

# **$\pi$ - КОНТАКТЫ**

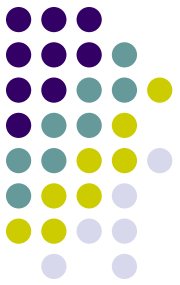
## **В СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ**

### **ЭЛЕКТРОНИКЕ**

**(физические основы)**

**А.В. Самохвалов**

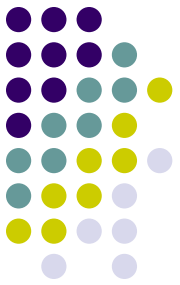
# План



1. Эффект Джозефсона и слабые связи
2. Ток-фазовая зависимость: 0 и  $\pi$  контакты
3. История вопроса
4.  $\pi$  контакты vs структуры с  $\pi$  смещением
5. DC СКВИД, полуфлаксон
6. Диагностика  $\pi$ -состояний
7. Применение структур с  $\pi$ -смещением  
(Заключение)

# Эффект Джозефсона

[ B.D. Josephson, Phys.Lett. 1, 251 (1962) ]

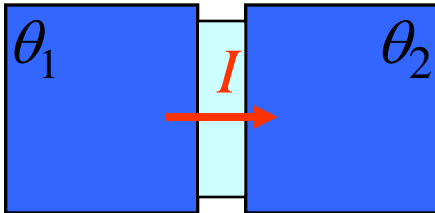


Эксперимент:

P.W.Anderson, J.M.Rowell (1963)

S.Shapiro (1963)

И.К.Янсон, В.М.Свистунов, И.М.Дмитриенко (1965)



$$\psi_{1,2} = |\psi_{1,2}| \exp(i\theta_{1,2})$$

$$\varphi = \theta_1 - \theta_2$$

скачок фазы на барьере

В слабосвязанных сверхпроводниках устанавливается фазовая когерентность и возникает единая волновая функция.

**Стационарный эффект:  $I \leq I_c$**

[через туннельный барьер возможно протекание сверхтока]

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

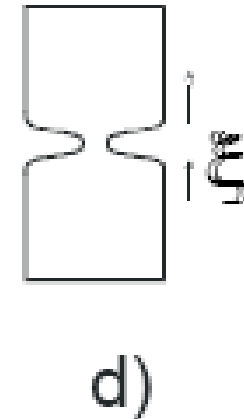
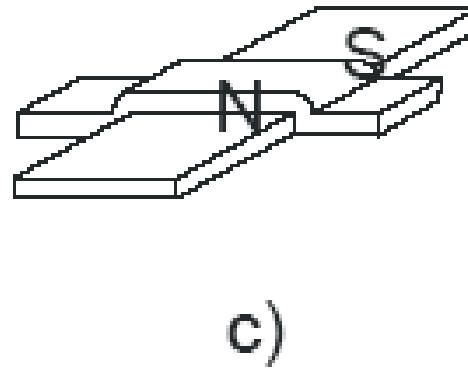
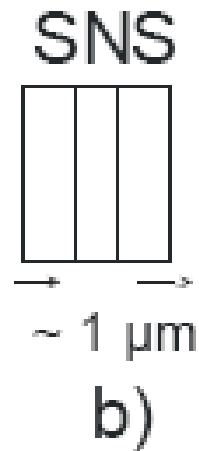
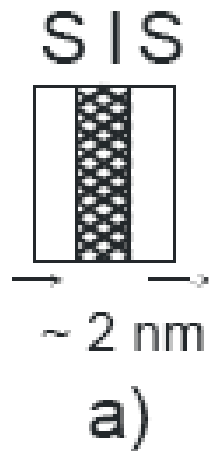
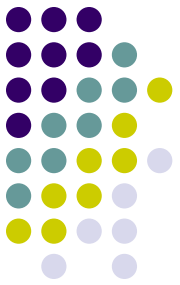
**Нестационарный эффект:  $I > I_c$**

[джозефсоновская генерация]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2e}{\hbar} V \Rightarrow \hbar \omega = 2eV$$

$$\frac{f}{V} = 483,6 \text{ MHz / mK V}$$

# Виды слабых связей



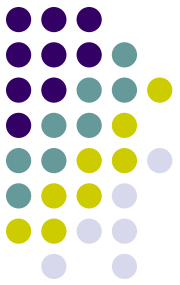
a) туннельный контакт

b) переход на эффекте близости

c) пленка N металла подавляет S параметр порядка

d) мостик Дайема (constriction)

# Ток-фазовая зависимость $I_s(\varphi)$ : общие соотношения



1. Изменение фазы одного электрода на  $2\pi$  не меняет физическое состояние  $\Rightarrow I_s(\varphi) = I_s(\varphi + 2\pi)$

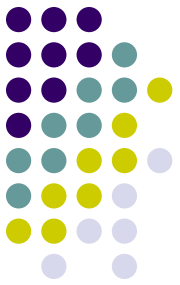
2. Если ток через переход отсутствует, то разность фаз равна 0 (или  $2\pi n$ )  $\Rightarrow I_s(0) = I_s(2\pi n) = 0$

