



# **Сверхпроводимость: сверхлюди, сверхэффекты и сверхматериалы**

**сверхпопулярная лекция**

**Татьяна Евгеньевна Кузьмичева**  
старший научный сотрудник Центра  
высокотемпературной  
сверхпроводимости и квантовых  
материалов им. В.Л. Гинзбурга ФИАН

## Литература для подготовки

В.Л. Гинзбург, Е.А. Андриюшин. Сверхпроводимость. Альфа-М, 2006.

Журнал "Успехи физических наук" (УФН):

А.А. Абрикосов. *Сверхпроводники второго рода и вихревая решетка.* том **174**, Стр. 1234, 2004 г.

В.Л. Гинзбург. *О сверхпроводимости и сверхтекучести.* том **174**, Стр. 1241, 2004 г.

В.Л. Гинзбург. *Сверхпроводимость и сверхтекучесть.* УФН, том **167**, стр. 429, 1997 г.

М. Тинкхам. *Введение в сверхпроводимость.* Атомиздат, Москва, 1980.

В. Буккель. *Сверхпроводимость.* Мир, Москва, 1975.

# 1911-2019: сверхдостижения

7 нобелевских премий за основные открытия:

Х. Камерлинг-Оннес (1913),

Л.Д. Ландау (1962), Дж. Бардин, Д. Купер, Р. Шриффер (1972),

Б. Джозефсон (1973), П.Л. Капица (1978),

Г. Беднорц, А. Мюллер (1987),

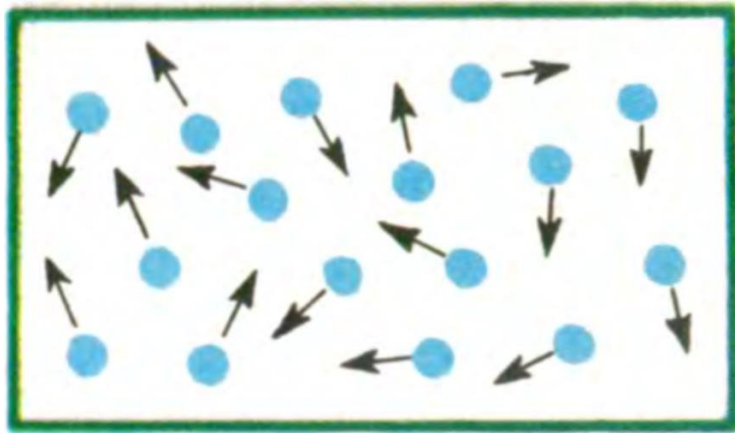
А.А. Абрикосов, В.Л. Гинзбург, Э. Легgett (2003)

Более 100 классов сверхпроводников

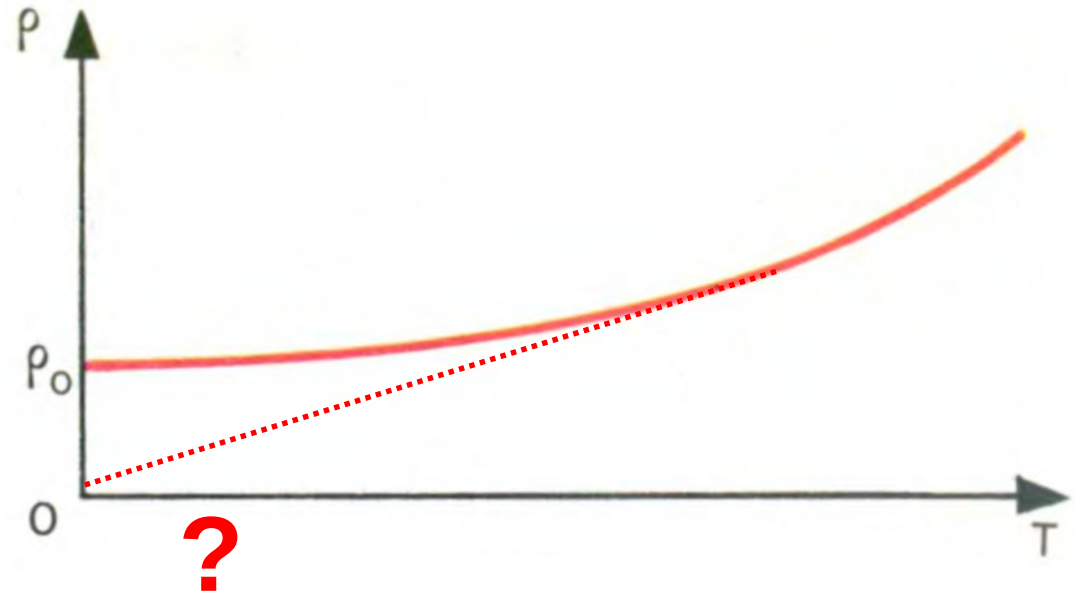
Критические температуры до  $-70^{\circ}\text{C}$ , магнитные поля до 200 Тл

Кабели на основе высокотемпературных сверхпроводников с критической плотностью тока до  $1000 \text{ A/mm}^2$

