



**π - контакты
в сверхпроводниковой
электронике
(физические основы)**

A.B. Самохвалов



План

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



Эффект Джозефсона

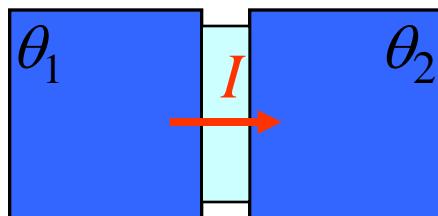
[B.D.Josephson, Phys.Lett. 1, 251 (1962)]

Эксперимент:

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

S.Shapiro (1963)

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



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

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

скакок фазы на барьере

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

Стационарный эффект: $I \leq I_c$

[через тунNELНЫЙ барьер возможно протекание сверхтока]

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

Нестационарный эффект: $I > I_c$

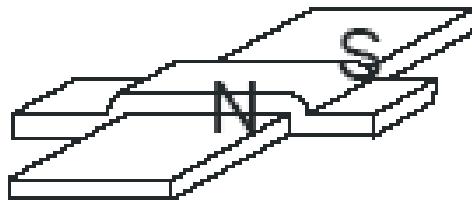
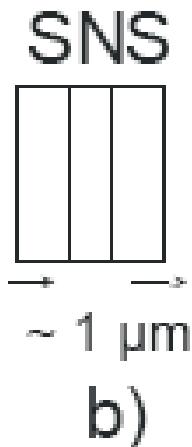
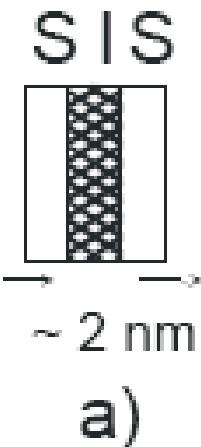
[джозефсоновская генерация]

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

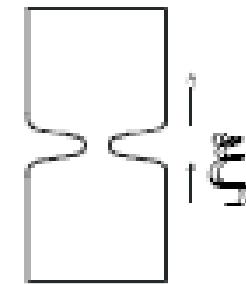
$$\frac{f}{V} = 483,6 \text{MHz} / mKV$$



Виды слабых связей



c)



d)

- 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 2π 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) $\Rightarrow I_s(\varphi) = -I_s(-\varphi)$
- $1 + 3 \Rightarrow I_s(\pi n) = 0$

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



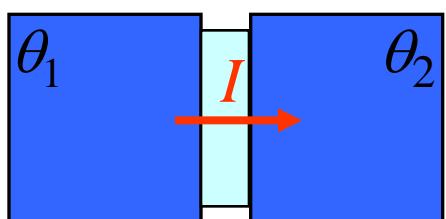
Ток-фазовая зависимость: “0” и “ π ” – контакты

0 – контакт:

$$I_c > 0$$

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

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



Основное состояние:

$$I = 0; \quad \varphi_o = 0$$

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

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

π – контакт:

$$I_c < 0$$

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

$$\begin{aligned} I(\varphi) &= -|I_c| \sin \varphi \\ &= |I_c| \sin(\varphi + \pi) \end{aligned}$$

Основное состояние:

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

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



π – КОНТАКТ: ИСТОРИЯ ВОПРОСА

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

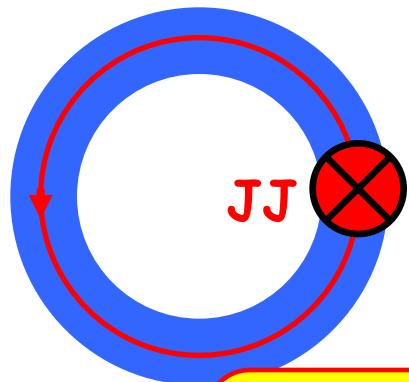
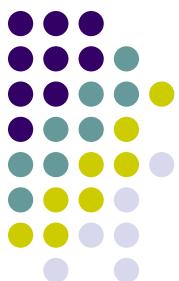
5 апреля 1977 г.

