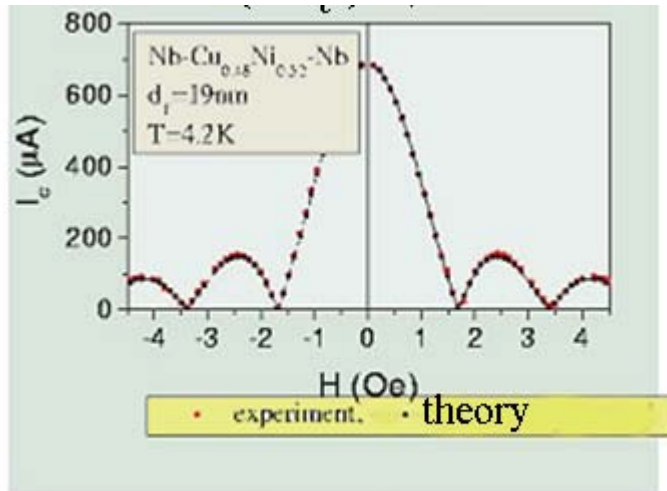


$$\gamma_B = 0.5$$

$$\gamma_B = (R_B S / (\rho_F \xi^*))$$

# Джозефсоновские характеристики (II)

После намагничивания



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

# Зависимость $\pi$ -0 перехода от величины обменной энергии ферромагнетика

V.R., Oboznov, Prokofiev et al, Journ. Low Temp. Phys. 136, 385 (2004)

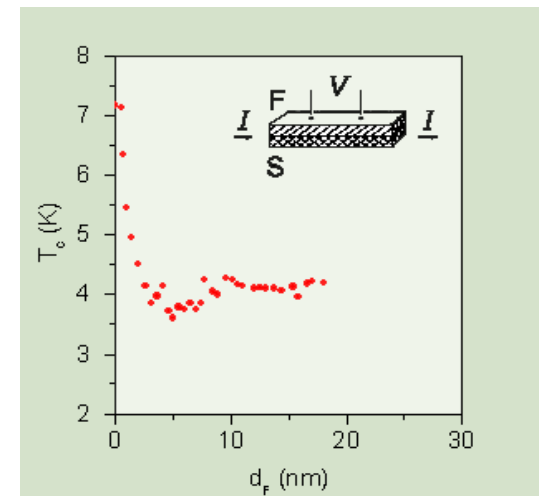
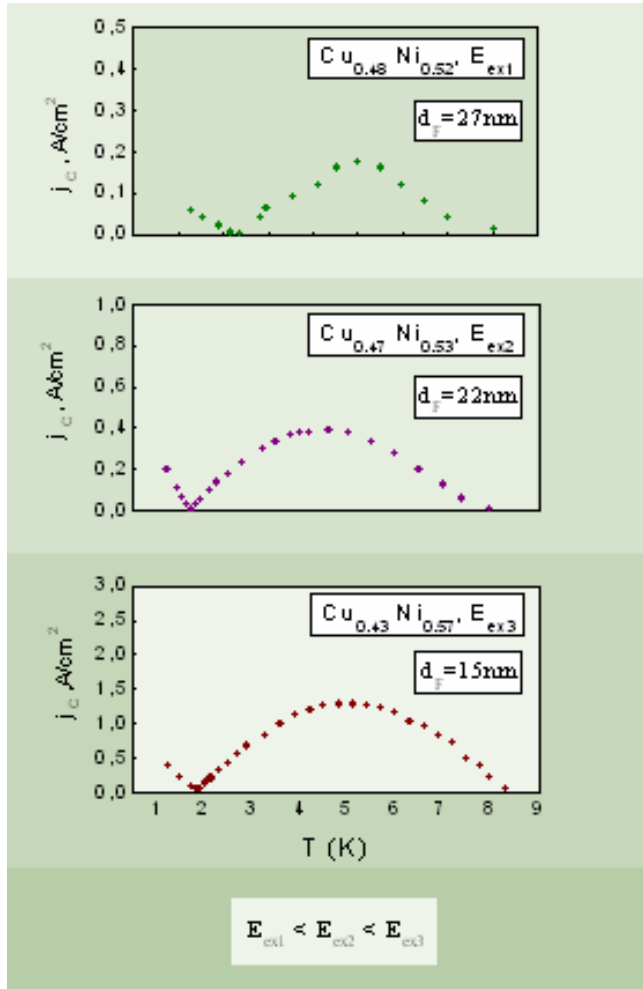
$$\xi_{F2} = (\hbar D / E_{ex})^{1/2}$$

$$d_{F,\pi2} \approx (7/8) \lambda_{ex} = (7/4) \pi (\hbar D / E_{ex})^{1/2}$$

Сравнение с результатами на SF-, бислоях

$$d_{F,\min} \approx \lambda_{ex} / 4$$

$$\lambda_{ex} \approx (8/7) d_{F,\pi2} \approx 17 \text{ нм}$$



# Температурная зависимость толщин 0-π-переходов (эксперимент и теория)

**Nb-Cu<sub>0.47</sub>Ni<sub>0.53</sub>-Nb**

**d<sub>F</sub>=9-24 nm**

**E<sub>ex</sub> ~ 850 К (T<sub>Curie</sub>= 70 К)**

?

$$\xi_{F1,2} = \sqrt{\frac{\hbar D}{\sqrt{(\pi k_B T)^2 + E_{ex}^2} \pm \pi k_B T}} \simeq \sqrt{\frac{\hbar D}{E_{ex}}} \left(1 \mp \frac{\pi k_B T}{2E_{ex}}\right)$$

ξ<sub>F</sub>

0.01

“Температурно-зависящее” рассеяние с переворотом спина

Buzdin in Oboznov et al, Phys. Rev. Lett. **96**, (2006).

$$1/\xi_{F1} = k_1 = \frac{1}{\xi_F} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{E_{ex}} + \frac{\hbar}{E_{ex}\tau_s}\right)^2} + \left(\frac{\omega}{E_{ex}} + \frac{\hbar}{E_{ex}\tau_s}\right)}$$

$$\xi_{F1} \approx 1.37 \text{ nm}$$

$$1/\xi_{F2} = k_2 = \frac{1}{\xi_F} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{E_{ex}} + \frac{\hbar}{E_{ex}\tau_s}\right)^2} - \left(\frac{\omega}{E_{ex}} + \frac{\hbar}{E_{ex}\tau_s}\right)}$$

$$\xi_{F2} \approx 3.5 \text{ nm}$$

Прозрачная  
SF- граница

$$\left(\omega + iE_{ex} + \frac{\hbar \cos \Theta}{\tau_s}\right) \sin \Theta - \frac{\hbar D}{2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} = 0$$

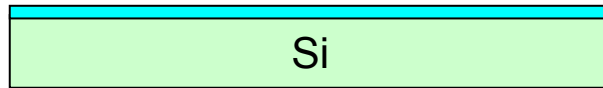
$$G = \cos \Theta(T); F = \sin \Theta(T)$$

Эффективная spin-flip  
частота  $\Gamma(T) = \cos \Theta(T)/\tau_s$ ;

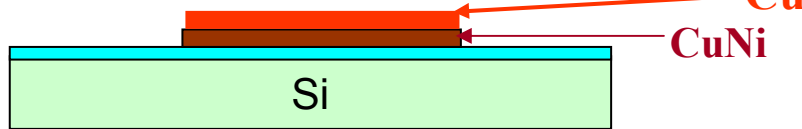
# Технология приготовления SFS переходов