3. Изменение направления (знака) тока изменяет знак разности фаз (при наличии симметрии относительно обращения времени)  $\Rightarrow I_s(\varphi) = -I_s(-\varphi)$

$$1 + 3 \Rightarrow I_s(\pi n) = 0$$

$$I_s(\varphi) = I_1 \sin(\varphi) + \sum_{n \geq 2} I_n \sin(n\varphi)$$

# Ток-фазовая зависимость: "0" и "π" – контакты

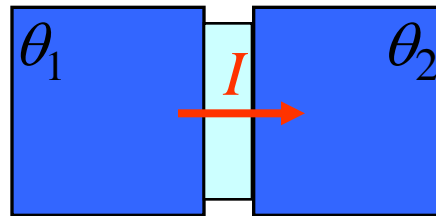


## 0 – контакт:

$$I_c > 0$$

$$F_0 = E_J (1 - \cos \varphi)$$

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



$$dF = \left( \frac{\hbar I_c}{2e} \right) \sin \varphi d\varphi$$

$$E_J = \frac{\hbar I_c}{2e}$$

Основное состояние:

$$I = 0; \quad \varphi_0 = 0$$

## π – контакт:

$$I_c < 0$$

$$F_\pi = |E_J| (1 + \cos \varphi)$$

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

Основное состояние:

$$I = 0; \quad \varphi_0 = \pi$$

[ Л.Н.Булаевский, и др. ,  
П. ЖЭТФ 1977 ]



# $\pi$ – КОНТАКТ: история вопроса

*Письма в ЖЭТФ, том 25, вып. 7, стр. 314 – 318*

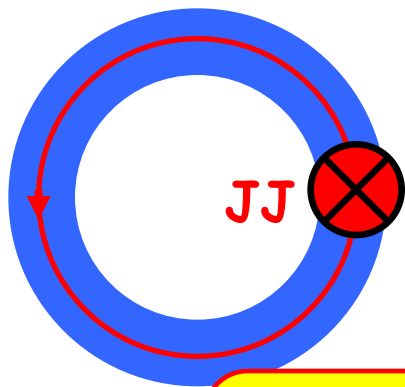
*5 апреля 1977 г.*

## СВЕРХПРОВОДЯЩАЯ СИСТЕМА СО СЛАБОЙ СВЯЗЬЮ С ТОКОМ В ОСНОВНОМ СОСТОЯНИИ

*Л.Н.Булаевский, В.В.Кузий, А.А.Собянин*

Рассмотрено сверхпроводящее кольцо с джозефсоновским контактом, содержащим магнитные примеси. Показано, что если туннелирование через магнитные примеси достаточно велико, то для такой системы основным состоянием является состояние с током и магнитным потоком.

**Введено понятие “ $\pi$ -контакт”**



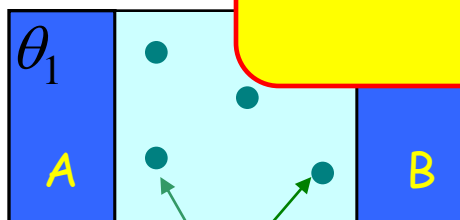
Туннельный гамильтониан:

$$H_T = \sum_{kk'nss'} (T_{kk'} \delta_{ss'} + V_{kk'n} \vec{\sigma}_{ss'} S_n) a_{ks}^+ b_{k's'} + \dots$$

$$I_0 - I_\sigma < 0 \Rightarrow \pi\text{-контакт}$$

е электронов  
спина

(A) → k'(B)

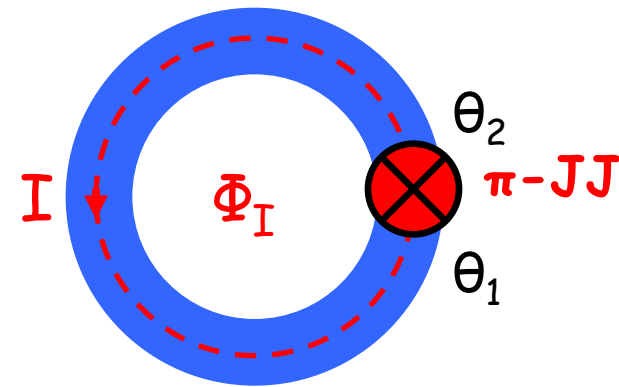
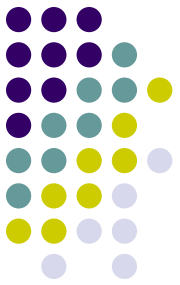


Магнитные примеси:  
туннелирование электронов  
с переворотом спина

$$I = (I_0 - I_\sigma) \sin \varphi; \quad F = -\frac{\hbar}{2e} (I_0 - I_\sigma) \cos \varphi$$

$$I_0 - I_\sigma = 2\pi^2 e \left[ T^2 - \sum_n V_n^2 S(S+1) \right] N_F^2 \Delta \operatorname{th} \frac{\Delta}{2T}$$

