Туннельные эффекты в сверхпроводниках как ключ к пониманию фундаментальных механизмов

Татьяна Евгеньевна Кузьмичева
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Центра высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга ФИАН

Литература для подготовки

1. Е.Л. Вольф. Принципы электронной туннельной спектроскопии, Киев, “Наукова думка”, 1990.

2. Туннельные явления в твердых телах, под редакцией Э. Бурштейна и С. Лундквиста, Москва, “Мир”, 1973.

3. Л. Солимар. Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение, Москва, “Мир”, 1974.

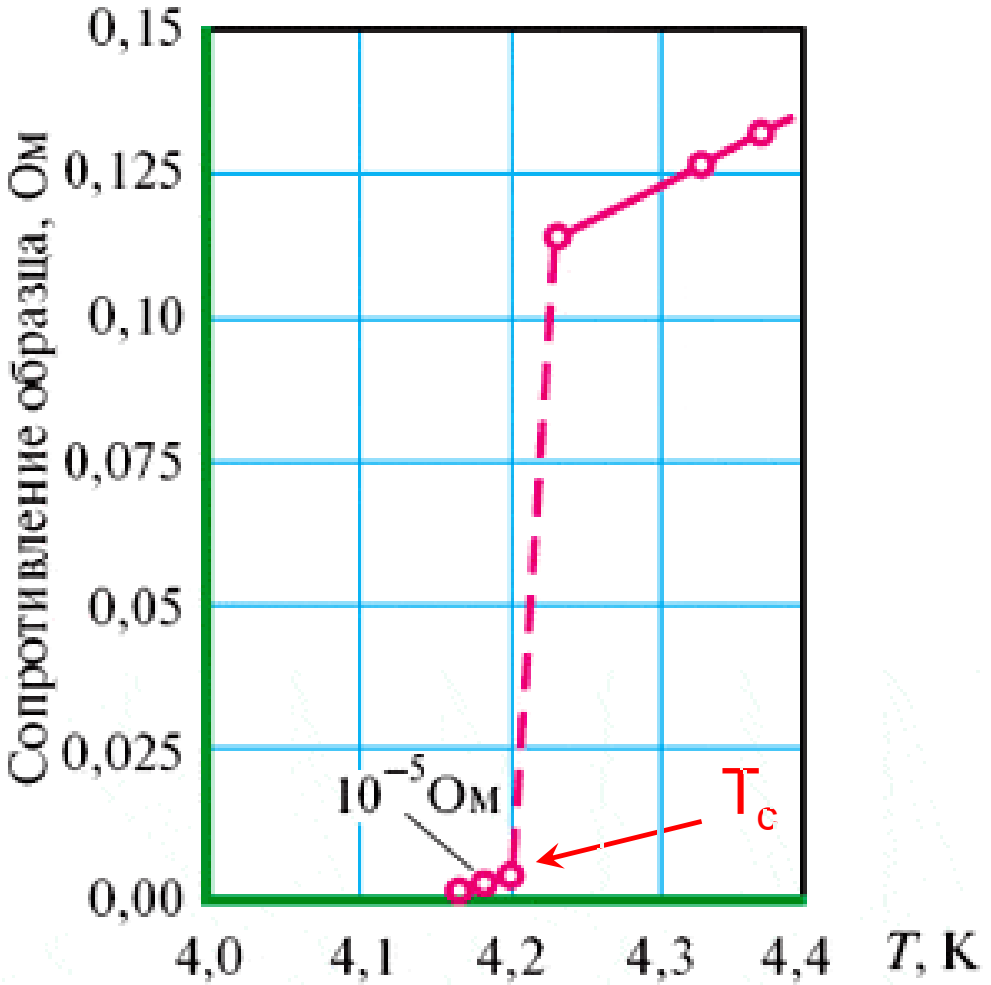
4. К.К. Лихарев. Введение в динамику джозефсоновских переходов, Москва, “Наука”, 1985.

5. А. Бароне, Дж. Патерно. Эффект Джозефсона. Физика и применение, Москва, “Мир”, 1984.

6. И.О. Кулик, И.К. Янсон. Эффект Джозефсона в сверх-проводящих туннельных структурах, Москва, “Наука”, 1970.

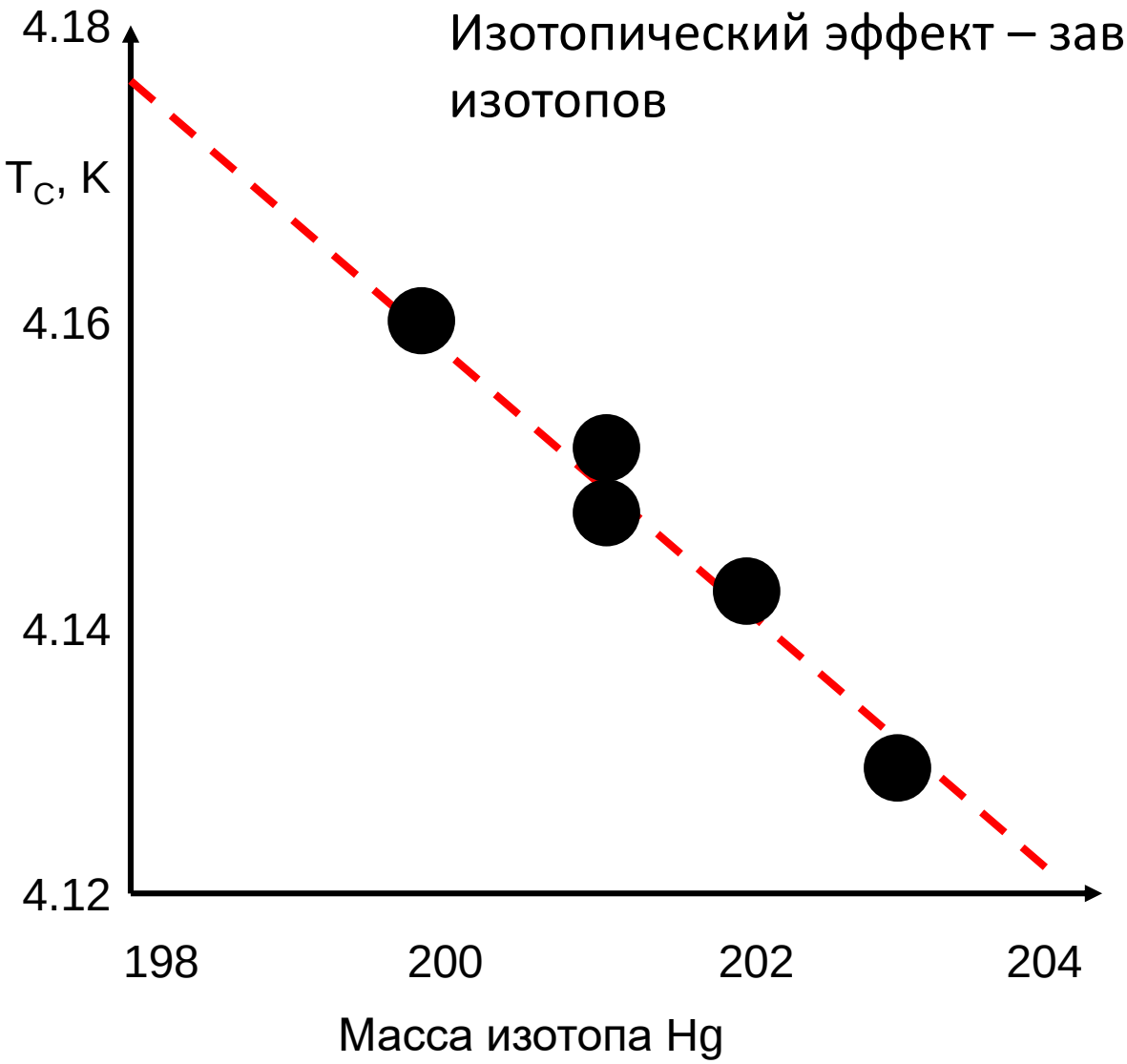
1911-1957: что известно о сверхпроводниках?