# Электрическое сопротивление



Газ свободных  
электронов в металле



$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Медь при комнатной температуре:  $\rho = 1.75 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ,  
при температурах, близких к нулю, -  $\rho = 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{см}$

# Открытие сверхпроводимости

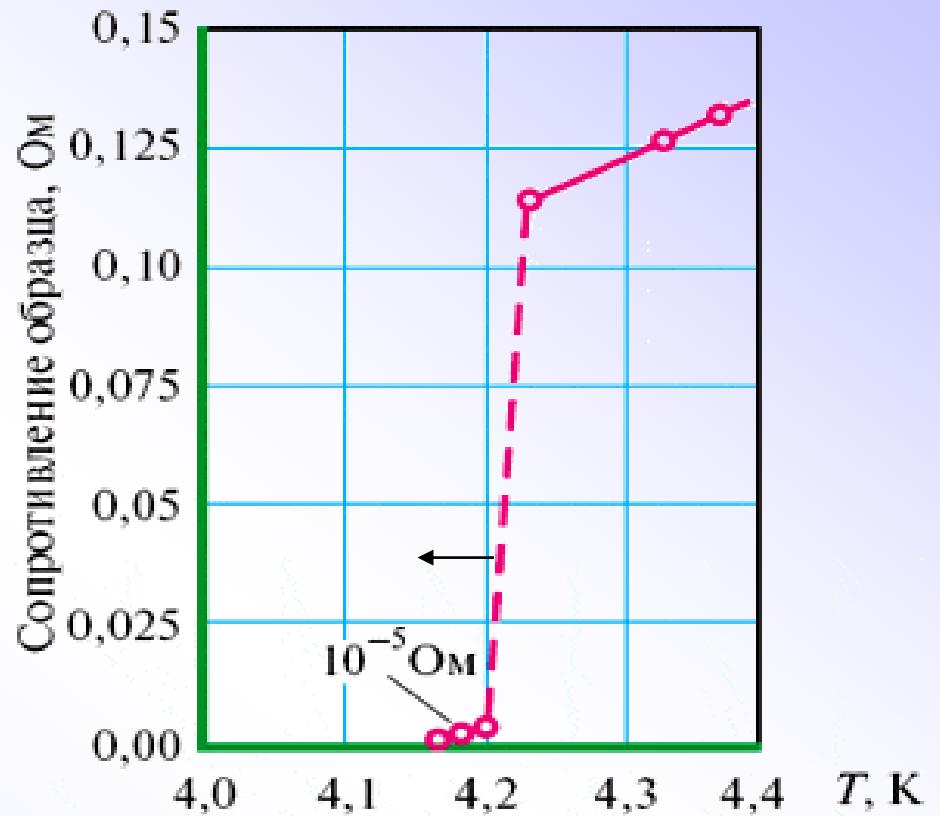
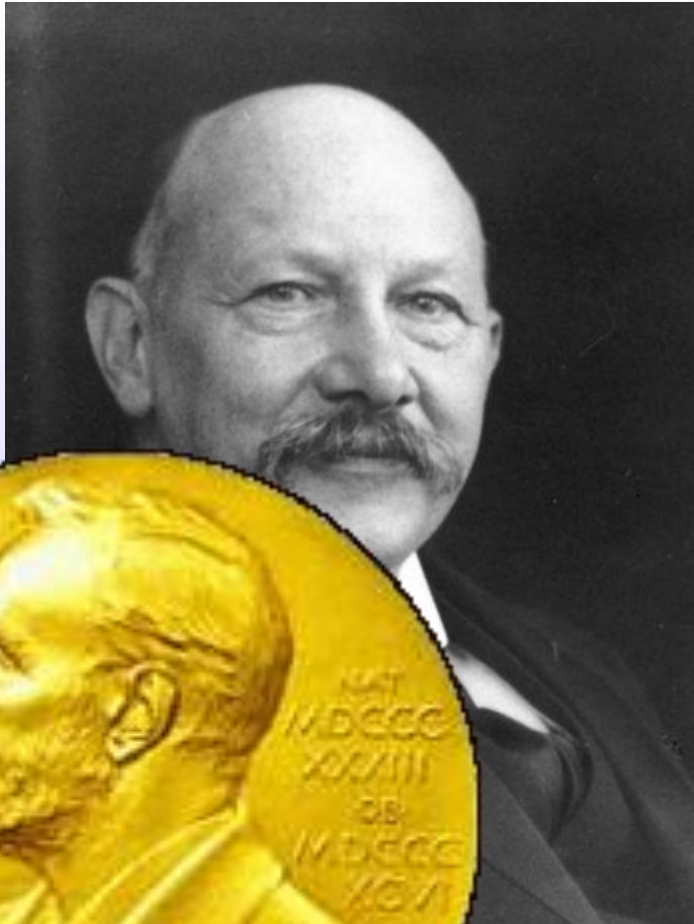


Рисунок из одной из первых работ Оннеса, посвященной сверхпроводимости.