# Спонтанный сверхток в кольце с $\pi$ -контактом



$L$  - индуктивность СТП  
кольца

$$I = -I_c \sin \varphi \quad I_c = |I_0 - I_\sigma| \quad \varphi = \theta_1 - \theta_2$$

$$\vec{j} = \frac{e\hbar N}{2m} \left( \nabla \theta + \frac{2\pi}{\Phi_0} \vec{A} \right) \quad \Phi_0 = \frac{\pi\hbar c}{e}$$

$$\int_2^1 \vec{j} d\vec{l} = 0 \Rightarrow F = \frac{\hbar I_c}{2e} \left( \cos \varphi + \frac{1}{2} k \varphi^2 \right) \quad k = \frac{c \Phi_0}{2\pi L I_c}$$

$$I_c L / c \gg \Phi_0 \rightarrow \varphi_0 \rightarrow \pi$$

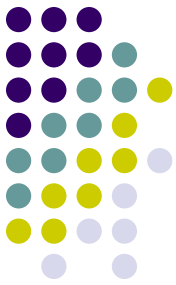
$$\Phi_I \rightarrow \Phi_0 / 2 - \text{"semifluxon"}$$

$$k > 1 \Rightarrow I = 0; \quad \varphi_0 = 0; \quad \Phi_I = 0$$

**Спонтанный сверхток  
и магнитный поток**



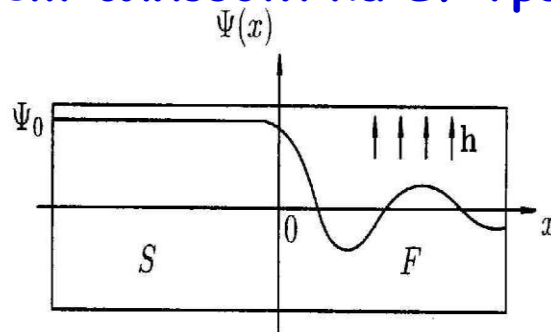
$$k < 1 \Rightarrow I \neq 0; \quad \varphi_0 \neq 0; \quad \Phi_I \neq 0$$



# SFS переход

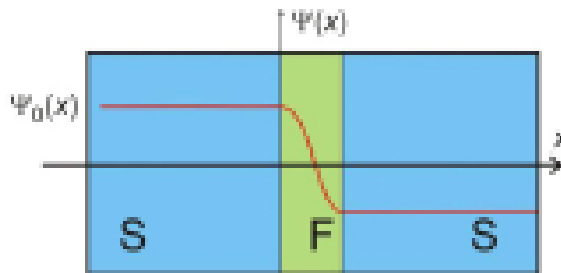
теория: 1990-1991, эксперимент: 2001

## Эффект близости на SF границе



$$\xi_F \sim \sqrt{\frac{\hbar D}{E_{ex}}} \ll \xi_0 \sim \sqrt{\frac{\hbar D}{2\pi T_C}}$$

## SFS $\pi$ -контакт



Fe, Co:  $d_F \sim \xi_F \sim 1\text{nm}$

Cu<sub>0.48</sub> Ni<sub>0.52</sub>:  $d_F \sim \xi_F \sim 20\text{-}30\text{nm}$

Письма в ЖЭТФ, том 52, вып. 1, стр. 701-703

10 июля 1990 г.

### $\pi$ -ФАЗА В МАГНИТНЫХ СЛОИСТЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

А.В.Андреев, А.И.Буздин, Р.М.Озгуд

Показано, что в слоистых сверхпроводниках с чередующимися сверхпроводящими и магнитными слоями основному состоянию системы может отвечать  $\pi$ -фаза, в которой параметр порядка сверхпроводимости меняет знак при переходе на соседний слой.

Письма в ЖЭТФ, том 53, вып. 6, стр. 308 - 312

25 марта 1991 г.

### ДЖОЗЕФСОНОВСКИЙ КОНТАКТ С ФЕРРОМАГНИТНОЙ ПРОСЛОЙКОЙ

А.И.Буздин, М.Ю.Куприянов

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова  
119899, Москва

Поступила в редакцию 21 февраля 1991 г.

Рассмотрен в "грязном" пределе контакт сверхпроводник - ферромагнетик - сверхпроводник (SFS). Показано, что критический ток осциллирует, обращаясь в ноль, с изменением толщины F-слоя и величины обменного поля в ферромагнетике.

VOLUME 86, NUMBER 11

PHYSICAL REVIEW LETTERS

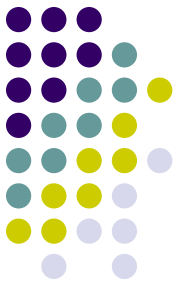
12 MARCH 2001

### Coupling of Two Superconductors through a Ferromagnet: Evidence for a $\pi$ Junction

V. V. Ryazanov,<sup>1</sup> V. A. Oboznov,<sup>1</sup> A. Yu. Rusanov,<sup>1</sup> A. V. Veretennikov,<sup>1</sup> A. A. Golubov,<sup>2</sup> and J. Aarts<sup>3</sup>

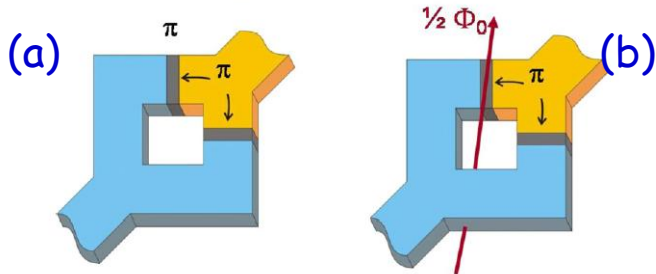
# Bicrystal Grain-Boundary Junctions (d-wave)

[H. Hilgenkamp, PRB 1996; J. R. Kirtley, PRL 1996;]