2. Сверхпроводник – идеальный проводник: ниже критической температуры T_c сопротивление обращается в ноль

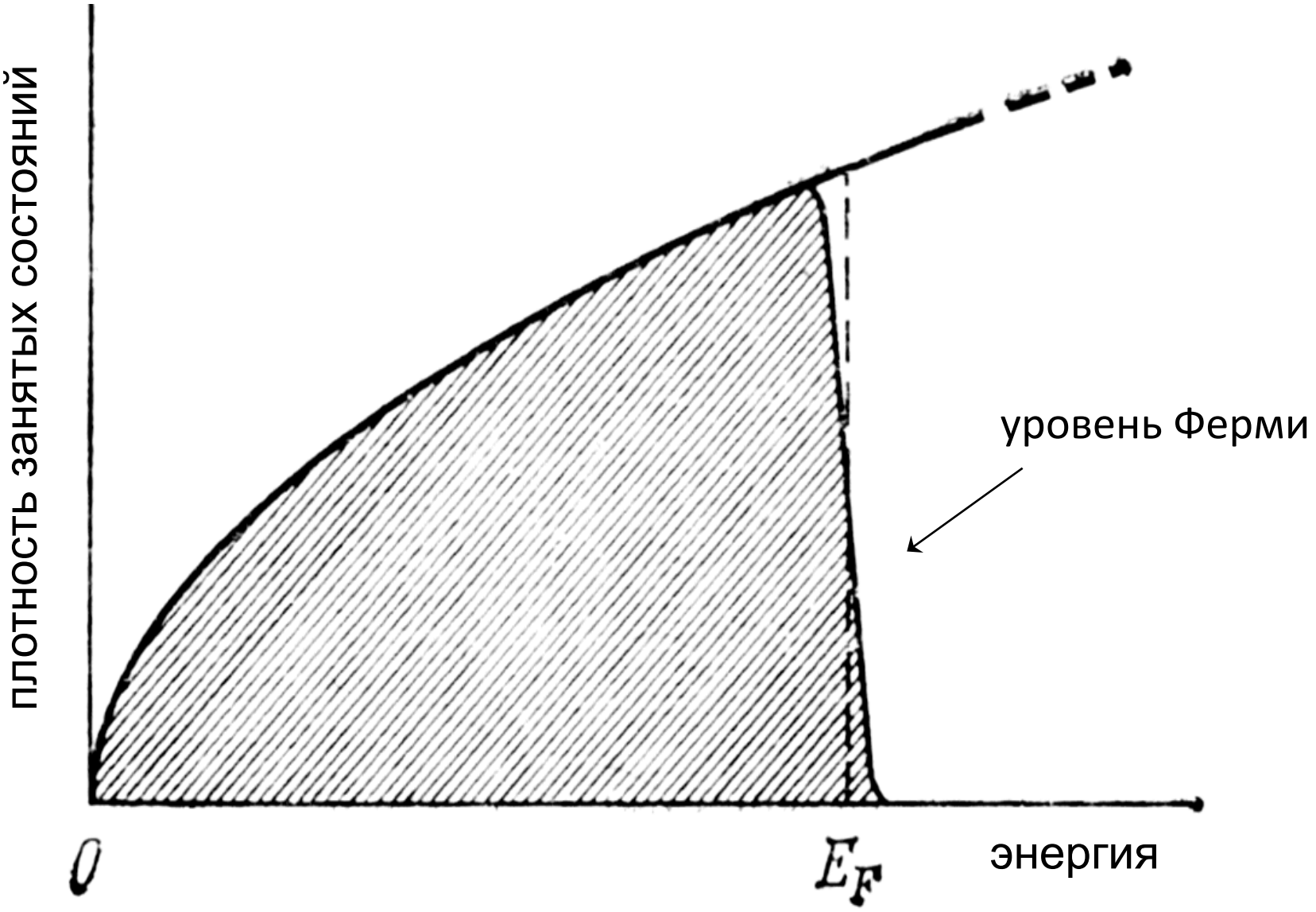


1911-1957: что известно о сверхпроводниках?