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 “π-контакт”

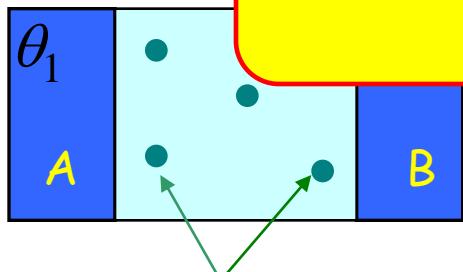


Туннельный гамильтониан:

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

I

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



Магнитные примеси:

туннелирование электронов
с переворотом спина

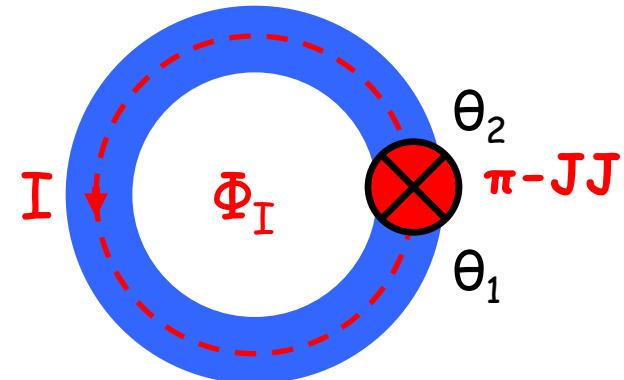
е электронов
спина
 $(A) \rightarrow k'(B)$

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

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



Спонтанный сверхток в кольце с π -контактом



L - индуктивность СП
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



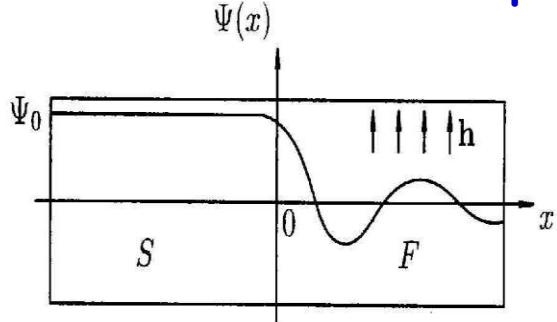
$$k < 1 \Rightarrow I \neq 0; \quad \varphi_0 \neq 0; \quad \Phi_I \neq 0$$



SFS переход

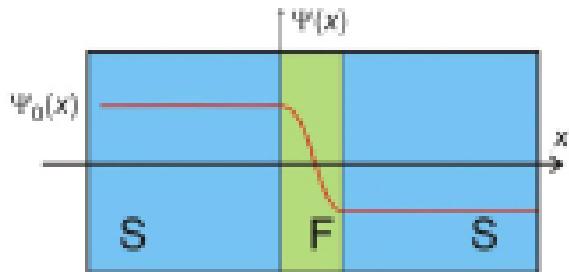
теория: 1990-1991, эксперимент: 2001

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 π -контакт



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

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

10 июля 1990 г.

π -ФАЗА В МАГНИТНЫХ СЛОИСТЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

А.В.Андреев, А.И.Буздин, Р.М.Озгур

Показано, что в слоистых сверхпроводниках с чередующимися сверхпроводящими и магнитными слоями основному состоянию системы может отвечать π -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

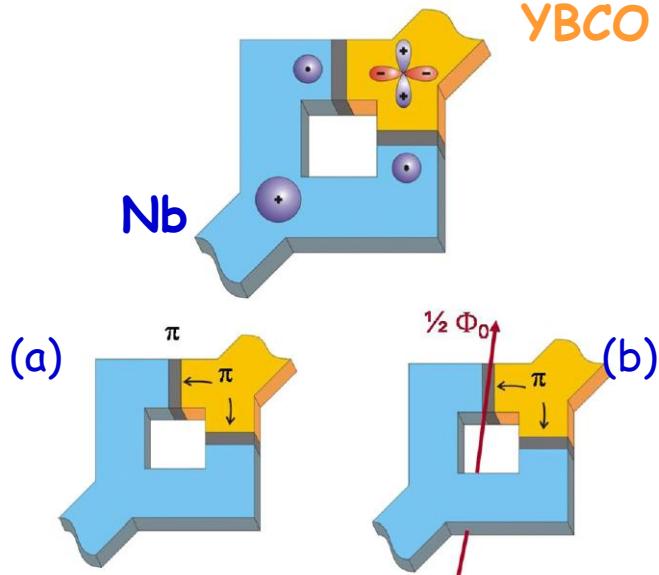
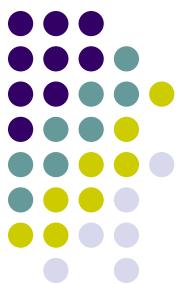
Coupling of Two Superconductors through a Ferromagnet: Evidence for a π Junction