YBCO

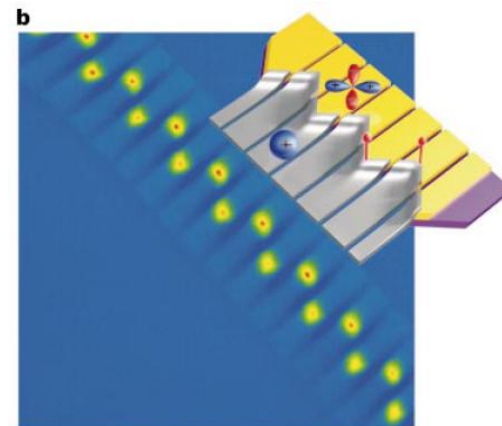
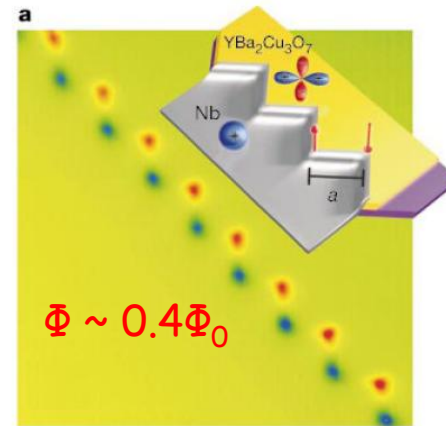
Nb



Джозефсоновские переходы остаются обычными "0"-контактами, а  $\pi$ -сдвиг из-за d-симметрии параметра порядка компенсируется:  
(a) скачком фазы на переходах  
(b) спонтанным магнитным потоком

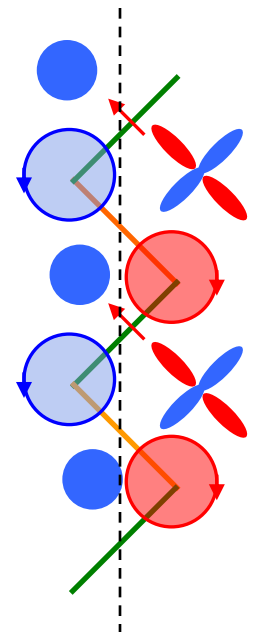
**Структура с  $\pi$ -смещением**

СКВИД - микроскоп:  
 $D \sim 0.4 \text{ mkm}$ ;  $\Delta H \sim 0.5 \text{ mK}$



Nb

YBCO



[H. Hilgenkamp, Nature 2003]

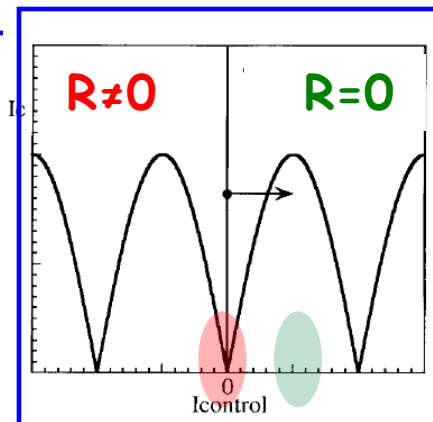
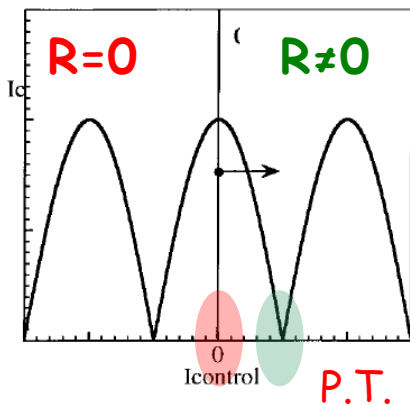
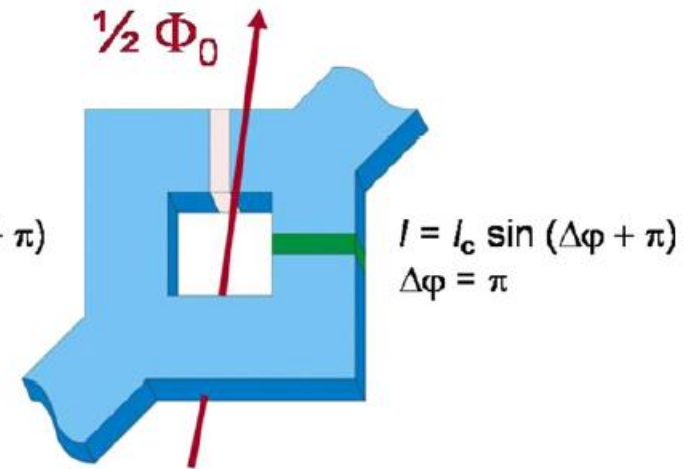
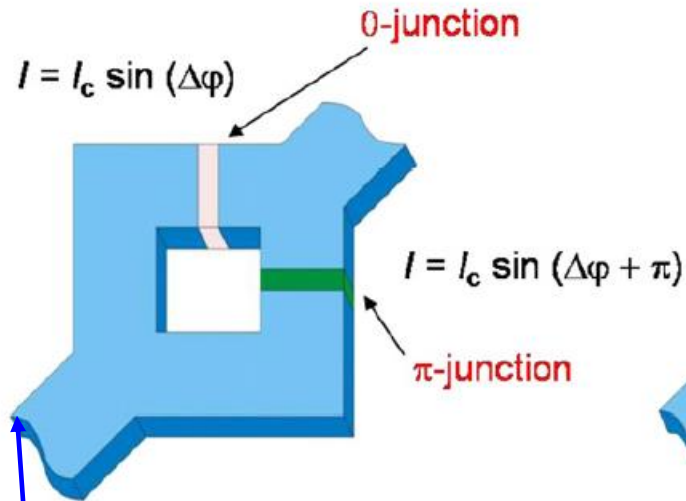
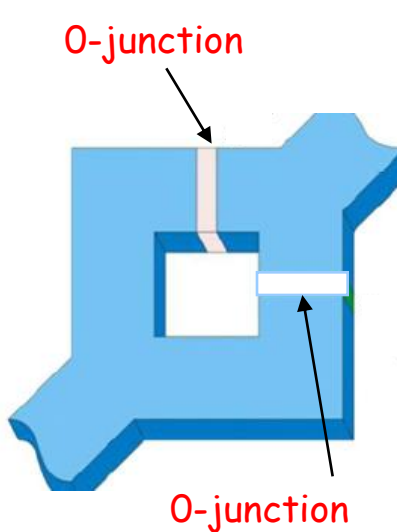
# DC $\pi$ -SQUID