Изотопический эффект – зависимость T_c от массы изотопов

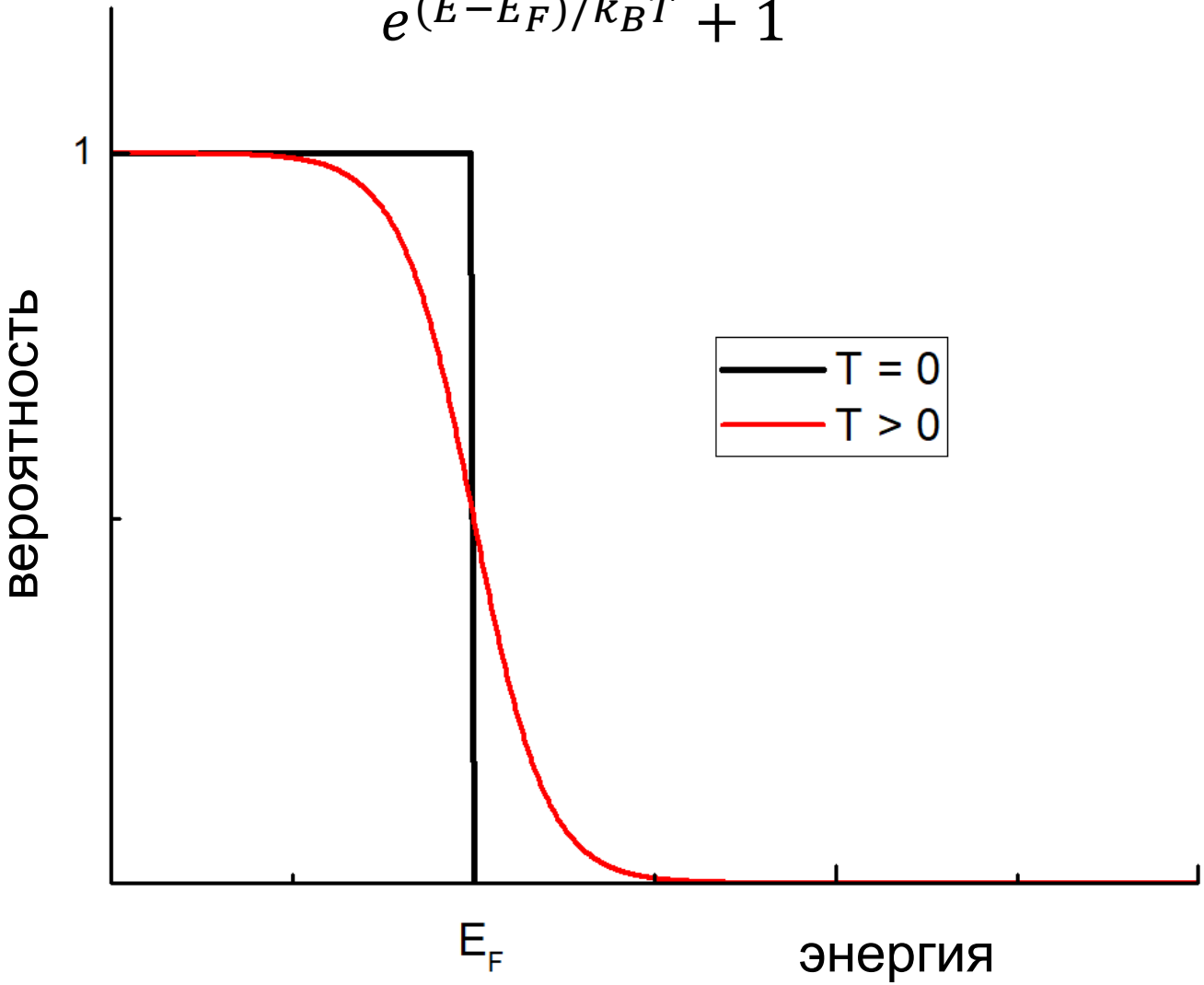


Мир фермионов



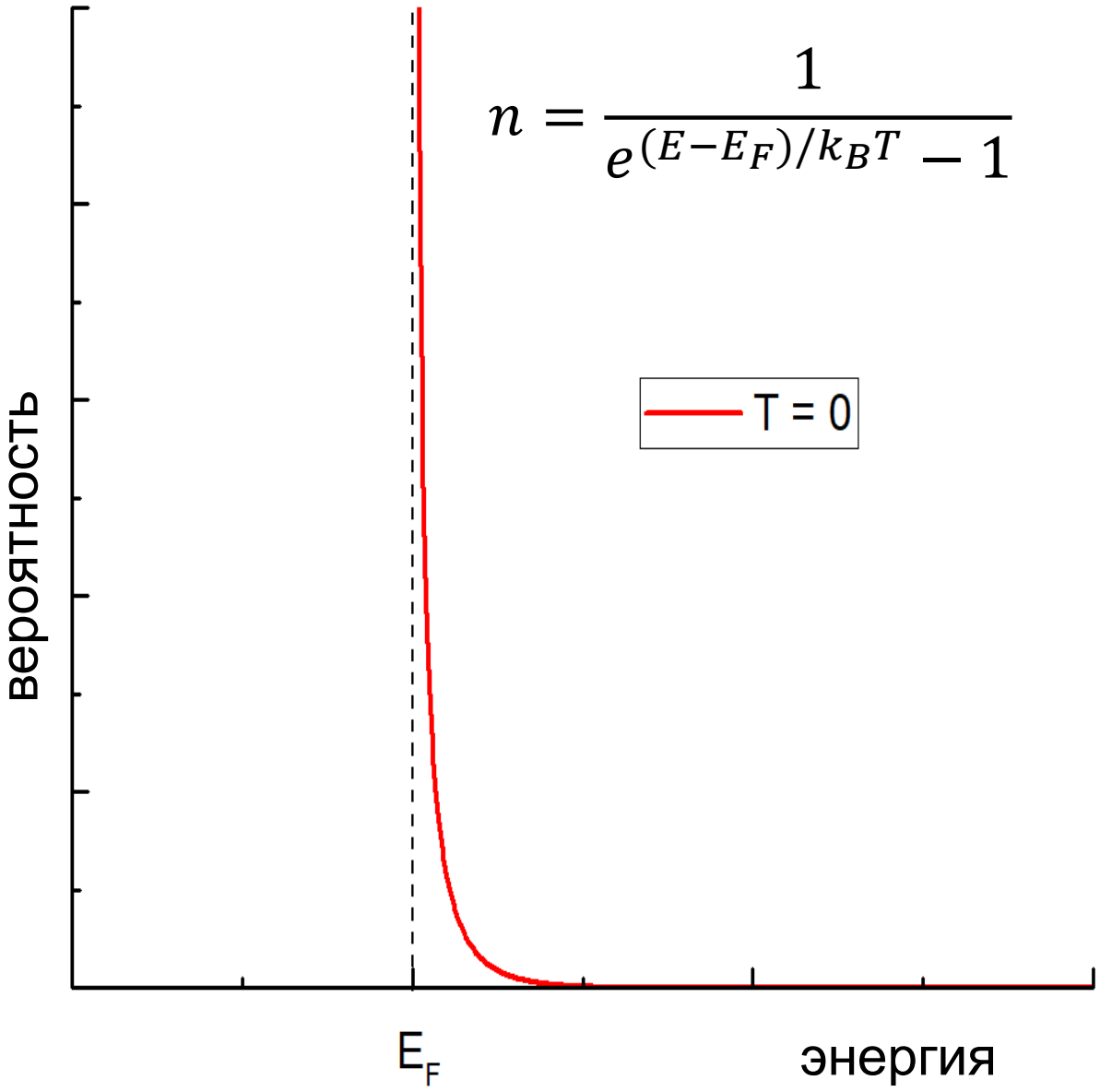
Мир фермионов

$$n = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_BT} + 1}$$



Мир бозонов

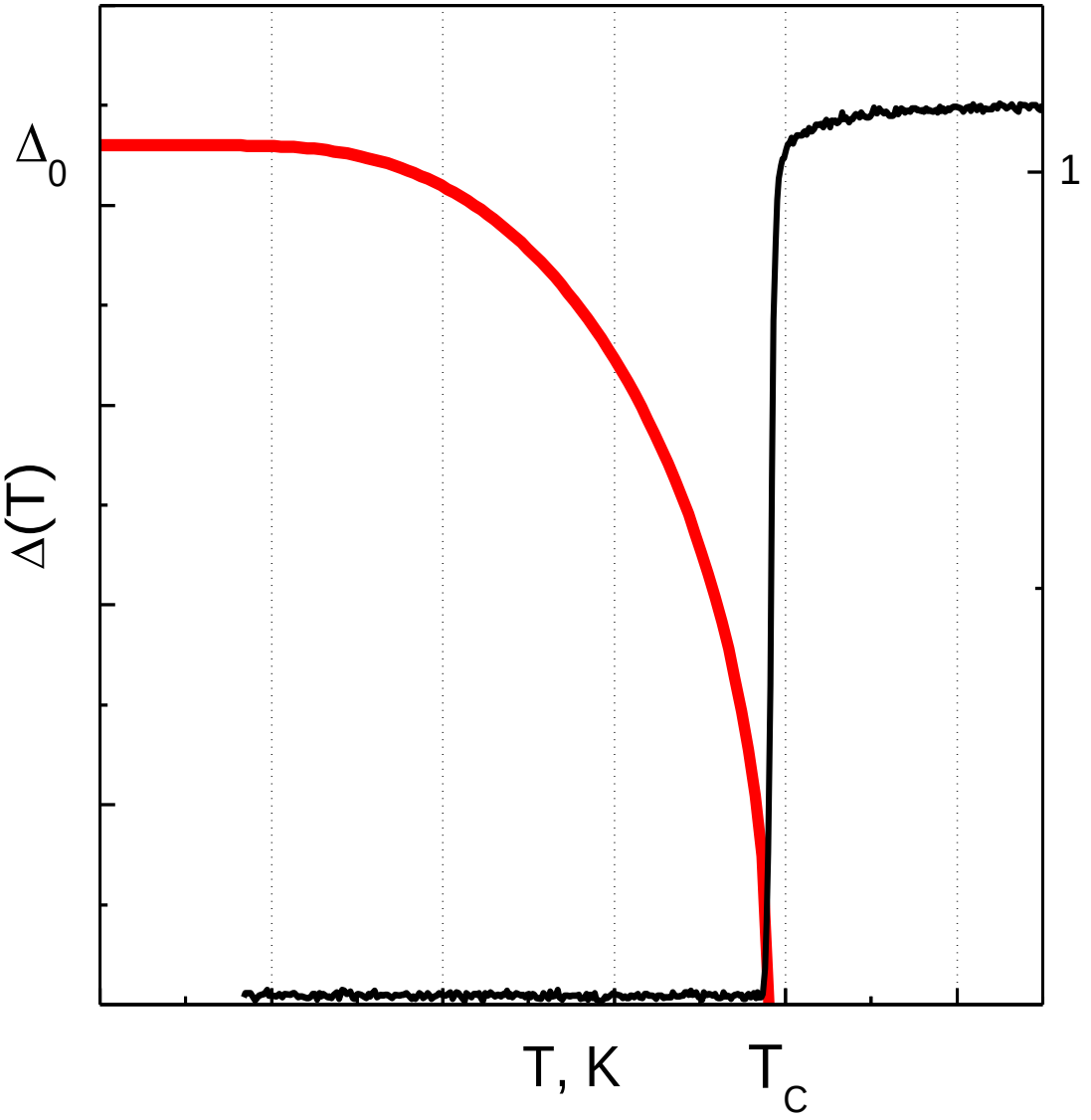
$$n = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_BT} - 1}$$



Длины когерентности некоторых сверхпроводников

с/п	T_c, К	ξ, Å ($T \to 0$)	2Δ, мэВ
Al	1.2	15000	0.38
In	3.4	4400	1.05
Sn	3.7	2300	1.2
Pb	7.2	5100	2.75
Nb	9.2	400	3.02
Nb_3Ge	23	30	4.16
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	96	16	25