## Послойная технология

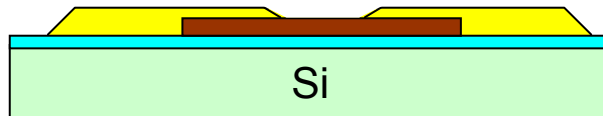
1: Осаждение нижнего Nb слоя



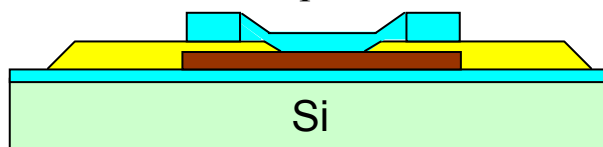
2: Осаждение CuNi + защитный Cu



3: Вскрытие окна в SiO



4: Осаждение верхнего Nb слоя



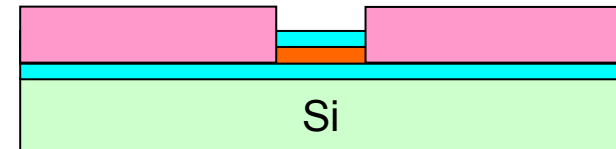
5μm x 5μm -- 50μm x 50μm

## Трехслойная технология

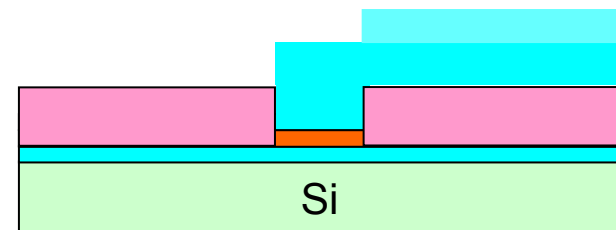
1: Осаждение Nb-CuNi-Nb трехслойки



2: Ионное травление Nb+CuNi, осаждение SiO, lift-off

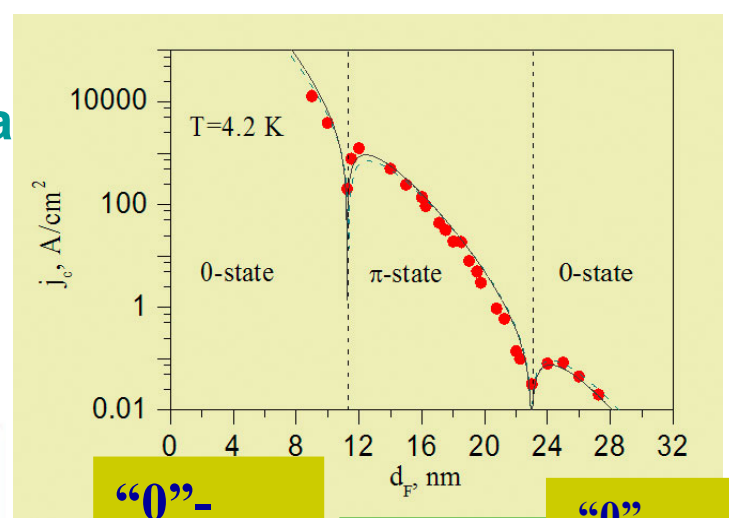
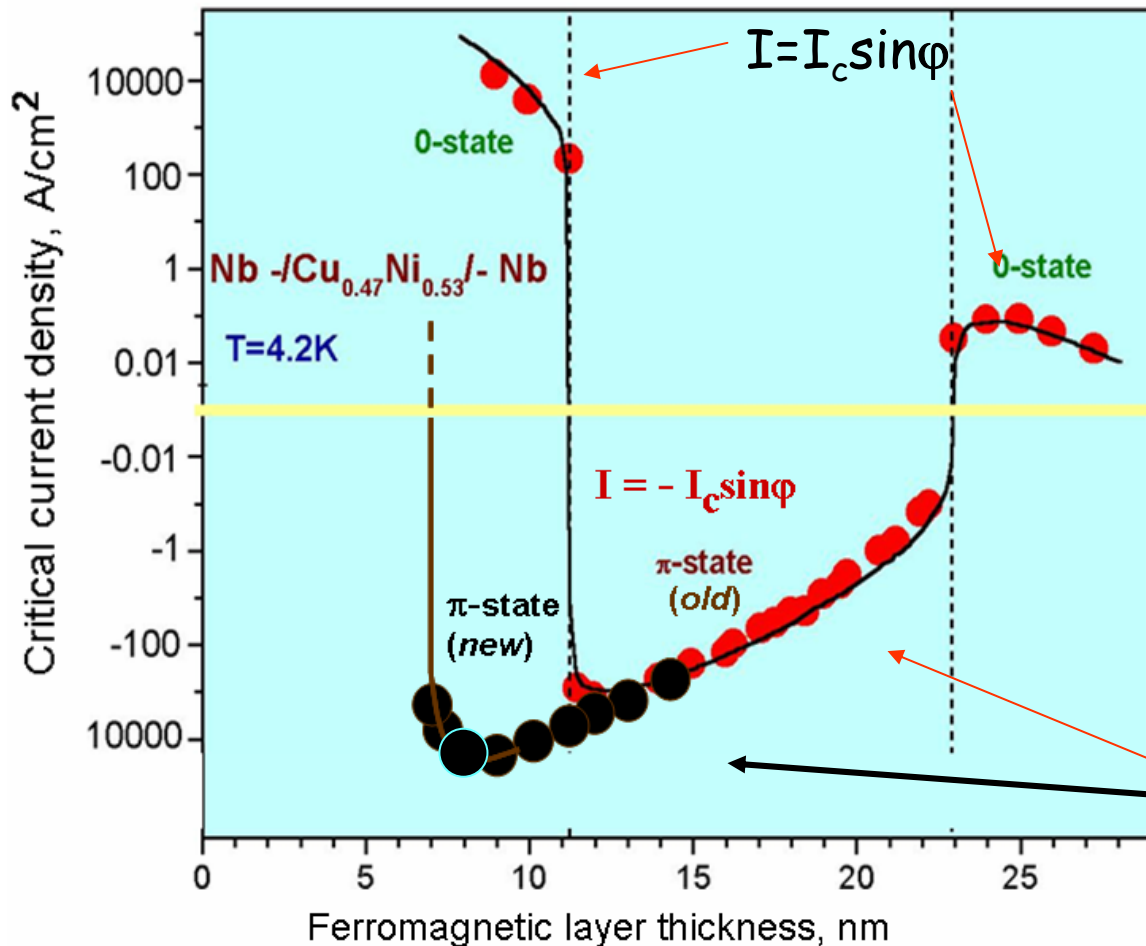
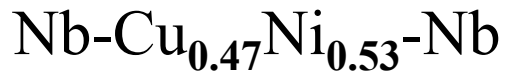


3: Осаждение верхнего Nb слоя



10μm x 10μm

# π-КОНТАКТЫ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ КРИТ ТОКА



“0”-state      π-state      “0”-state

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

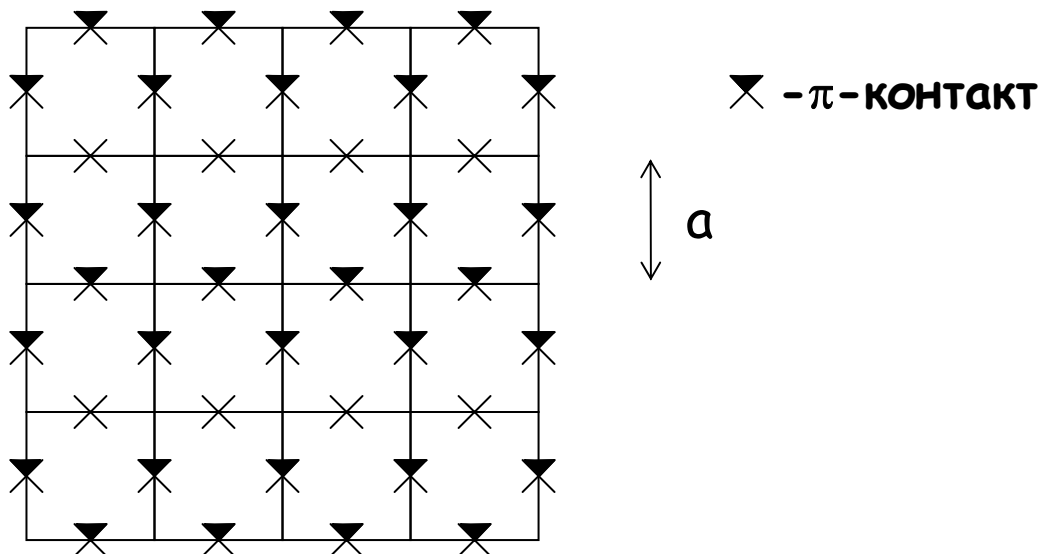
- - старая послойная ТЕХНОЛОГИЯ
- - новая трехслойная ТЕХНОЛОГИЯ