## DC SQUID

$$I_c L/c \ll \Phi_0 \quad \varphi_\pi \rightarrow 0$$

$$I_c L/c \gg \Phi_0 \quad \varphi_\pi \rightarrow \pi$$



Обычный СКВИД

Комплементарный СКВИД

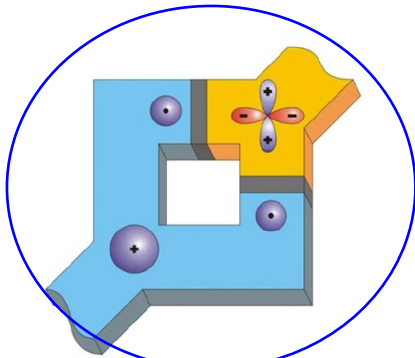
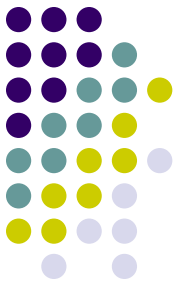
Quiet SQUID

Спонтанная генерация  
«полуфлаксона»

состояние 2-кратно  
вырождено

ячейка памяти

[E.Terzioglu, M.R.Beasley. IEEE 1998]

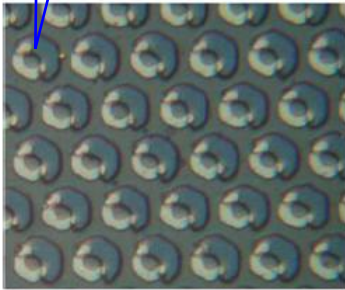
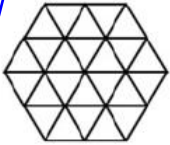


Size:  $1 \times 1 \mu\text{m}^2$

Flux:  $\sim 0.25 \Phi_0$

A memory density:  $\sim 100 \text{ Mbits cm}^{-2}$

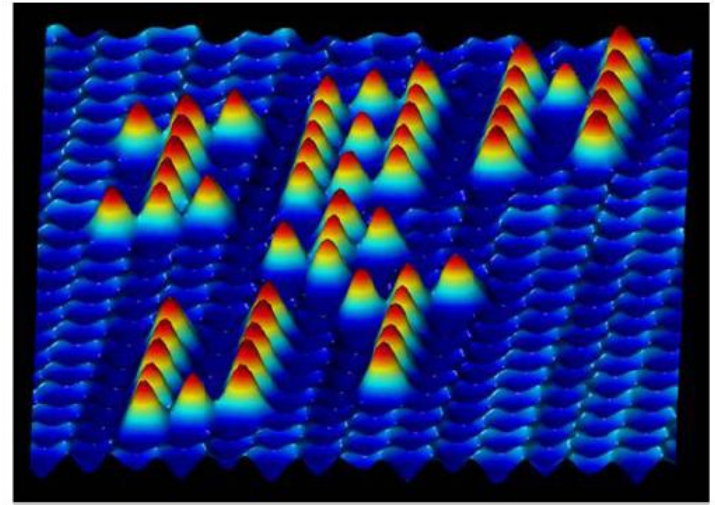
### Scanning SQUID microscopy



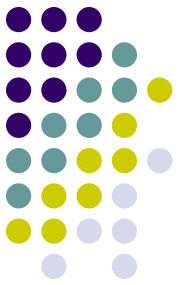
70000 rings



Spontaneously formed  
half-flux quanta

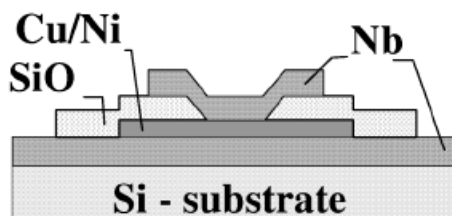


# Диагностика $\pi$ -состояния перехода



1. "Возвратная" зависимость критического тока от температуры  $I_c(T)$
2. Изменение полевой зависимости критического тока  $I_c(H)$  (фраунгоферова картина)
3. Сканирующая СКВИД микроскопия: спонтанное возникновение тока и магнитного потока в массивах  $0 - \pi$  контактов
4. Измерение ток-фазовой зависимости контакта:  $I(\varphi)$