Температурная зависимость энергии связи куперовской пары



$$\Delta(T) \approx \Delta_0 \sqrt{1 - (\frac{T}{T_C})^3}$$

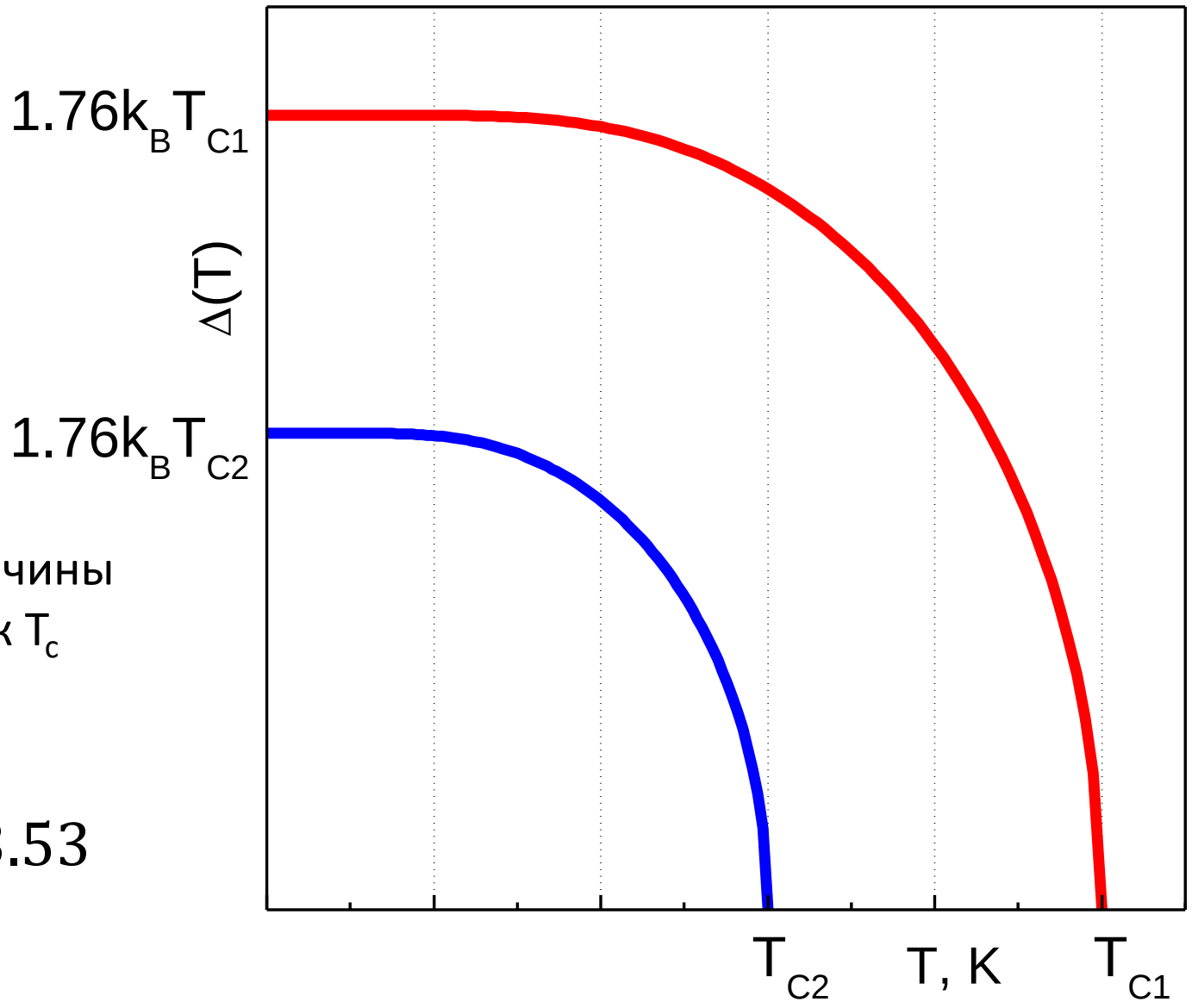
При $T \to T_c$:

$$\Delta^2(T \to T_C) \approx 3\Delta_0^2 \left[1 - \frac{T}{T_C}\right]$$

$$n_S(T \to T_C) \approx 4n_{S0} \left[1 - \frac{T}{T_C}\right]$$

$$\Rightarrow \Delta^2 \sim n_S$$

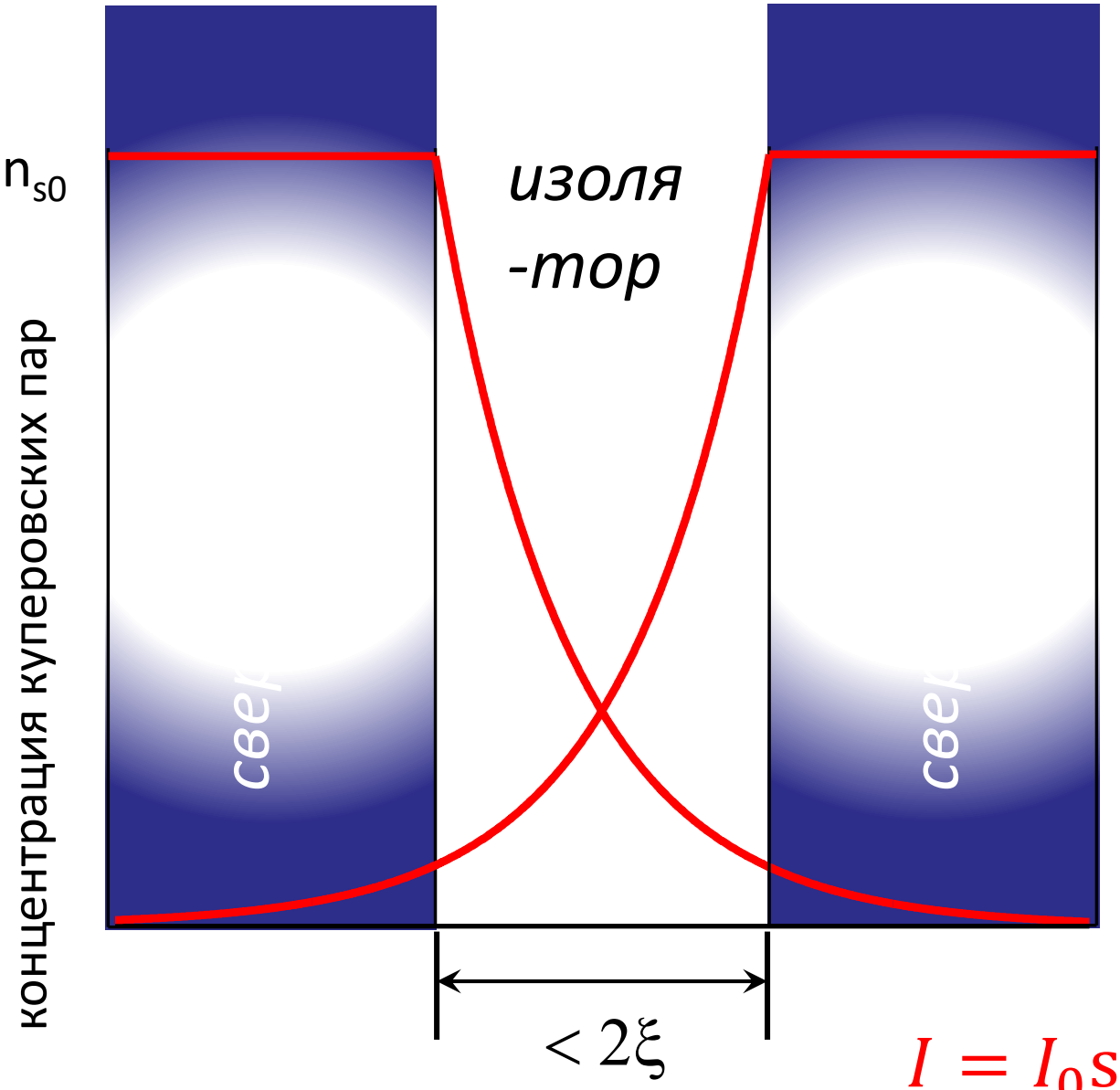
Температурная зависимость энергии связи куперовской пары