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

# Прямое наблюдение спонтанного магнитного потока в джозефсоновских сетках

## с $\pi$ -контактами

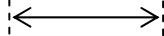
совместно с С.Фроловым и Д.Ван Харлингеном (Урбана, США)



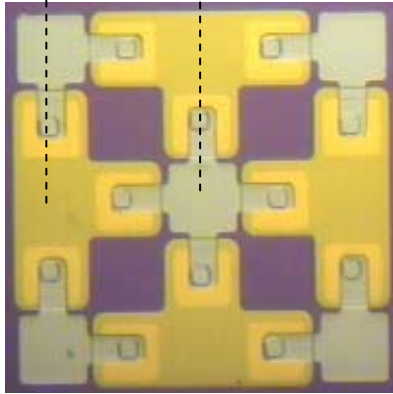
Полностью фрустрированная джозефсоновская сетка

# Джозефсоновские сетки

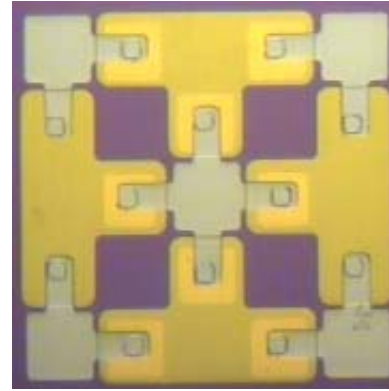
30 $\mu$ m



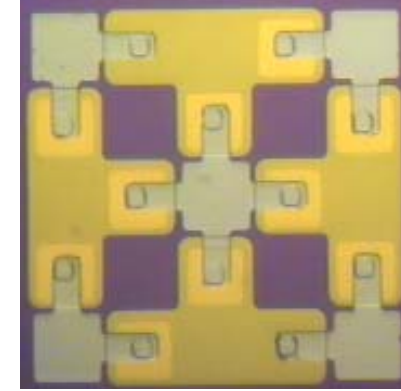
2 x 2



unfrustrated

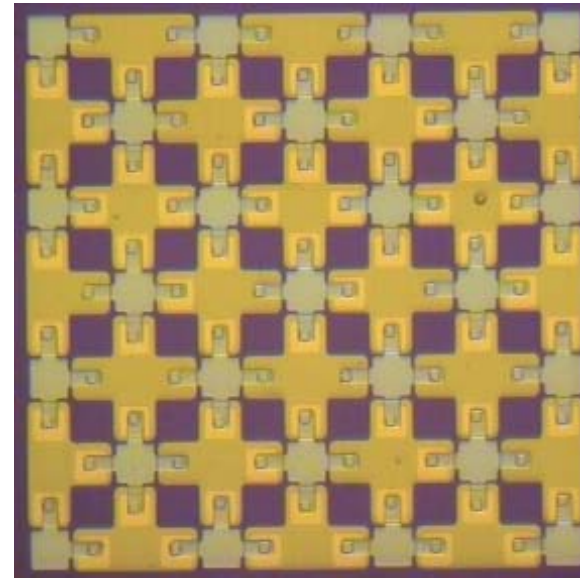
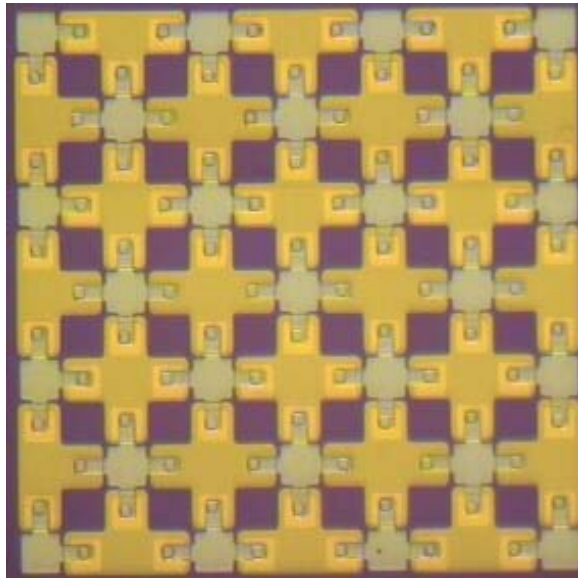


fully-frustrated



checkerboard-frustrated

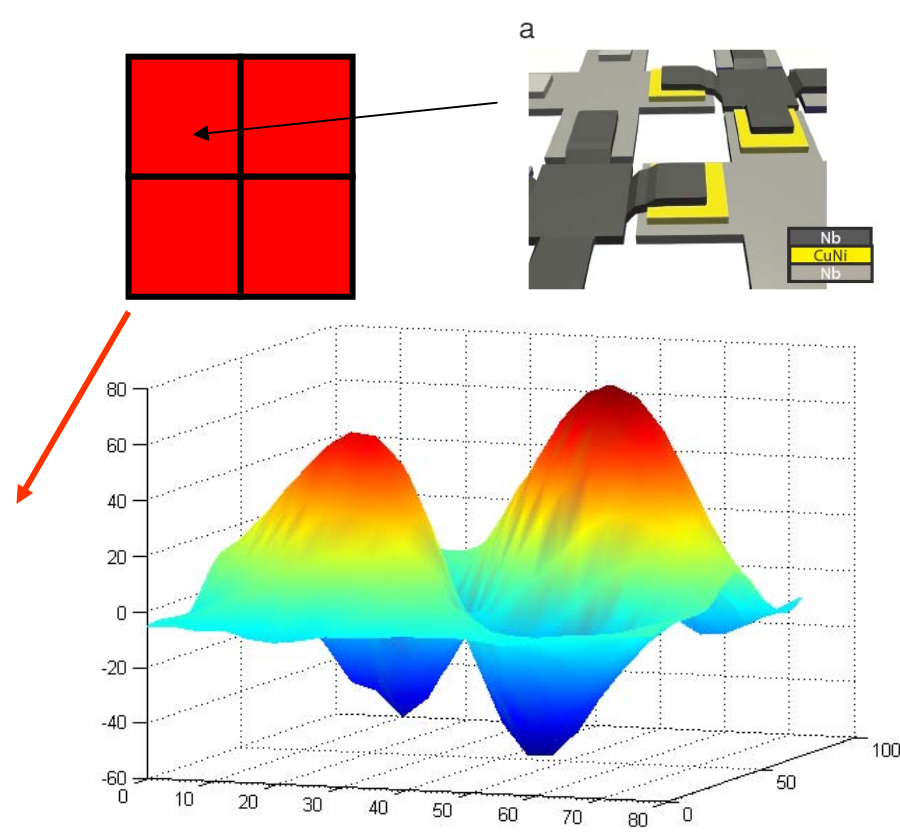
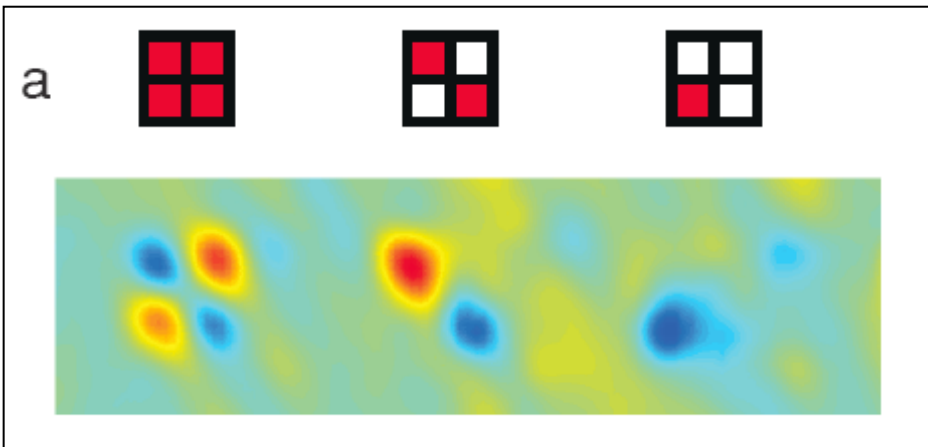
6 x 6