# “Возвратная” зависимость критического тока от температуры $I_c(T)$

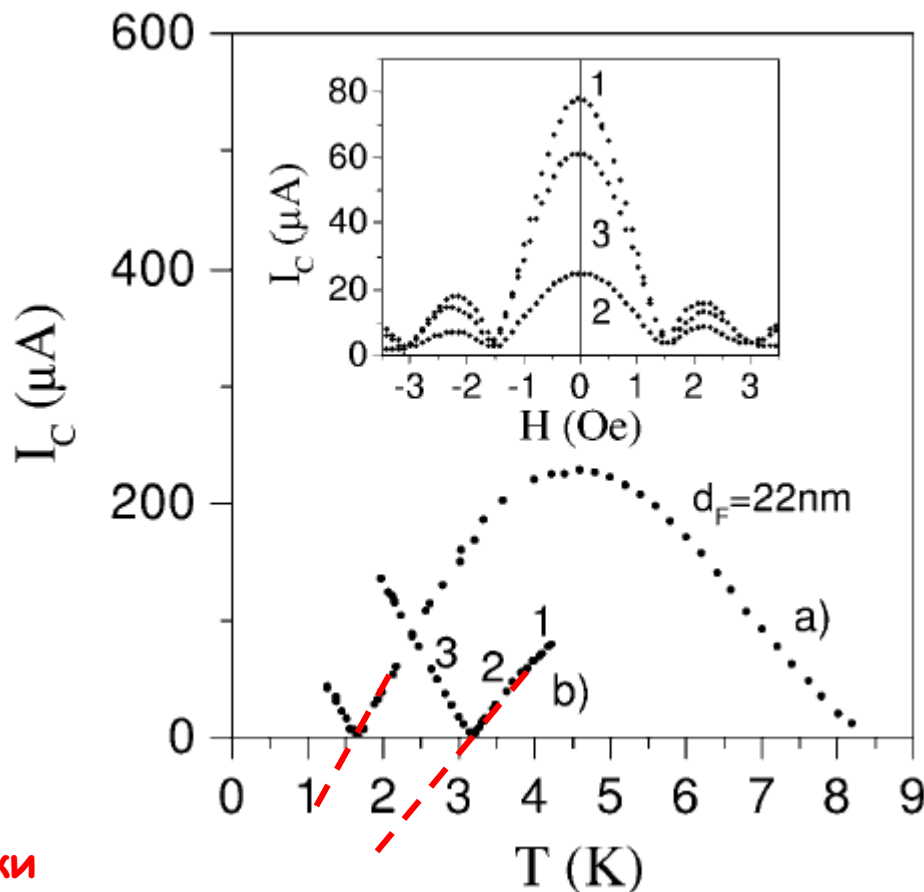


**Nb/CuNi/Nb**

**!!! Но**

можно измерить только  
величину, но не знак  $I_c$

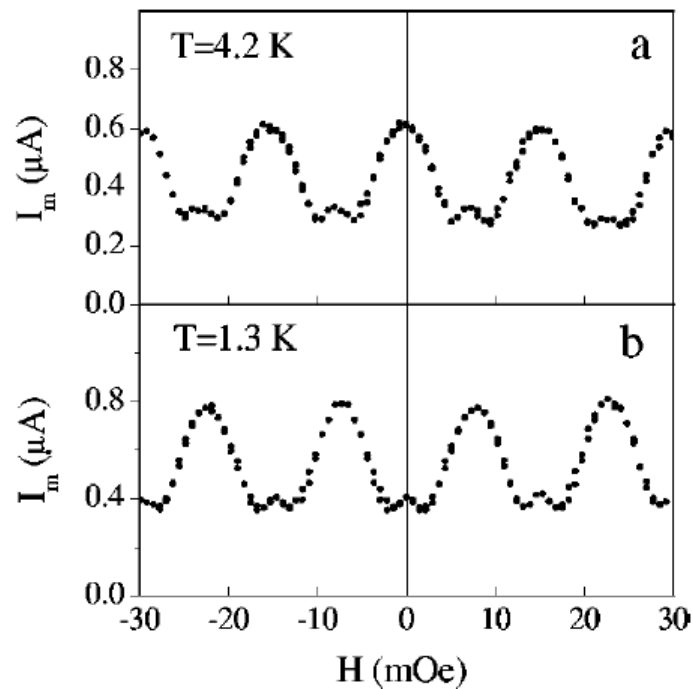
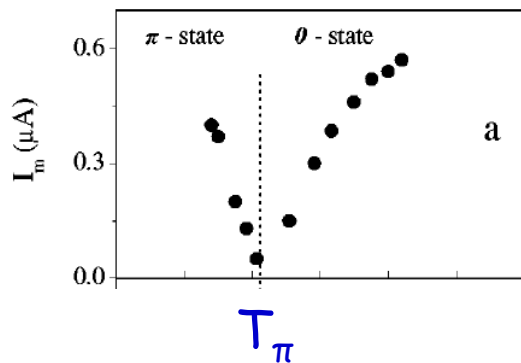
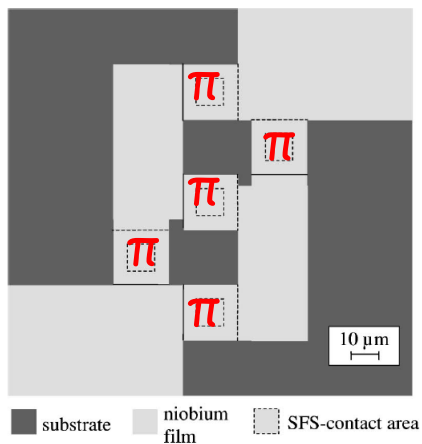
Для определения знака  $I_c$   
необходимо использовать  
интерференционные методики