V. V. Ryazanov,¹ V. A. Oboznov,¹ A. Yu. Rusanov,¹ A. V. Veretennikov,¹ A. A. Golubov,² and J. Aarts³

Cu_{0.48} Ni_{0.52}: $d_F \sim \xi_F \sim 20\text{-}30\text{nm}$

Bicrystal Grain-Boundary Junctions (d-wave)

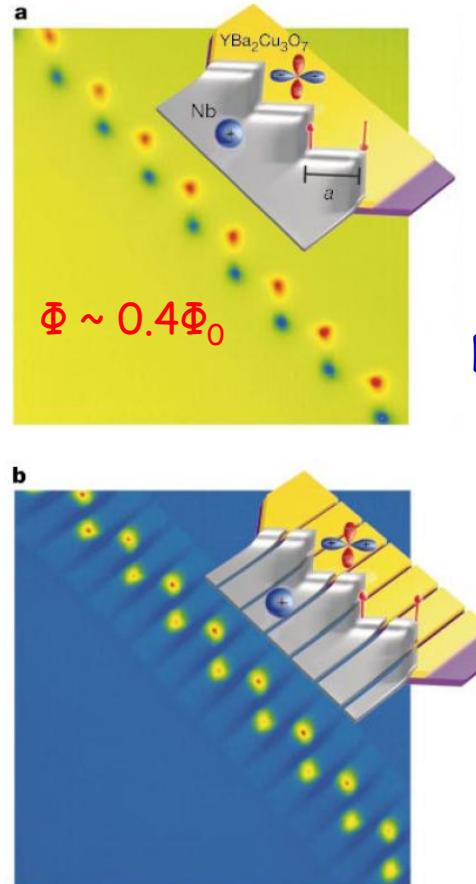
[H. Hilgenkamp, PRB 1996; J. R. Kirtley, PRL 1996;]



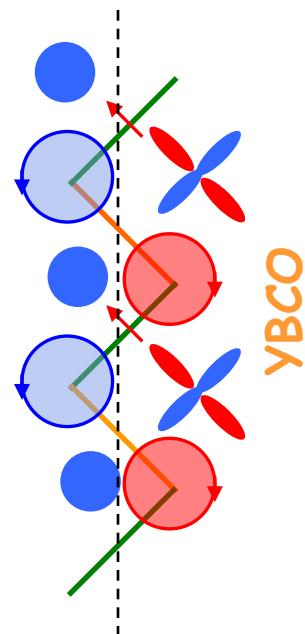
Джозефсоновские переходы
остаются обычными "0"-контактами,
а π -сдвиг из-за d-симметрии
параметра порядка компенсируется:
(a) скачком фазы на переходах
(b) спонтанным магнитным потоком

Структура с π -смещением

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



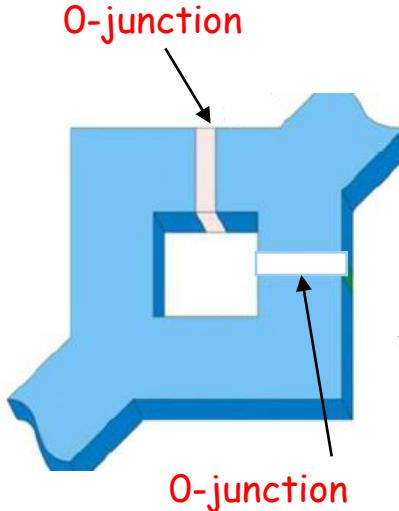
[H. Hilgenkamp, Nature 2003]