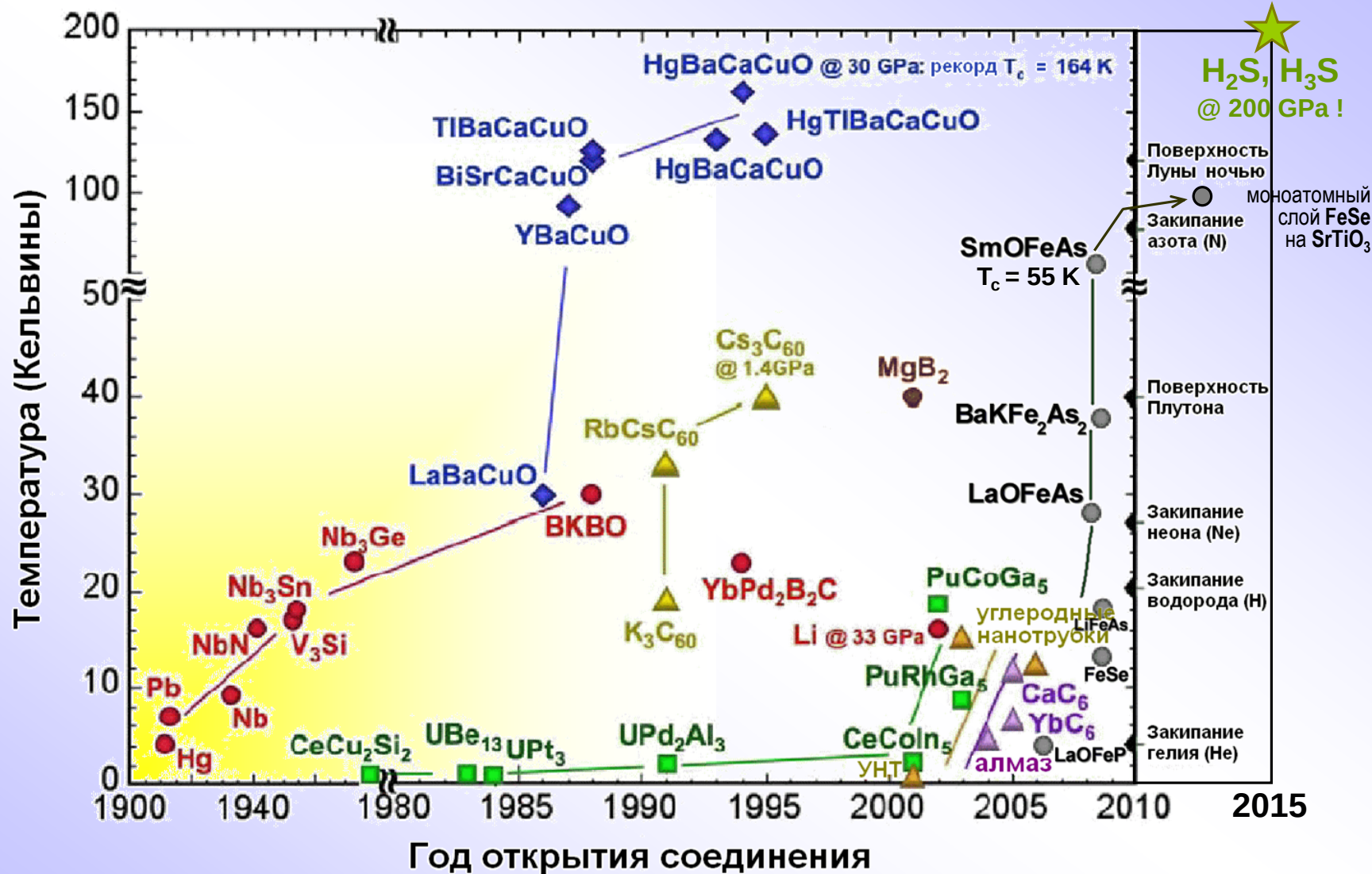
График надо сдвинуть на 0,05 K влево – у Оннеса была неточная шкала температур.