Отношение величины щели при T → 0 к T_c постоянно:

$$\frac{2\Delta_0}{k_B T_C} = 3.53$$

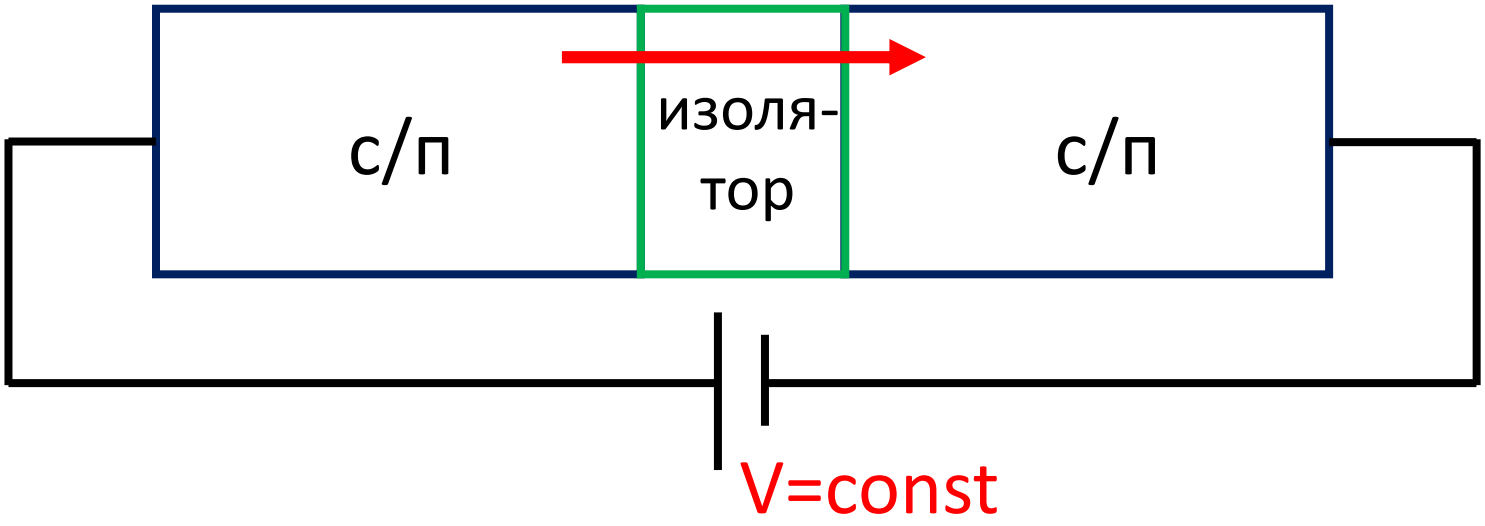
Контакт сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник



Эффект Джозефсона

$$I = I_0 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Джозефсоновский контакт – перестраиваемый генератор напряжение-частота

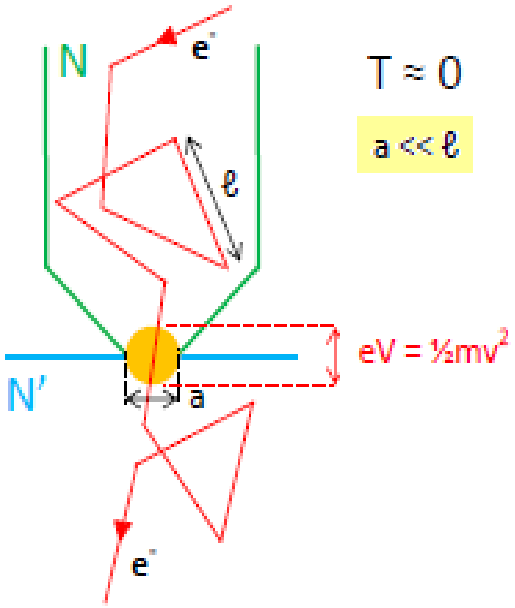


$$\hbar\omega = 2eV$$

$$\frac{2e}{\hbar} \approx 484\ \text{ГГц/мВ}$$

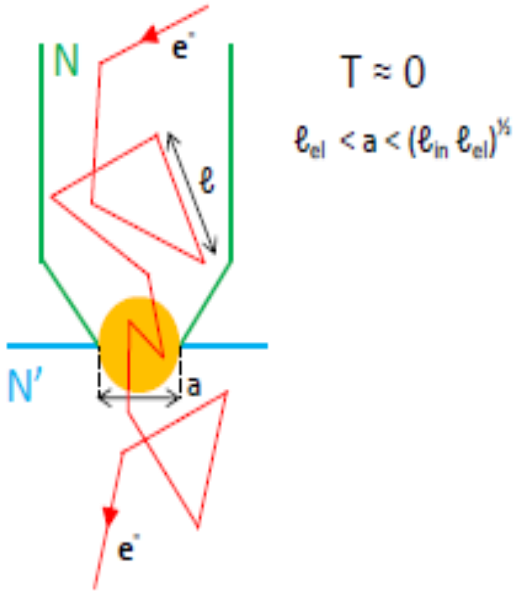
Типы точечных контактов

шарвиновский (баллистический)