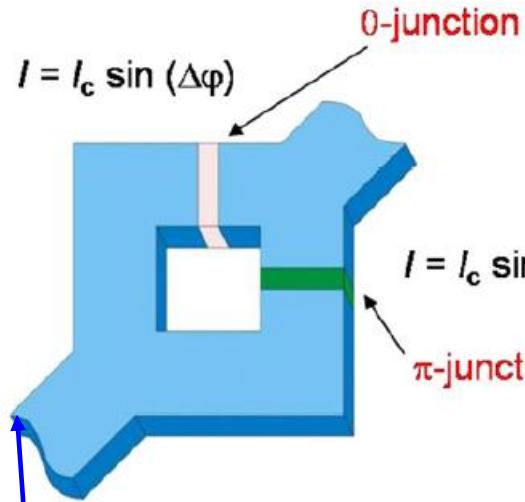
DC π -SQUID



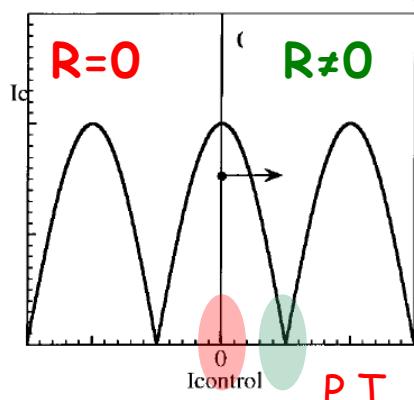
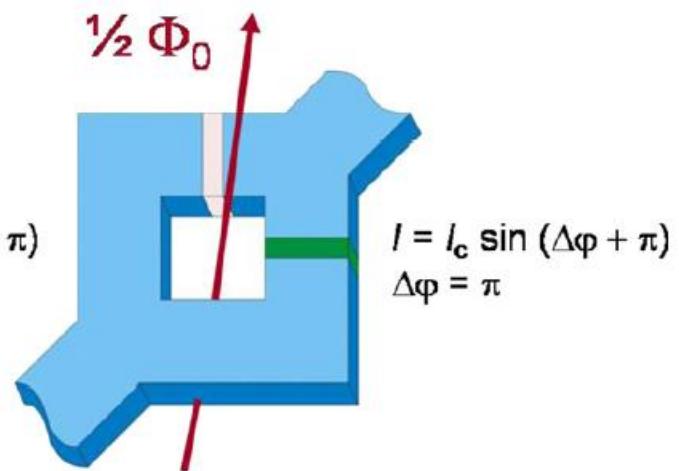
DC SQUID



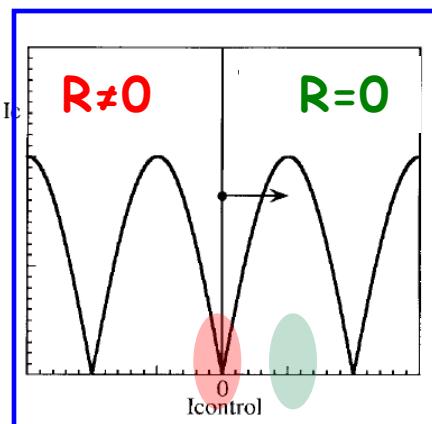
$$I_c L/c \ll \Phi_0 \quad \varphi_\pi \rightarrow 0$$