у Оннесу

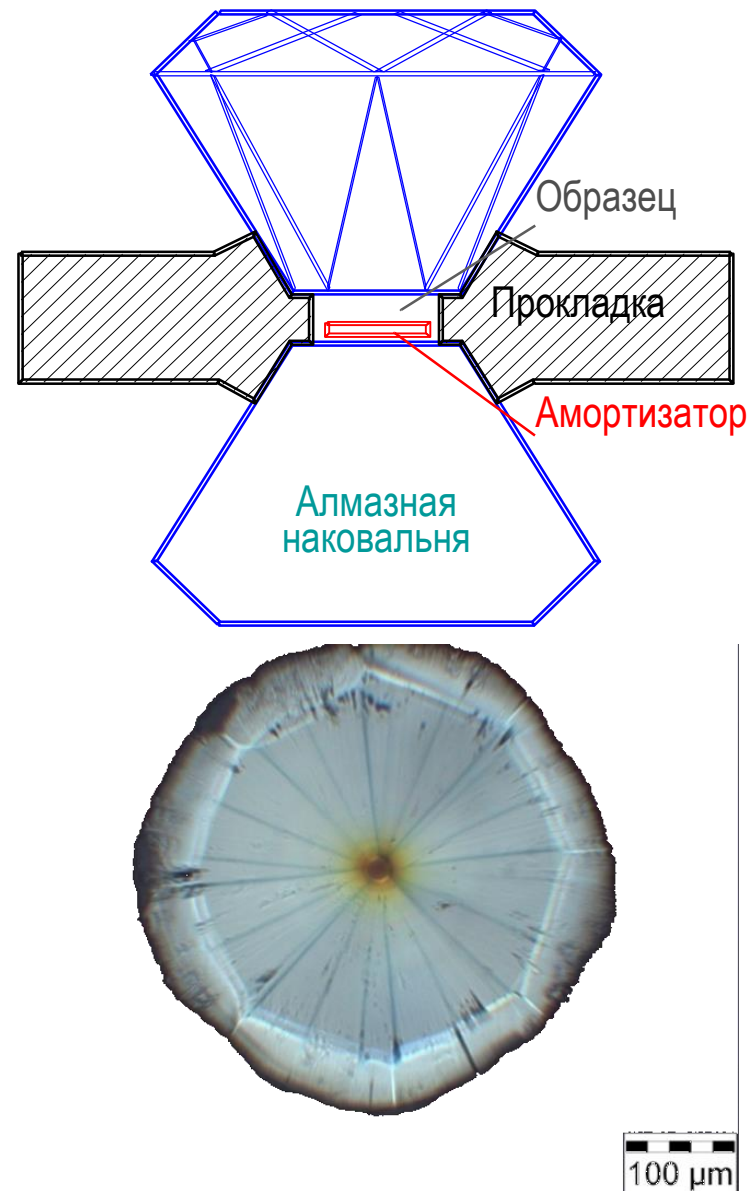
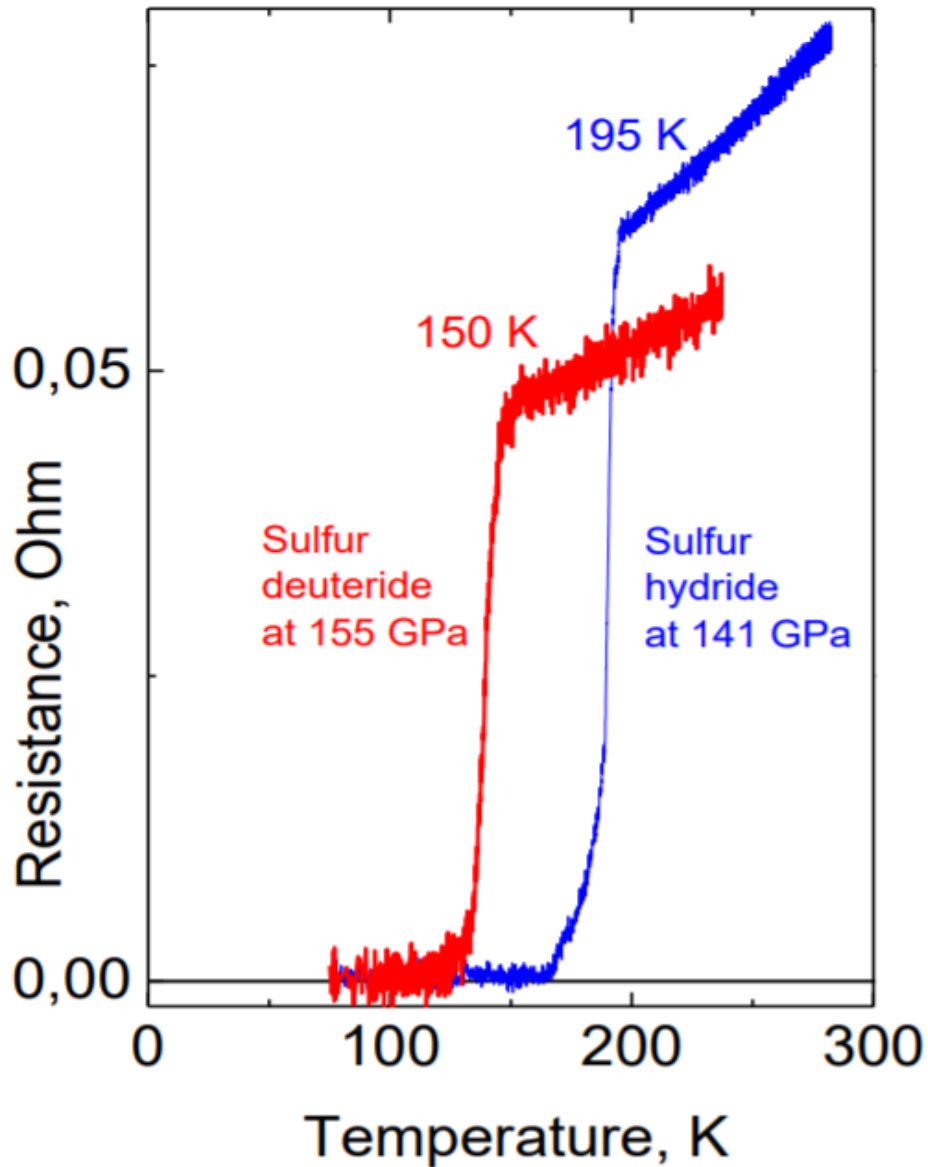
оду была присуждена Нобелевская премия.