# Изменение полевой зависимости критического тока $I_c(H)$



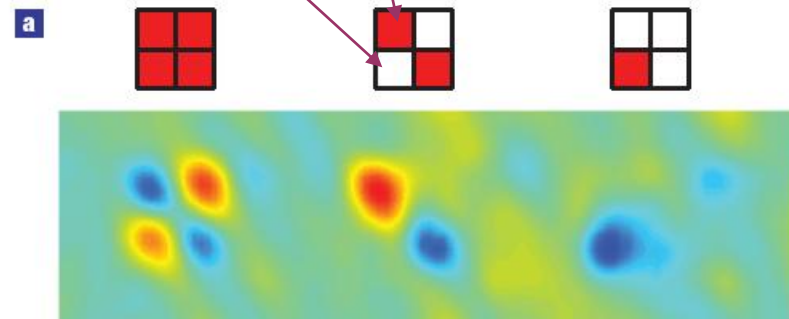
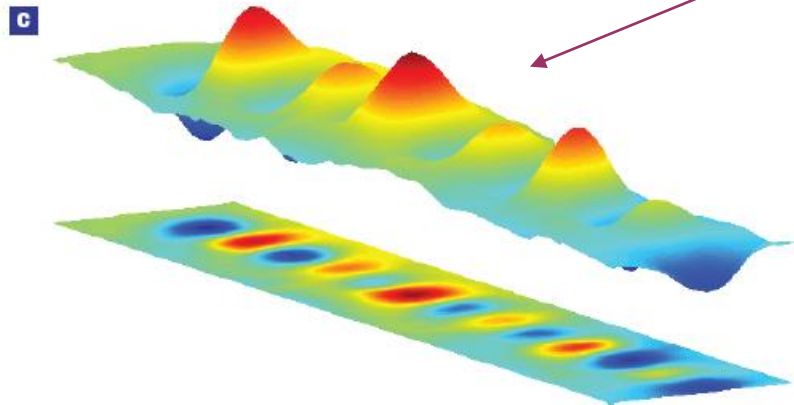
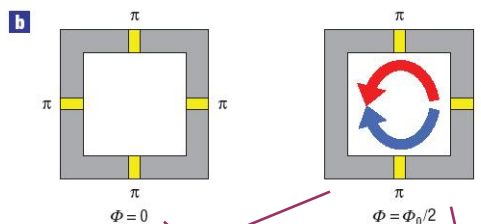
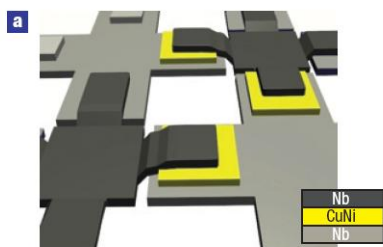
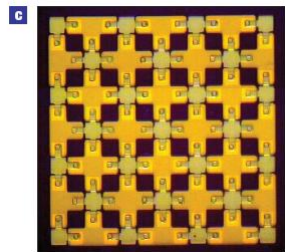
$I_c L/c \ll \Phi_0 \longrightarrow$  сдвиг  $I_c(H)$  на  $\frac{1}{2}$  периода



$T > T_\pi$

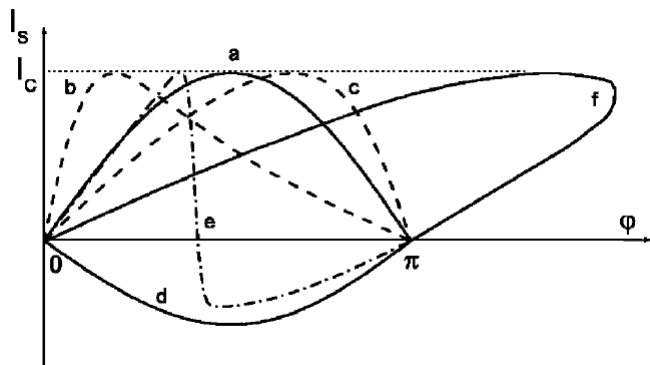
$T < T_\pi$

# Сканирующая СКВИД микроскопия: возникновение спонтанного тока и магнитного потока в массивах 0 - $\pi$ контактов



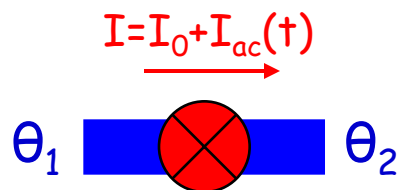
Цепочка ячеек с 3-мя  
 $\pi$ -контактами в каждой