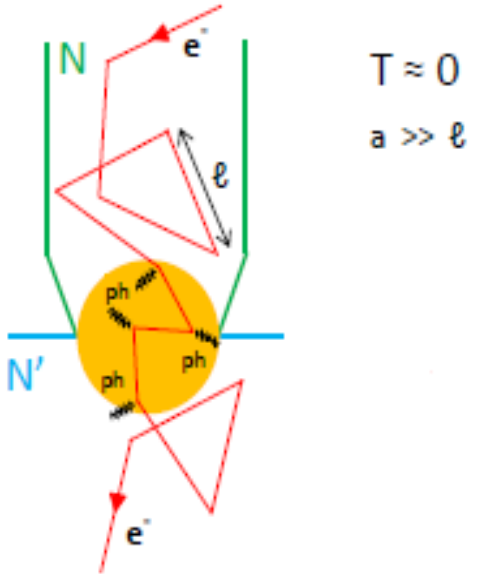
$$R_S = \frac{4\rho l}{3\pi a^2} \approx R_M \frac{l}{a}$$

промежуточный



$$R = \frac{4\rho l}{3\pi a^2} + \Gamma(K)\frac{\rho}{2a}$$

максвелловский (термический)



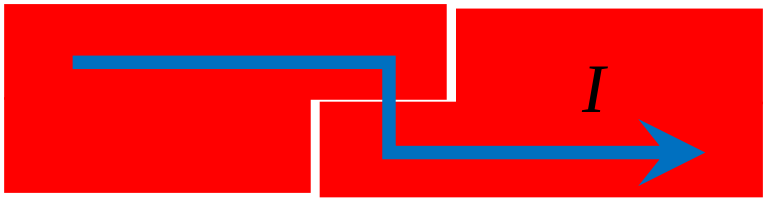
$$R_M = \frac{\rho}{2a}$$

D. Daghero, R.S. Gonnelli, Supercond. Sci. Techn. **23**, 043001 (2010).

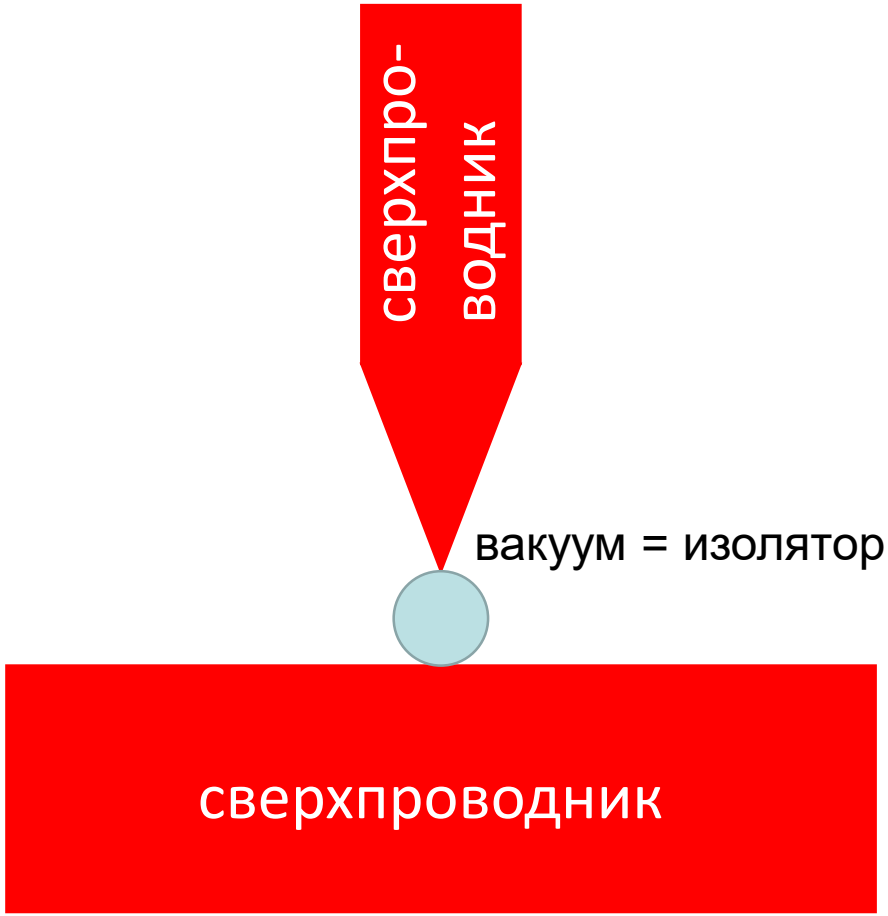
Как сделать туннельный контакт

1. Мезаструктура

2. Контакт на микротрещине “break-junction”