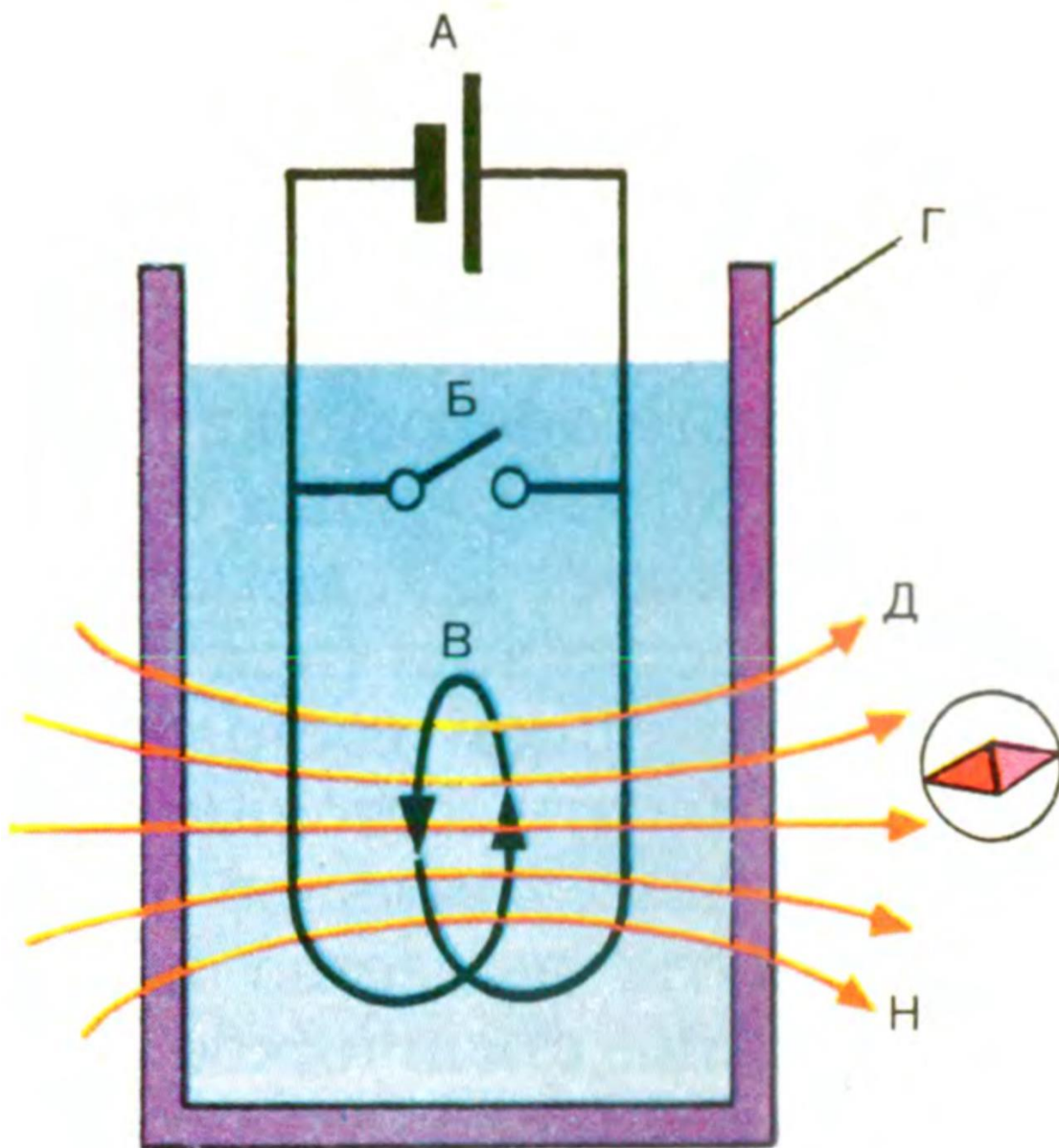
# Век открытий в сверхпроводимости



# Сверхпроводящий сероводород под давлением



# Действительно ли сопротивление равно нулю?

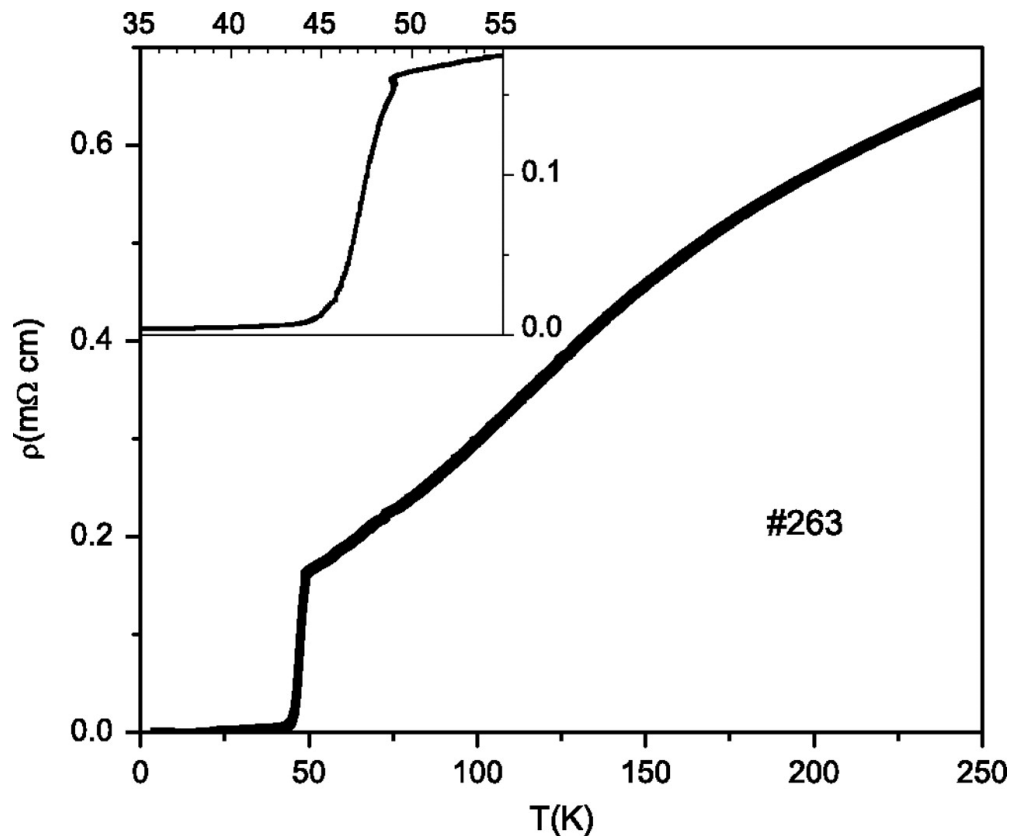


Опыт Х. Камерлинг-Оннеса:  
сверхпроводящее кольцо (В), по которому течет ток, в жидком гелии. Изменение тока со временем приводило бы к изменению магнитного поля, которое регистрировали стрелкой компаса.



# Характеристики сверхпроводника

1. Критическая температура  $T_c$  перехода в сверхпроводящее состояние, ниже которой сопротивление обращается в ноль