# Измерение ток-фазовой зависимости контакта: $I(\varphi)$



$$I(\varphi) = I_c f(\varphi)$$

$$f(\varphi) = ?$$



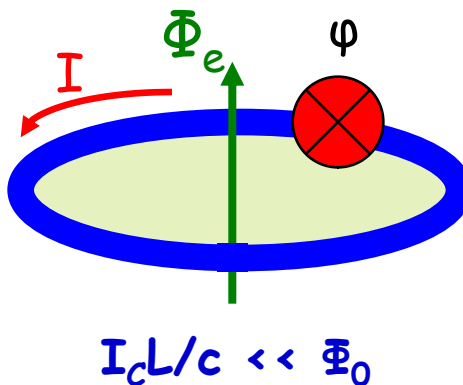
$$\varphi = \theta_1 - \theta_2$$

$$I_0 = I_c f(\varphi_0)$$

$$V_{ac} = I_{ac} Z(\varphi_0)$$

$Z(\varphi_0)$  - импеданс

$$0 < \varphi_0 < \pi/2$$



$$\Phi_i = \Phi_e - \frac{1}{c} IL$$

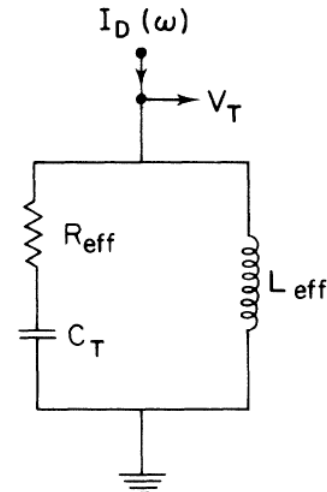
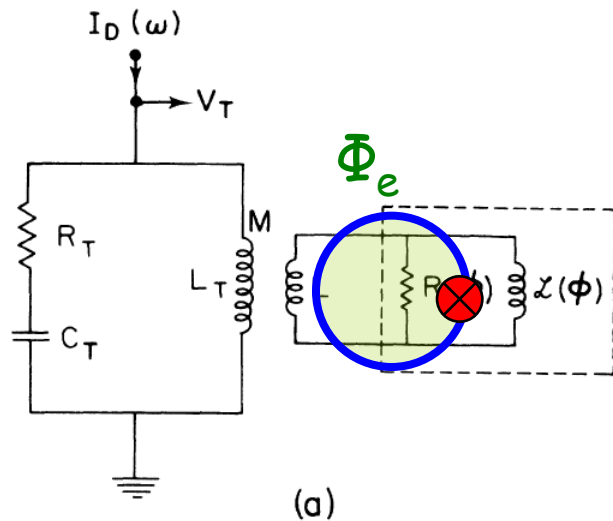
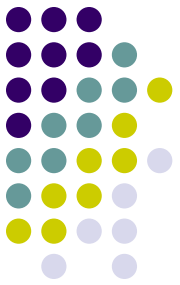
$$\varphi = 2\pi \frac{\Phi_i}{\Phi_0} \quad \varphi_e = 2\pi \frac{\Phi_e}{\Phi_0}$$

$$I = I_s + I_R + I_C$$

$$I_R, I_C \ll I_s$$

$$\varphi = \varphi_e - \beta f(\varphi) \quad \beta = 2\pi \frac{LI_c}{c\Phi_0}$$

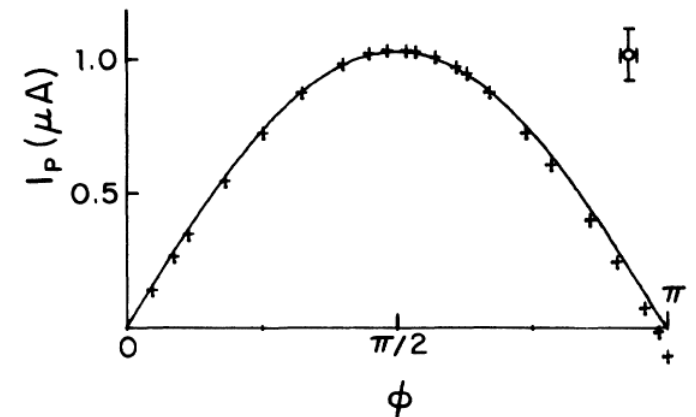
# Измерение ток-фазовой зависимости контакта : $I(\varphi)$ (ВЧ метод)



$L_{eff}$  зависит от  
нелинейной  
индуктивности  
перехода

$$\varphi + 2\pi \frac{LI(\varphi)}{\Phi_0} + \varphi_e = 2\pi n$$

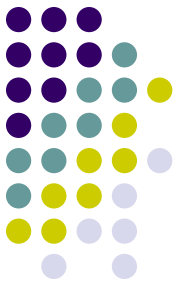
$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_1 \cos \omega t \quad \varphi_e = 2\pi \frac{\Phi_e}{\Phi_0}$$



$F \sim 10-30\text{MHz}$ ;  $L \sim 9-20\text{pH}$ ;  $Q \sim 80-600$   
 $I_c \sim 50\text{nA} - 3\mu\text{A}$

R.Rifkin, B.S.Deaver, PRB 1976

# Применение $\pi$ контактов и структур с $\pi$ -смещением



## 1. $\pi$ -СКВИДы:

тихий (quiet) СКВИД;

комплементарные устройства: при одних и тех же условиях могут находиться в двух различных состояниях:  $R=0$  и  $R \neq 0$ ;

бистабильная ячейка памяти  
( $\pm \Phi_0/2$ ; при переключении возникает  $\Phi_0$ )

## 2. $\varphi$ -контакт – обеспечивает смещение фазы на нужную ( $\varphi$ ) величину

## 3. Спин-вентильные устройства (S/F/N/F/S )