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



Обычный СКВИД

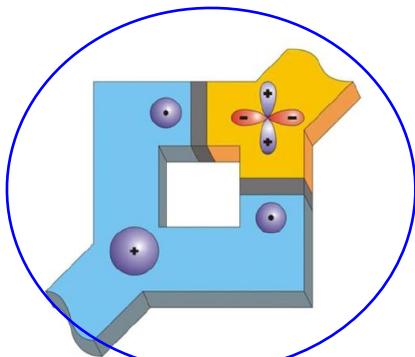


Комплементарный СКВИД

Quiet SQUID

Спонтанная генерация
«полуфлаксона»
состояние 2-кратно
вырождено
ячейка памяти

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

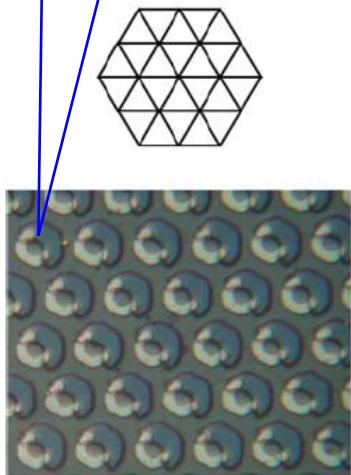


Size: $1 \times 1 \mu\text{m}^2$

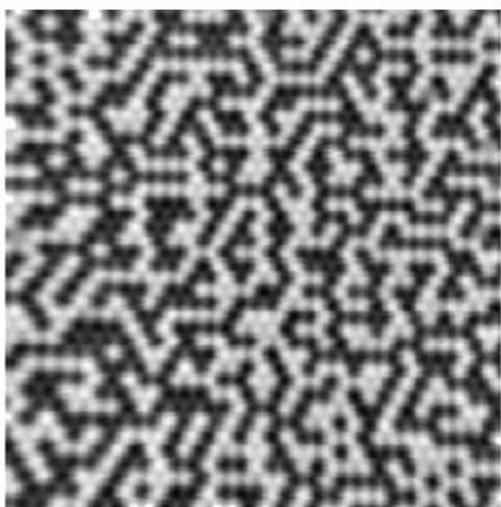
Flux: $\sim 0.25 \Phi_0$

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

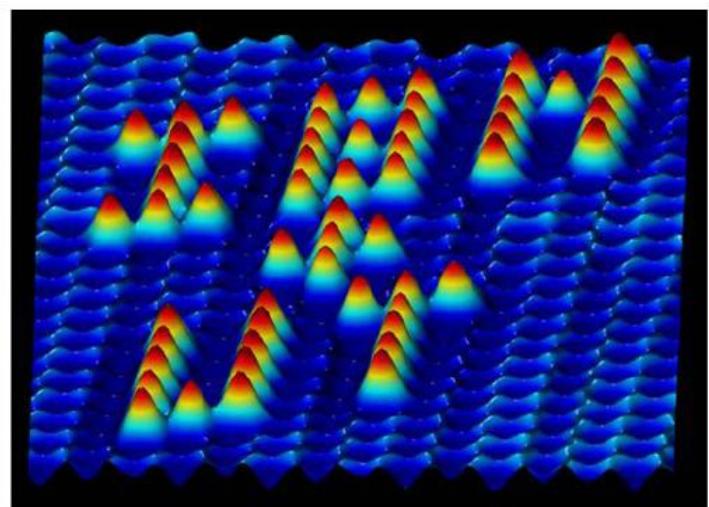
Scanning SQUID microscopy



70000 rings