*То есть сверхпроводник  
– это «идеальный  
проводник»?*

# Нет, это и «идеальный диамагнетик»!

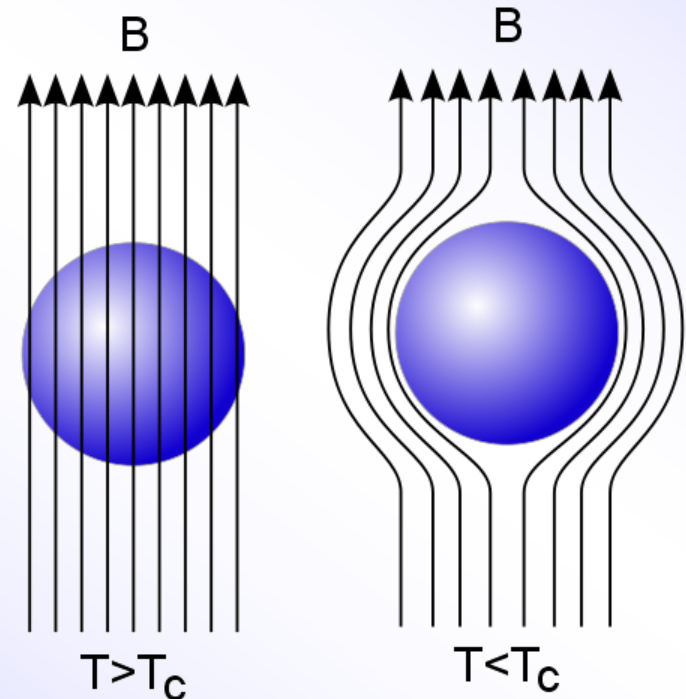
В **1933** году Уолтер Мейснер и Роберт Оксенфельд обнаружили, что сверхпроводник выталкивает не очень сильное магнитное поле при температурах ниже  $T_c$ . До этого считалось, что экранировка магнитного поля в металлах практически невозможна.



*Уолтер Мейснер*



*Роберт Оксенфельд*



# Эффект Мейснера – Оксенфельда

Этот эффект настолько силен, что  
сверхпроводник может левитировать  
над постоянным магнитом...