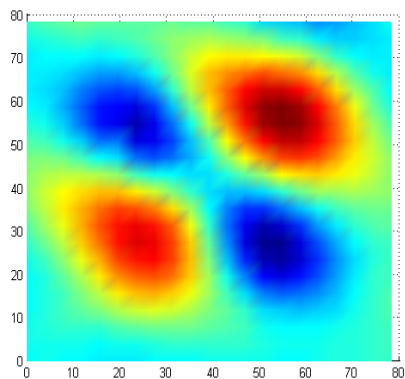


# Визуализация спонтанного потока в сетках $\pi$ -контактов

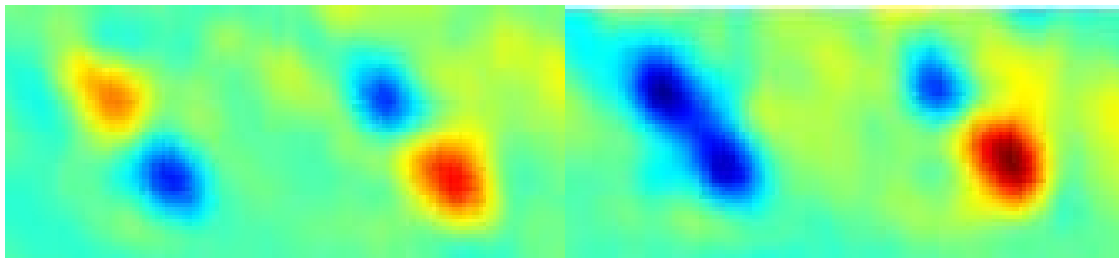
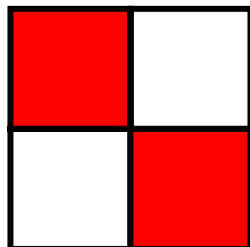
Frolov, Stoutimore, Crane, Van Harlingen, Oboznov, V.R. et al, accepted to Nature Physics



Fully frustrated

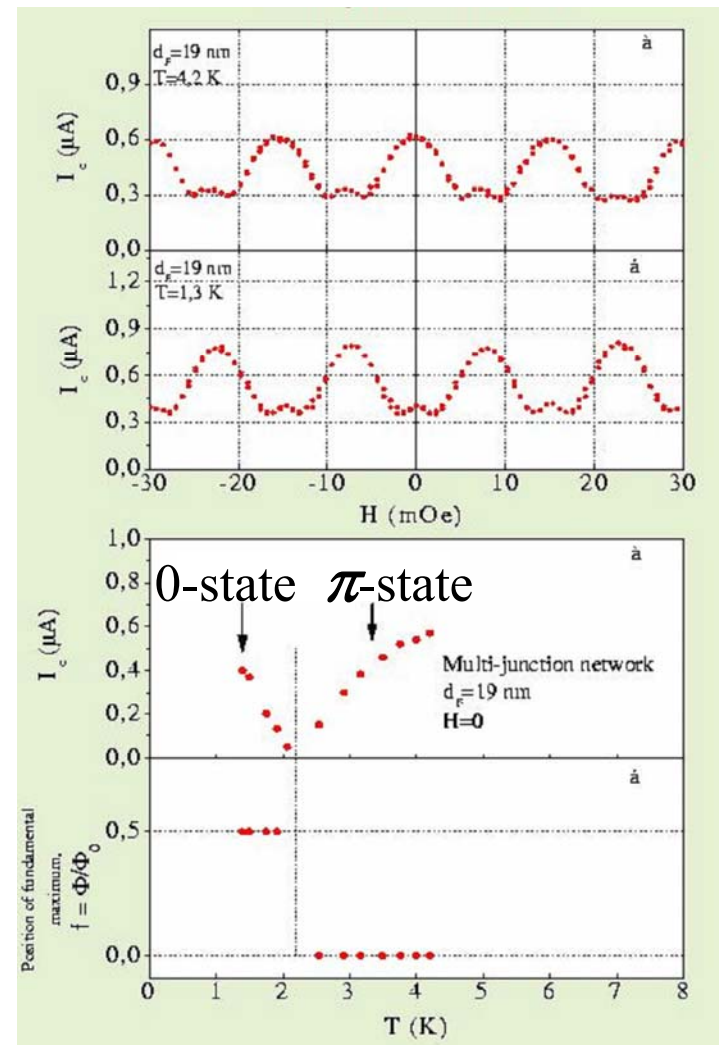
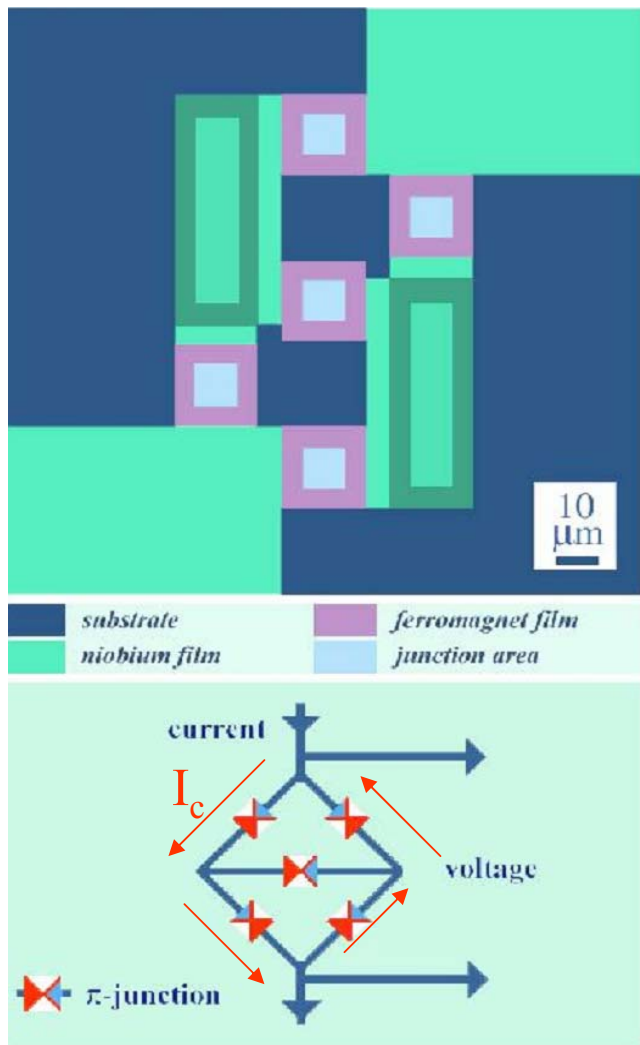


Checkerboard frustrated



V.V.Ryazanov .....

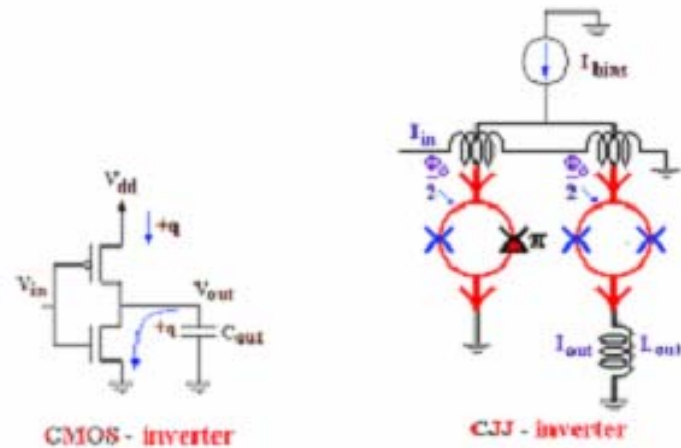
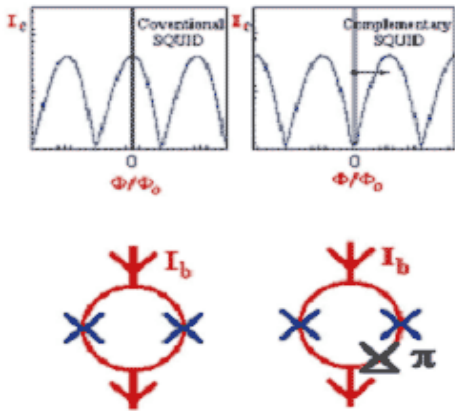
# Фазово-чувствительные эксперименты Интерферометры