Spontaneously formed
half-flux quanta



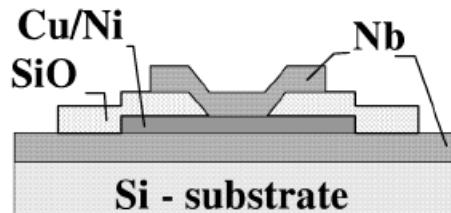


Диагностика π -состояния перехода

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: $I(\phi)$



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

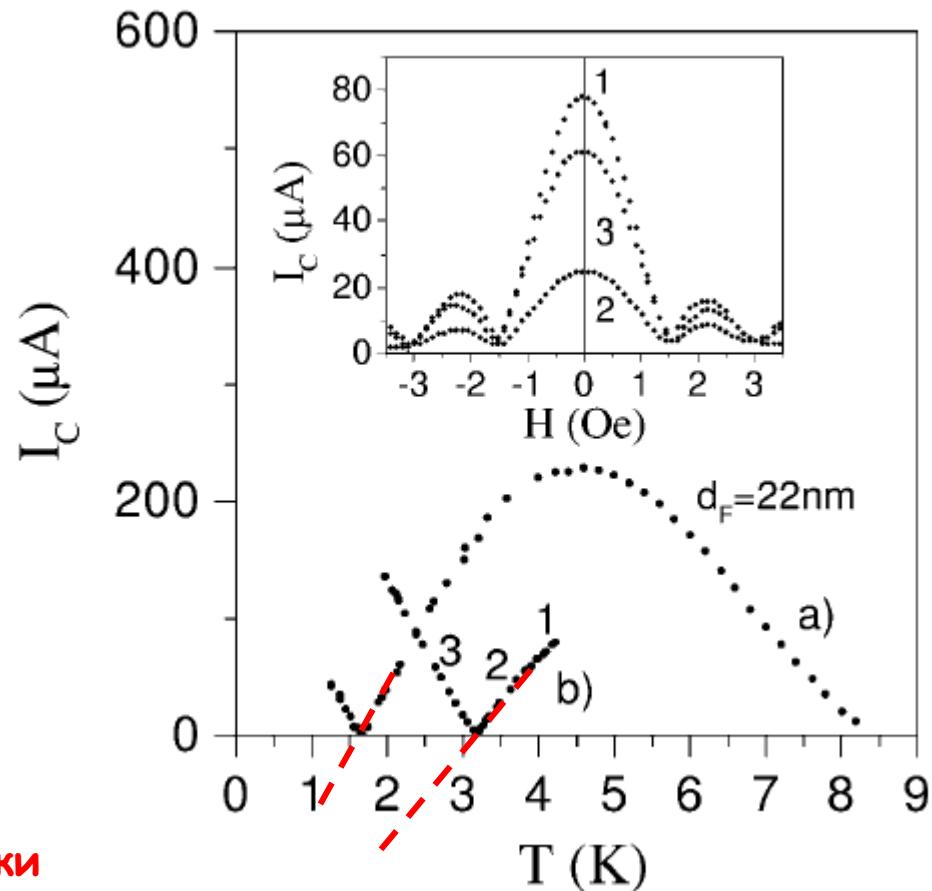


Nb/CuNi/Nb

!!! Но

можно измерить только величину, но не знак I_c

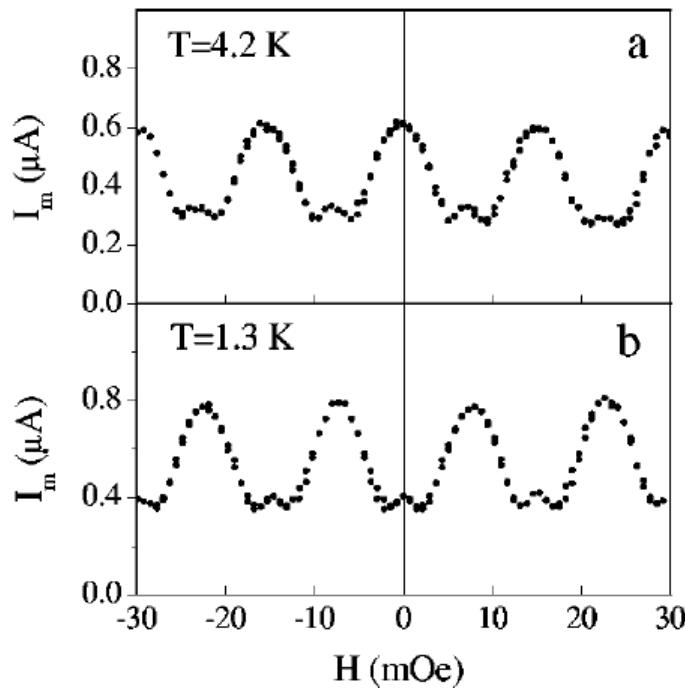
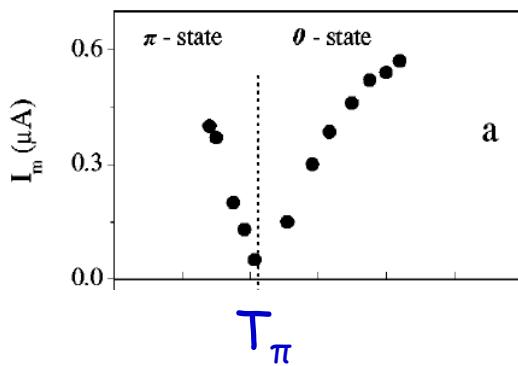
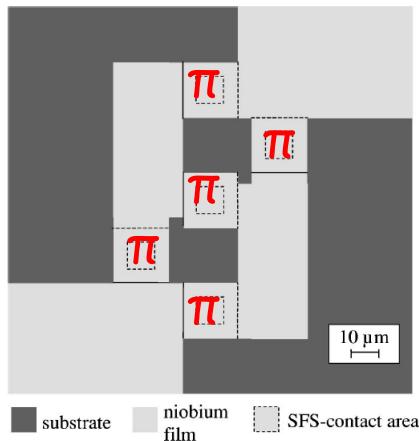
Для определения знака I_c необходимо использовать интерференционные методики