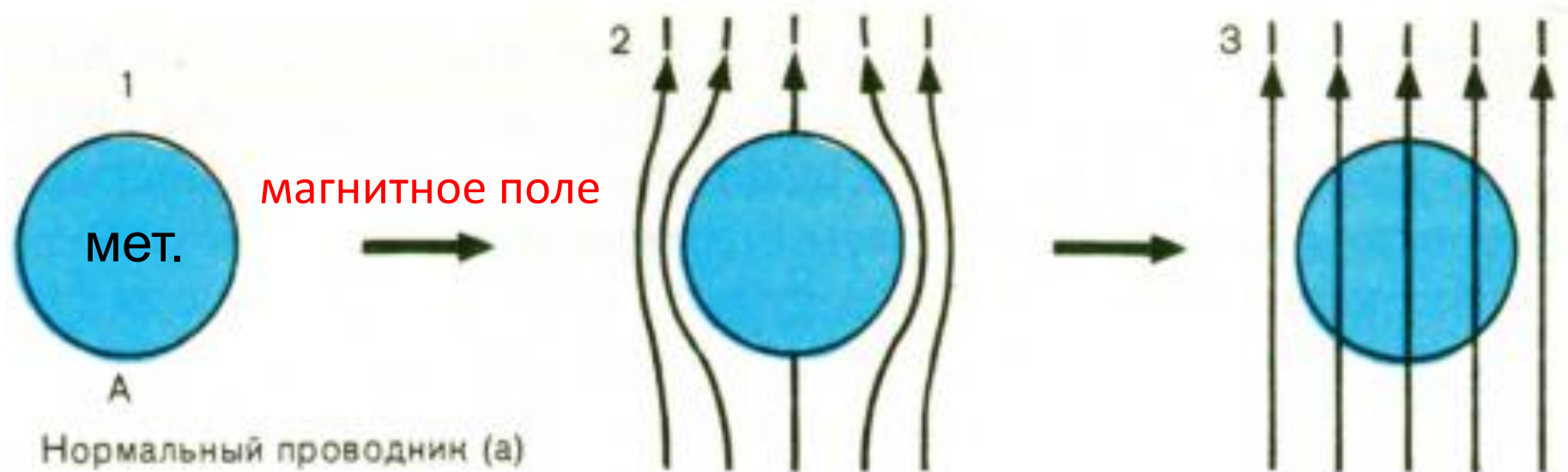
# Эффект Мейснера – Оксенфельда

... либо постоянный магнит может  
левитировать над сверхпроводником