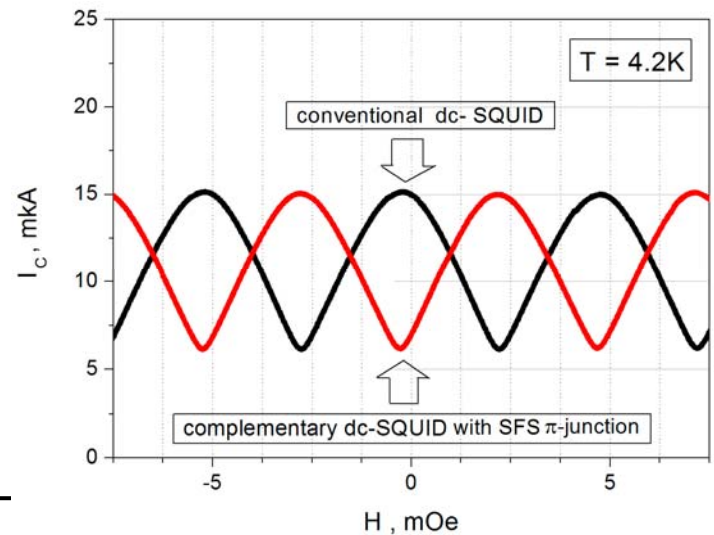
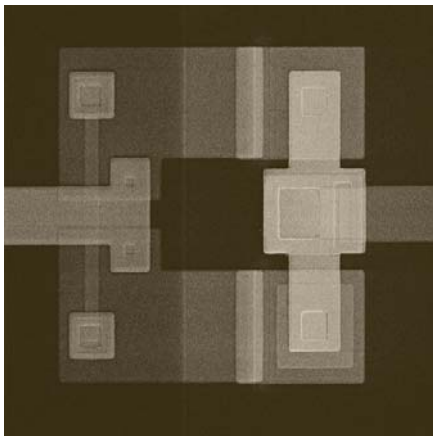
# Комплементарная джозефсоновская логика

E. Terziogu, M.R. Beasley, IEEE Trans. On Appl. Supercond. 8, 48 (1998)

$$j = j_c \sin(\varphi + \pi)$$



*В сотрудничестве с В.Кошельцом и П.Дмитриевым*

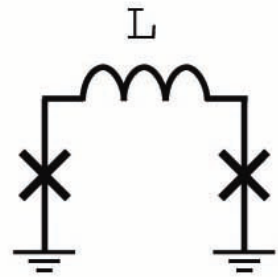


# RSFQ-логика, использующая фазовые $\pi$ -инверторы

A.V.Ustinov, V.K.Kaplunenko. Journ. Appl. Phys. **94**, 5405 (2003)

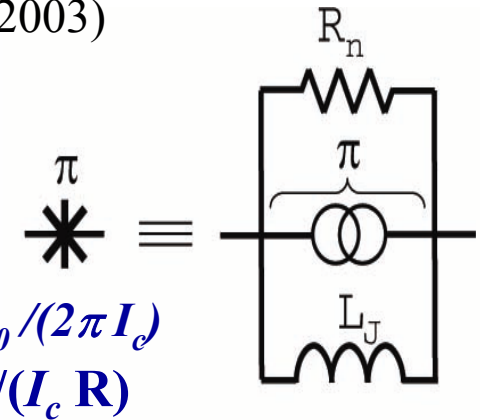
## RSFQ- логика: Rapid Single Flux Quantum logic

Традиционная RSFQ-ячейка



$$LI_c > \Phi_0$$

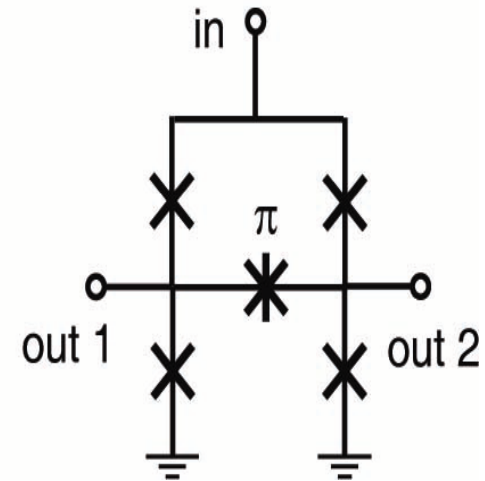
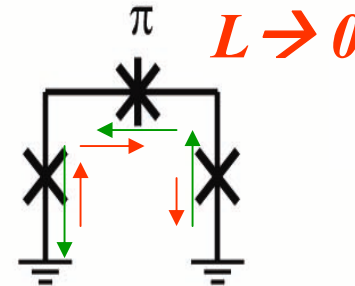
Fluxon memorizing cell