Изменение полевой зависимости критического тока $I_c(H)$

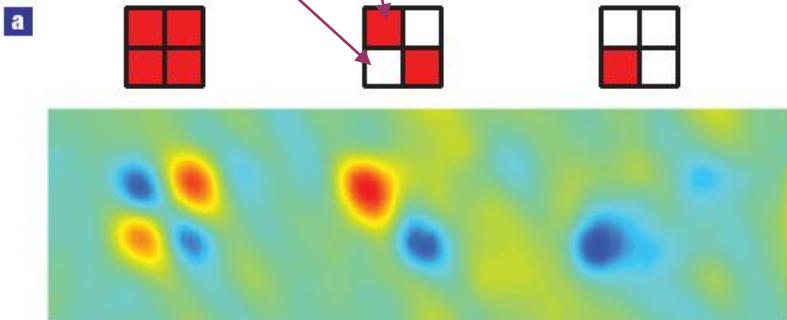
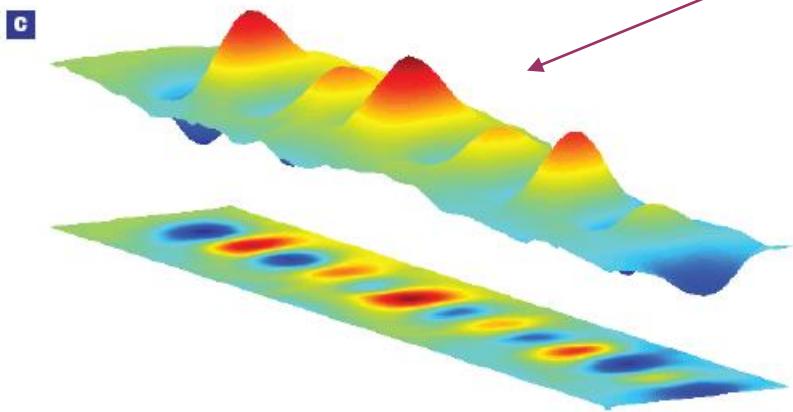
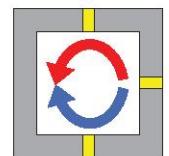
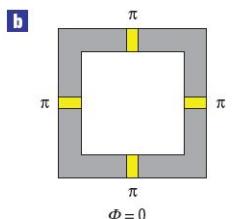
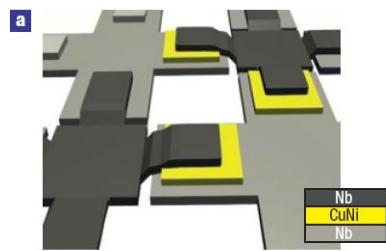
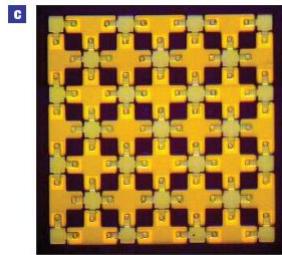
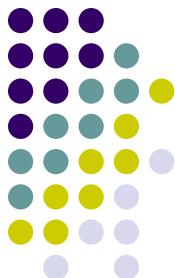
$I_c L/c \ll \Phi_0$ → сдвиг $I_c(H)$ на $\frac{1}{2}$ периода



$T > T_\pi$
 $T < T_\pi$

[V.V.Ryazanov, et al., PRB 2001]

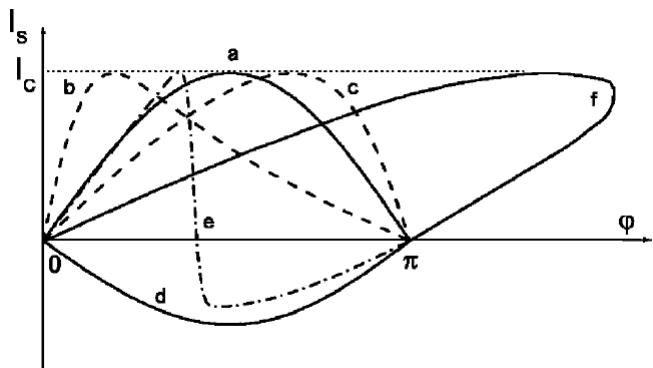
Сканирующая СКВИД микроскопия: возникновение спонтанного тока и магнитного потока в массивах 0 - π контактов



Цепочка ячеек с 3-мя
 π -контактами в каждой

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

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



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

$$\begin{array}{c} I = I_0 + I_{ac}(t) \\ \xrightarrow{\hspace{1cm}} \\ \theta_1 \quad \text{---} \quad \theta_2 \end{array}$$