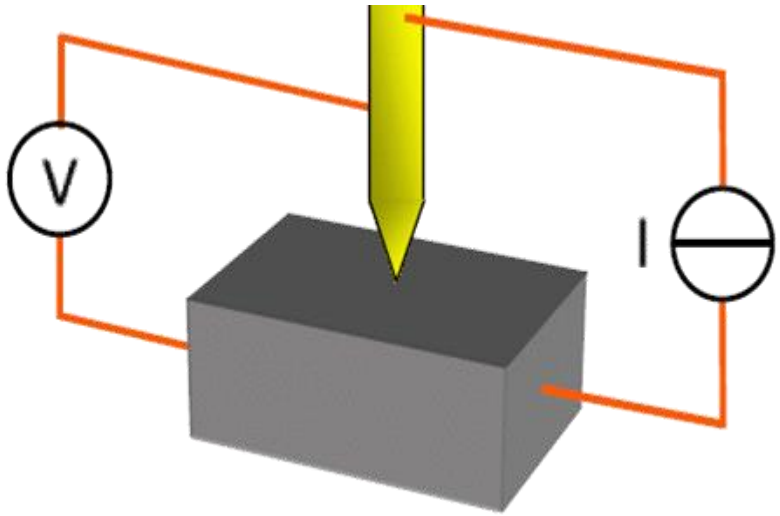


3. Прижимной контакт

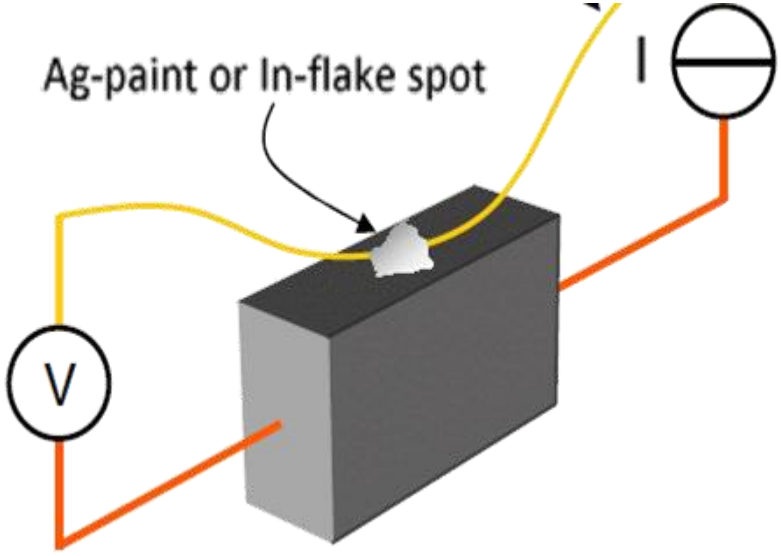


Как сделать туннельный контакт

3. Прижимной контакт



3а. Точечный контакт



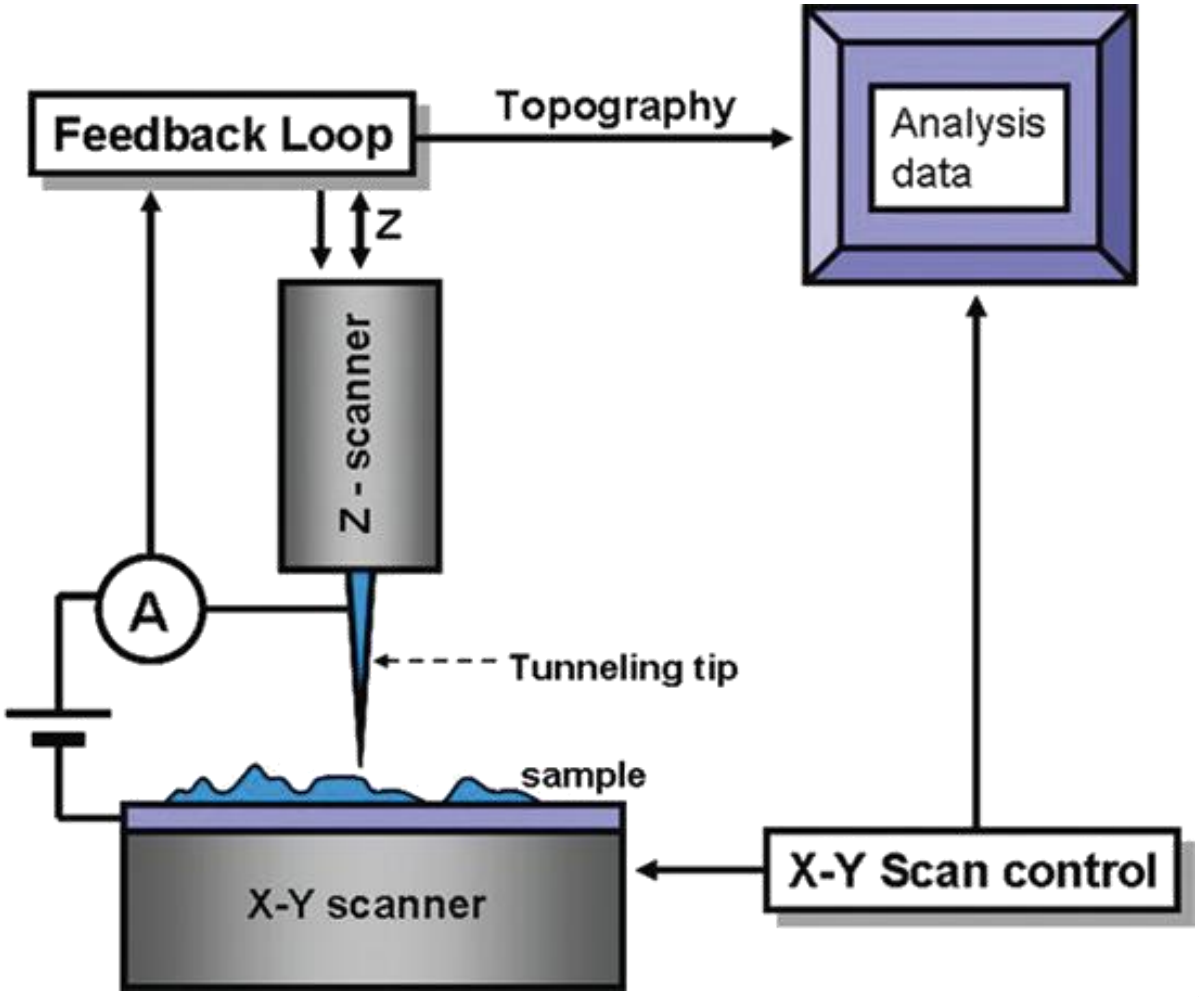
Методика разработана в 1974 году группой Янсона в Физико-техническом институте низких температур имени Б.И. Веркина, (ФТИНТ) АН СССР, Харьков.

И.К. Янсон, ЖЭТФ **66**, 1035 (1974)

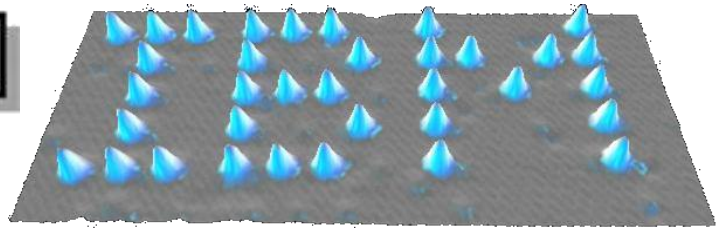
Схемы взяты из **D. Daghero, R.S. Gonnelli**, Supercond. Sci. Tech. **23**, 043001 (2011)

Как сделать туннельный контакт

3-точечное подключение



4. Сканирующий туннельный микроскоп



G. Binnig, H. Rohrer, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **40**, 178 (1982);
G. Binnig, H. Rohrer, *et al.*, Physica B **127**, 37 (1984).