$$L_J = \Phi_0 / (2\pi I_c)$$

$$\tau \sim 1 / (I_c R)$$

$\pi$ -RSFQ -ячейка

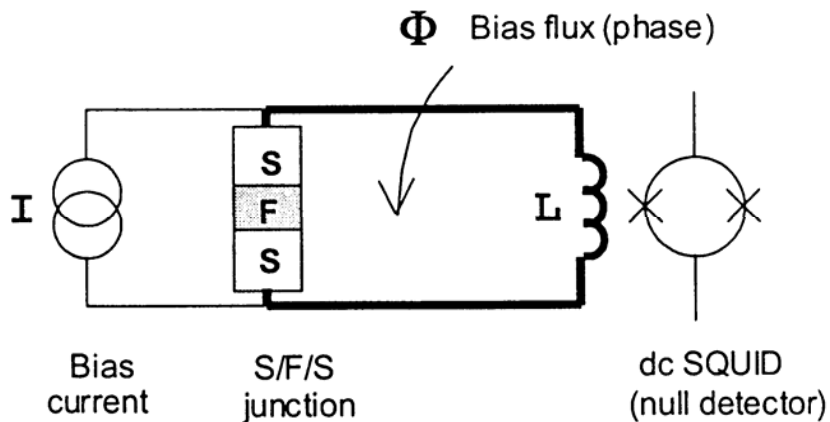


$\pi$ -RSFQ –триггер

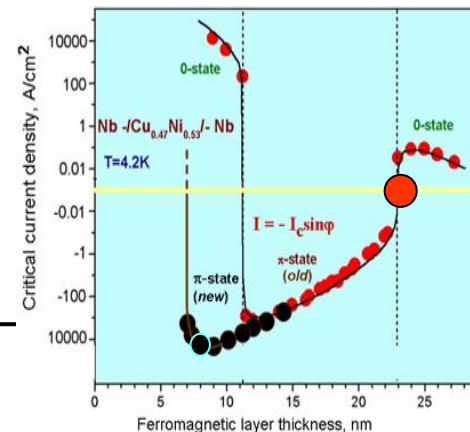
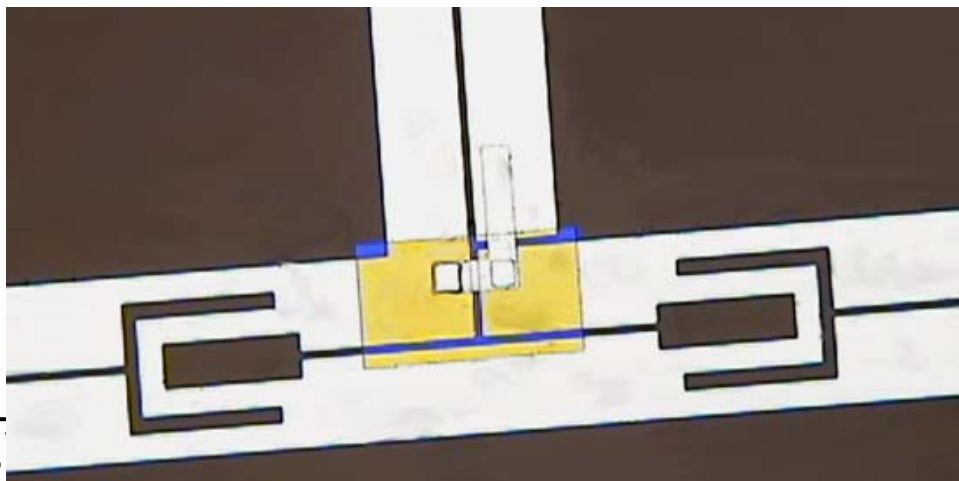
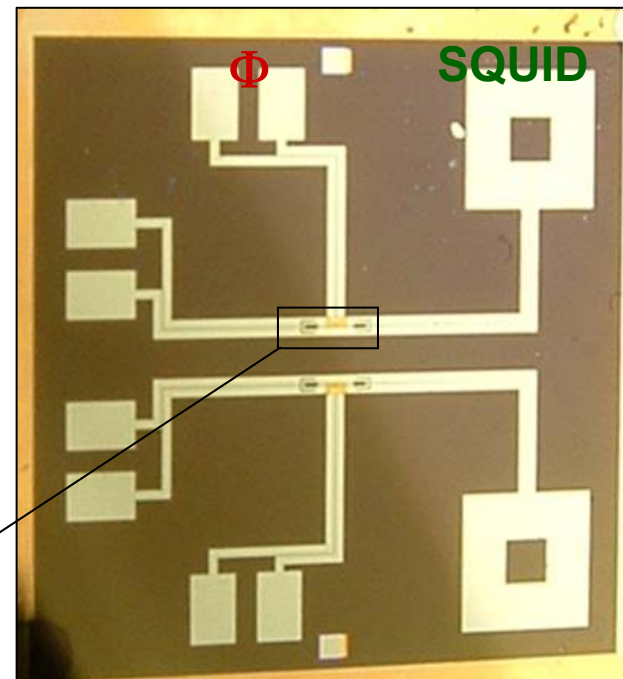
# Прямое измерение токо-фазового соотношения

Frolov, Van Harlingen, Oboznov, Bolginov, V.R., PR B 70, 144505 (2004).

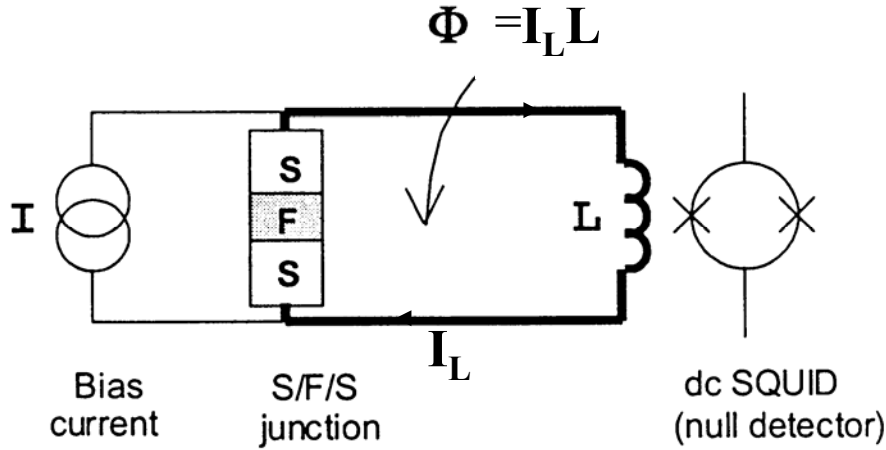
dc SQUID метод: J.R. Waldram et al., Rev. Phys. Appl. 10, 7 (1975)



Null SQUID current --- measure  $I$  and  $\Phi \sim \phi$

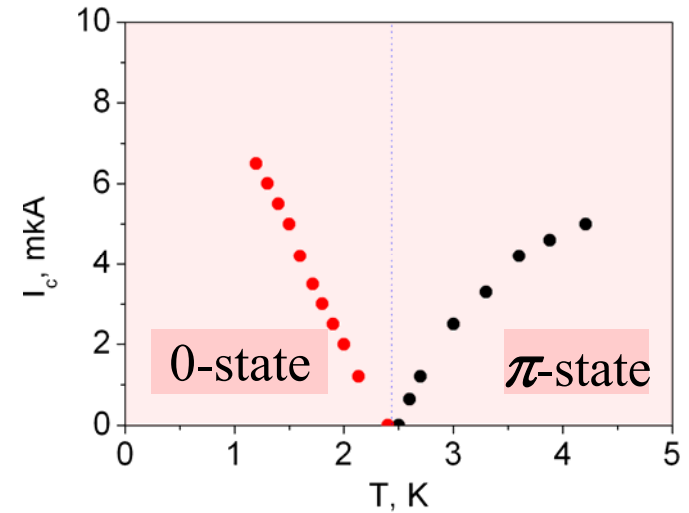
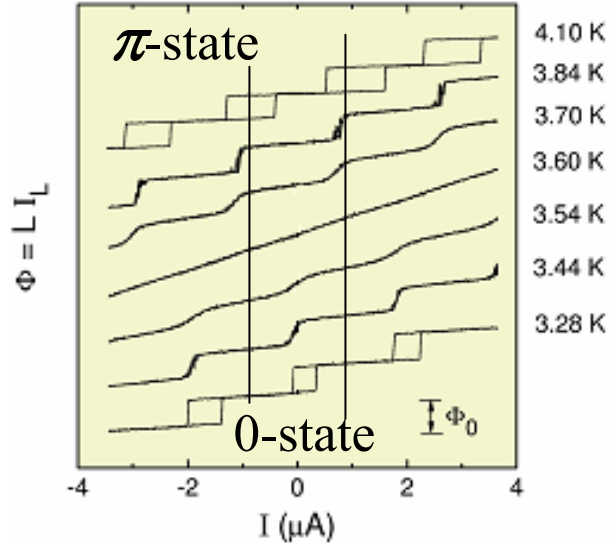