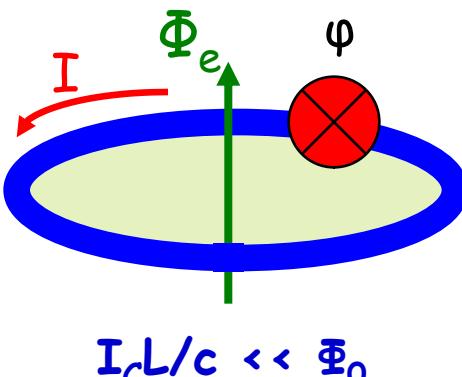
$$\varphi = \theta_1 - \theta_2$$

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

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

$Z(\varphi_0)$ - импеданс

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



$$\Phi_i = \Phi_e - \frac{1}{c} I L$$

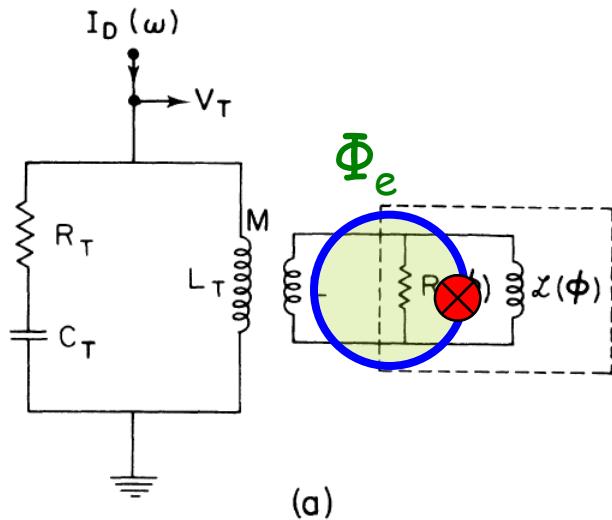
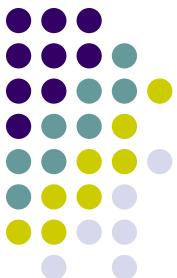
$$\varphi = 2\pi \frac{\Phi_i}{\Phi_0} \quad \varphi_e = 2\pi \frac{\Phi_e}{\Phi_0}$$

$$I = I_s + I_R + I_C$$

$$I_R, I_C \ll I_s$$

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

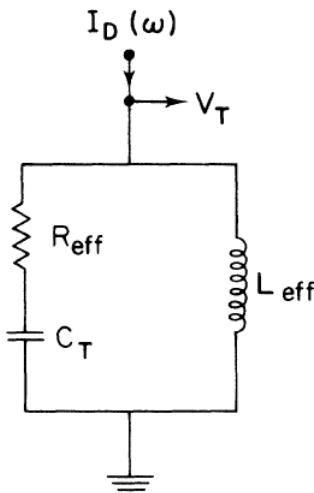
Измерение ток-фазовой зависимости контакта : I(φ) (ВЧ метод)



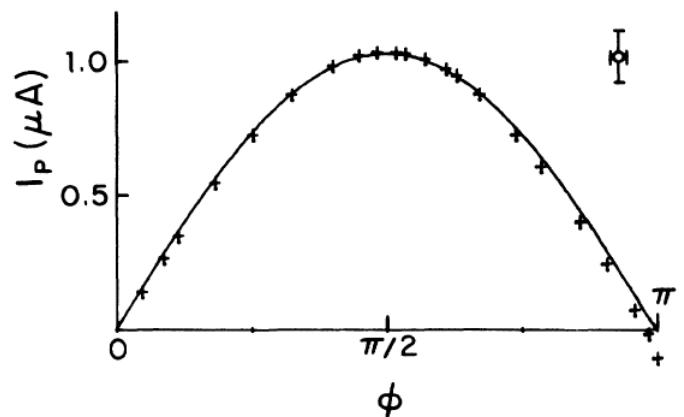
$$\varphi + 2\pi \frac{LI(\phi)}{\Phi_0} + \varphi_e = 2\pi n$$

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

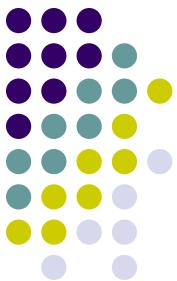
$F \sim 10\text{-}30\text{MHz}$; $L \sim 9\text{--}20\text{pH}$; $Q \sim 80\text{--}600$
 $I_c \sim 50\text{nA} - 3\mu\text{A}$



L_{eff} зависит от
нелинейной
индуктивности
перехода



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



Применение π контактов и структур с π -смещением

1. π -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 Φ_0)

2. ф-контакт – обеспечивает смещение фазы на нужную (ϕ) величину

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