# Токо-фазовый эксперимент



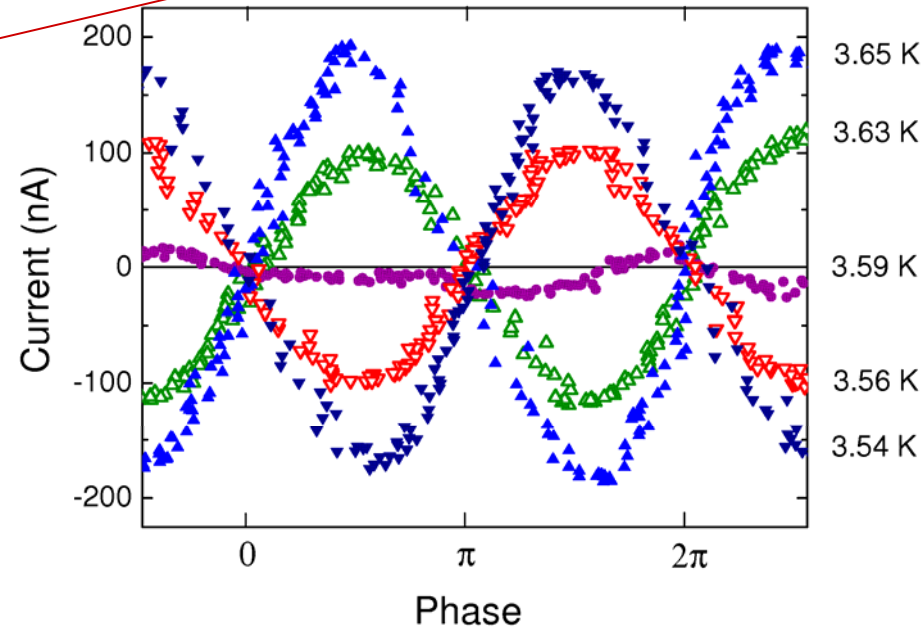
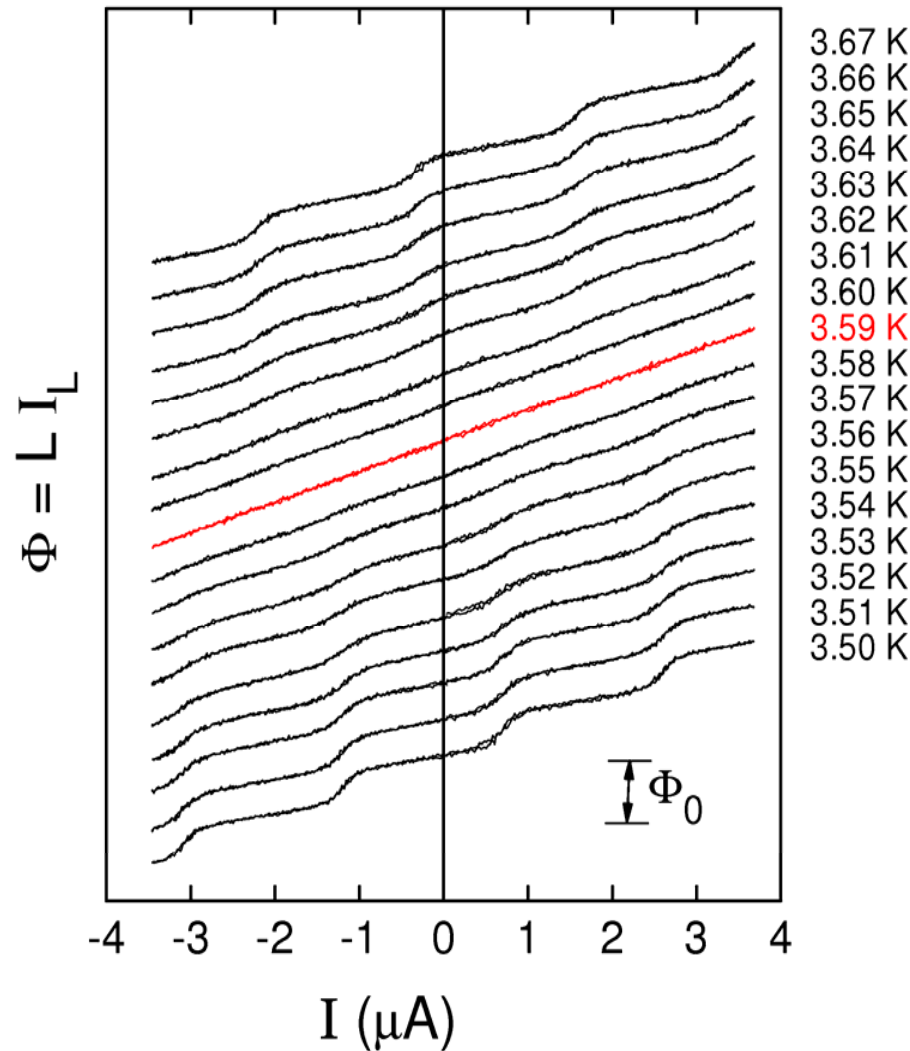
$$\Phi_e = L I \quad \varphi = 2\pi \Phi / \Phi_0$$

$$I = \Phi / L + I_c \sin(2\pi \Phi / \Phi_0)$$



# Инверсия токо-фазового соотношения

Извлечено из  $\Phi(I)$  характеристик :

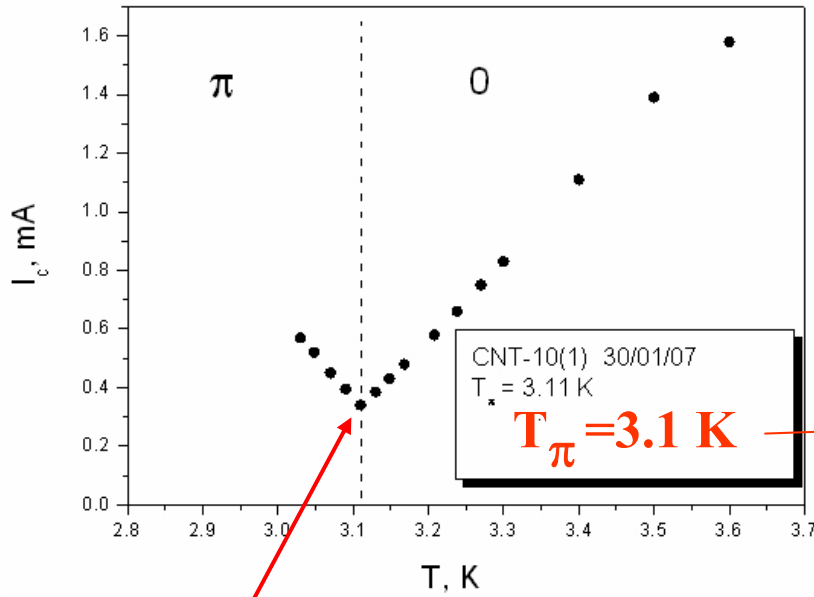


- резкий  $0-\pi$ -переход
- $I_c = 0$  при температуре перехода
- токо-фаз соотношение –  $\sin$
- Никаких искажений, связанных со второй гармоникой  $\sin(2\varphi)$

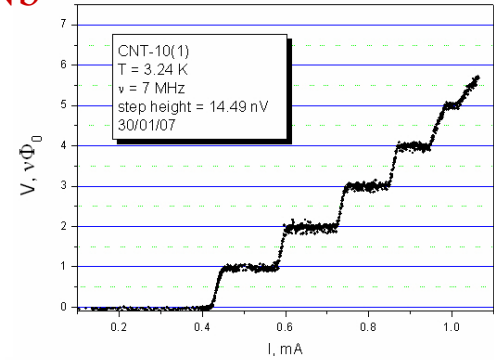
# Обнаружение 2φ-компоненты (sin(2φ)). Ступени Шапиро

$$I = I_{c1} \sin \varphi + I_{c2} \sin(2\varphi) + \dots$$

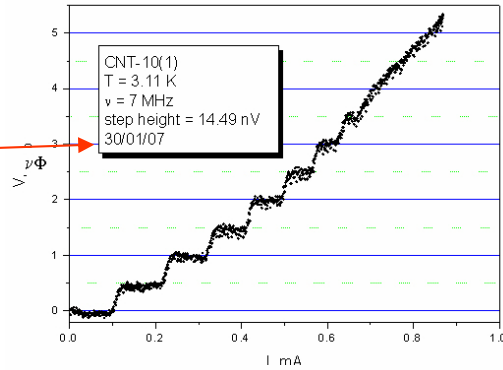
Nb-Cu<sub>0.47</sub>Ni<sub>0.53</sub>-Nb  
10 x 10 μm<sup>2</sup>



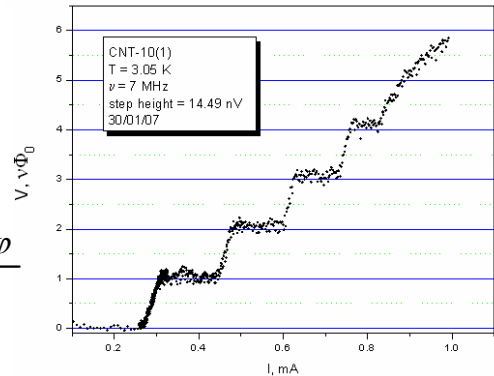
$d_F = 7.2 \text{ nm}$



$T = 3.24 \text{ K}$

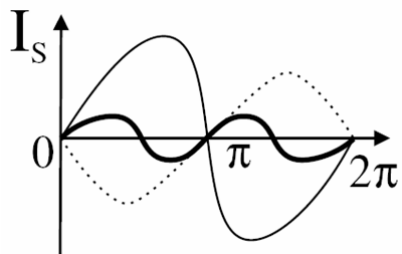


$T = 3.11 \text{ K}$



$T = 3.06 \text{ K}$

$I = I_{c2} \sin(2\varphi); \quad I_{c1} = 0;$



$$V_\varphi = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\hbar}{2e} 2\pi f = \Phi_0 f$$

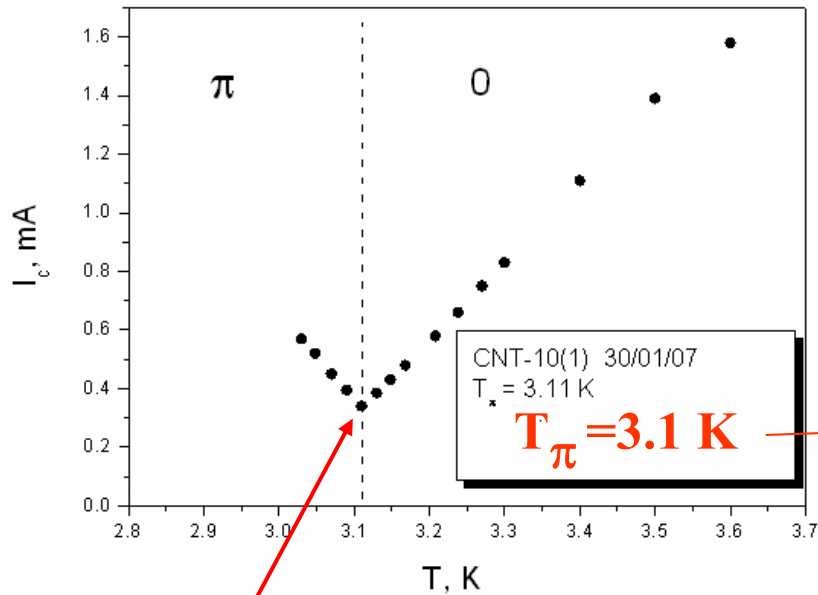
$$V_{2\varphi} = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\hbar}{2e} \pi f = \frac{\Phi_0}{2} f = \frac{V_\varphi}{2}$$



# $\Phi_0/2$ -периодичность Фраунгоферовской зависимости

$$I = I_{c1} \sin \varphi + I_{c2} \sin(2\varphi) + \dots$$

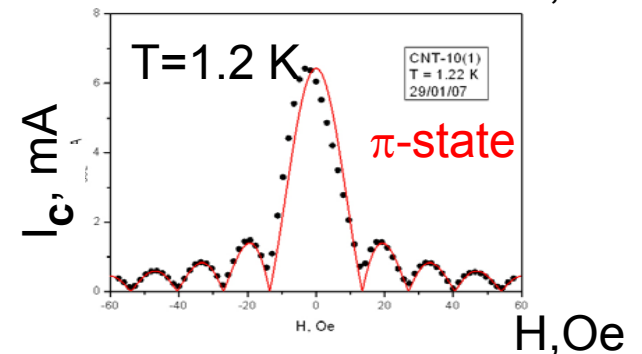
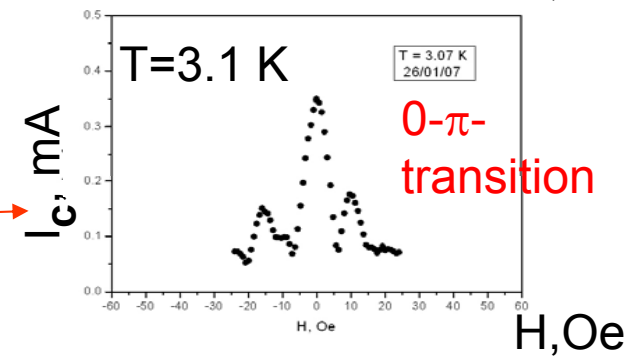
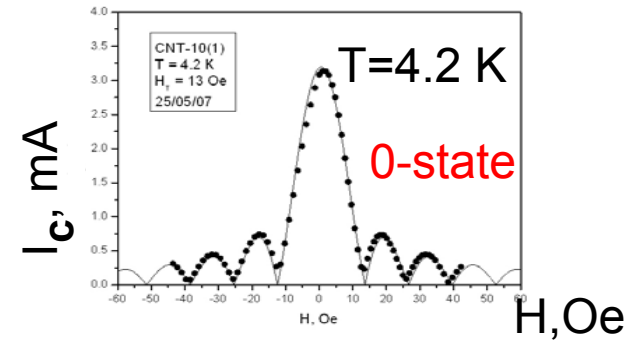
$d_F = 7.2 \text{ nm}$



$I = I_{c2} \sin(2\varphi); \quad I_{c1} = 0;$

Nb-Cu<sub>0.47</sub>Ni<sub>0.53</sub>-Nb

5 x 5  $\mu\text{m}^2$

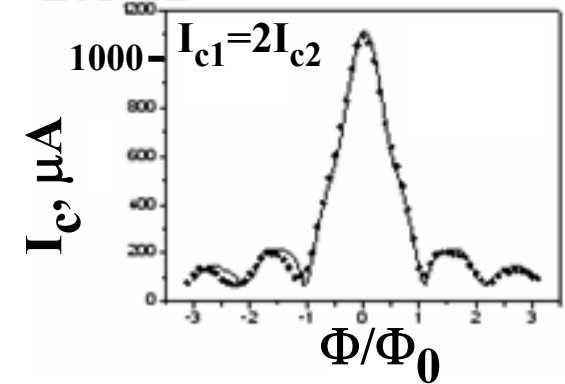
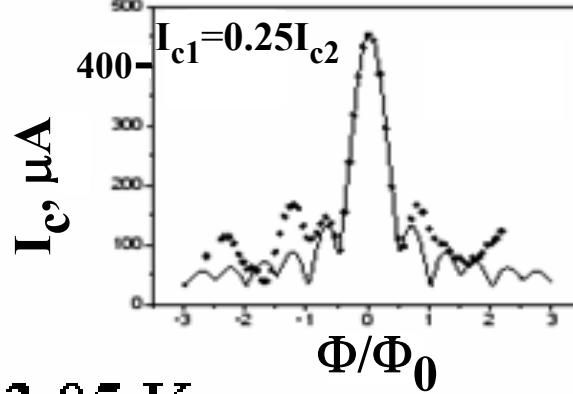
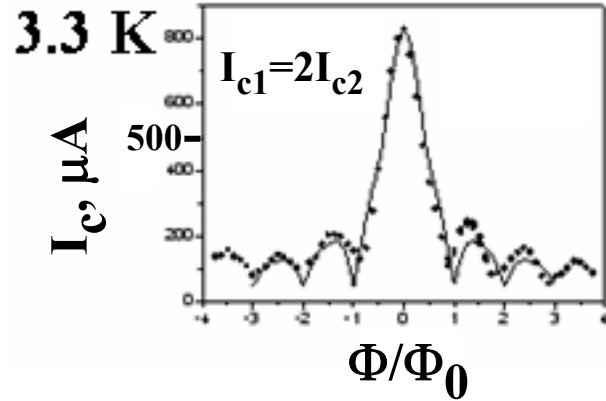


# Сравнение с численным счетом

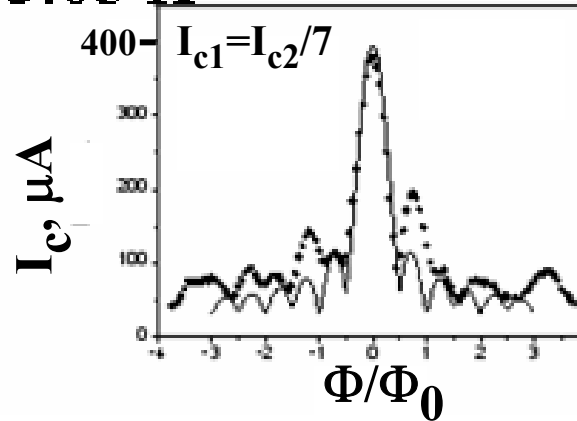
## Фраунгоферовские зависимости для перехода с $d_F=7.2$ nm

3.1 К

2.8 К



3.05 К



Формула с учетом второй гармоники

Максимум тока (крит ток) находился численно

$$I_s = \int [j_{c1} \sin(\varphi + \phi) + j_{c2} \sin(2\varphi + 2\phi)] dx, \text{ где } \varphi(x) = 2\pi(\Phi/\Phi_0)(x/L), \phi - \text{константа}$$

$$I_c = \max_{\phi} (I_{c1} \sin\{\pi\Phi/\Phi_0\} \sin\{\phi\} / \{\pi\Phi/\Phi_0\} + I_{c2} \sin\{2\pi\Phi/\Phi_0\} \sin\{2\phi\} / \{2\pi\Phi/\Phi_0\})$$