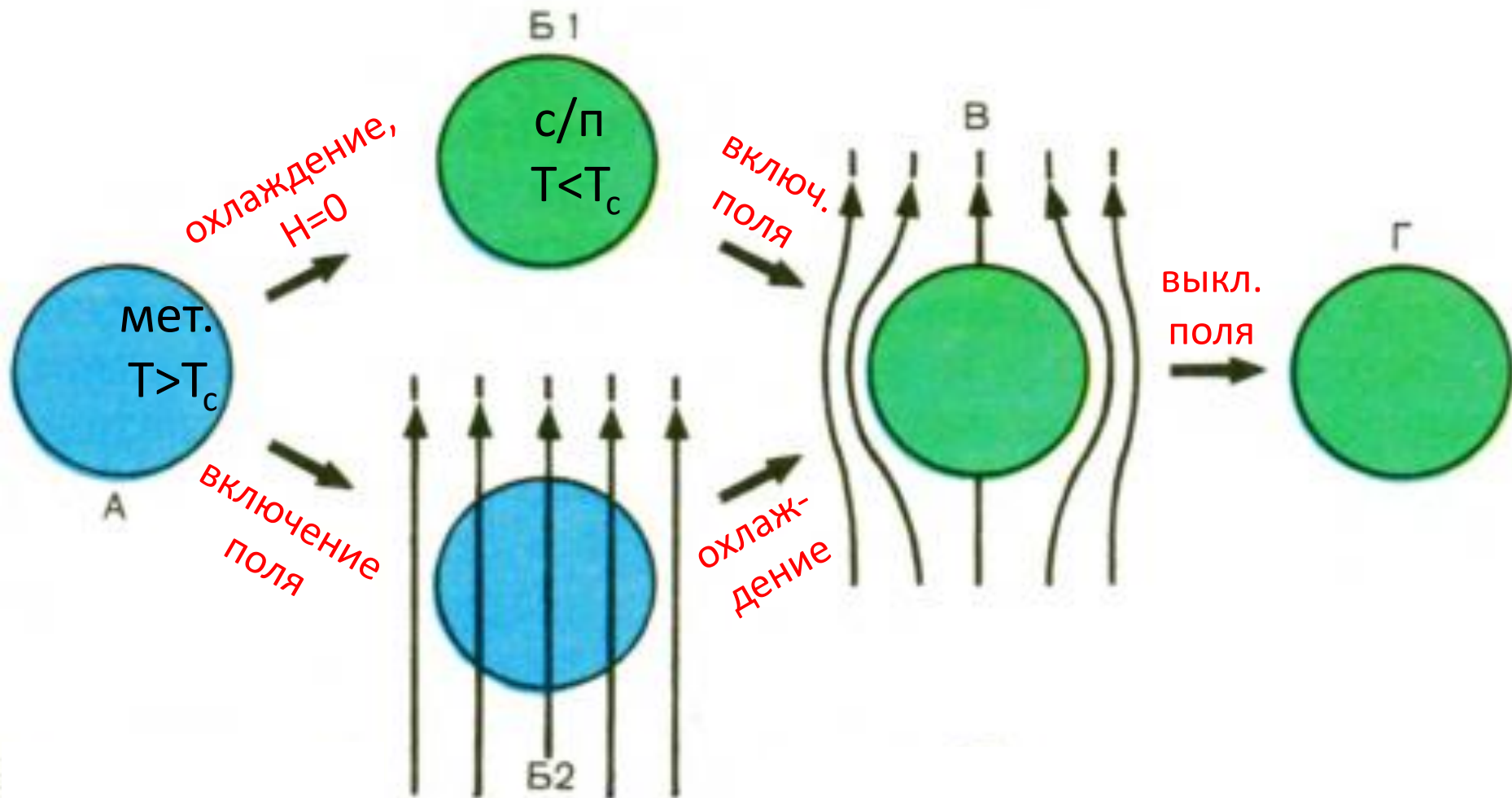




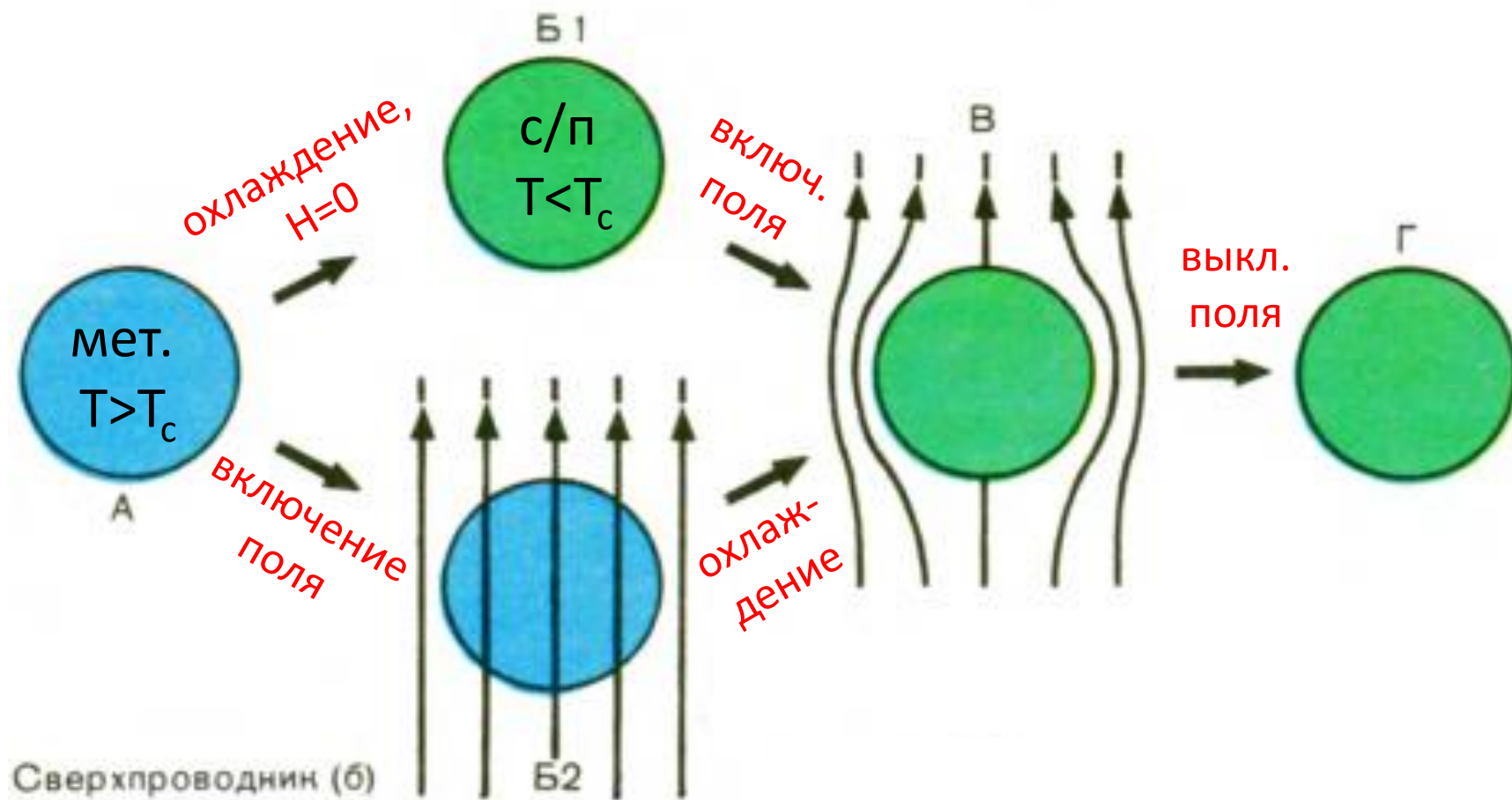
# Эффект Мейснера – Оксенфельда



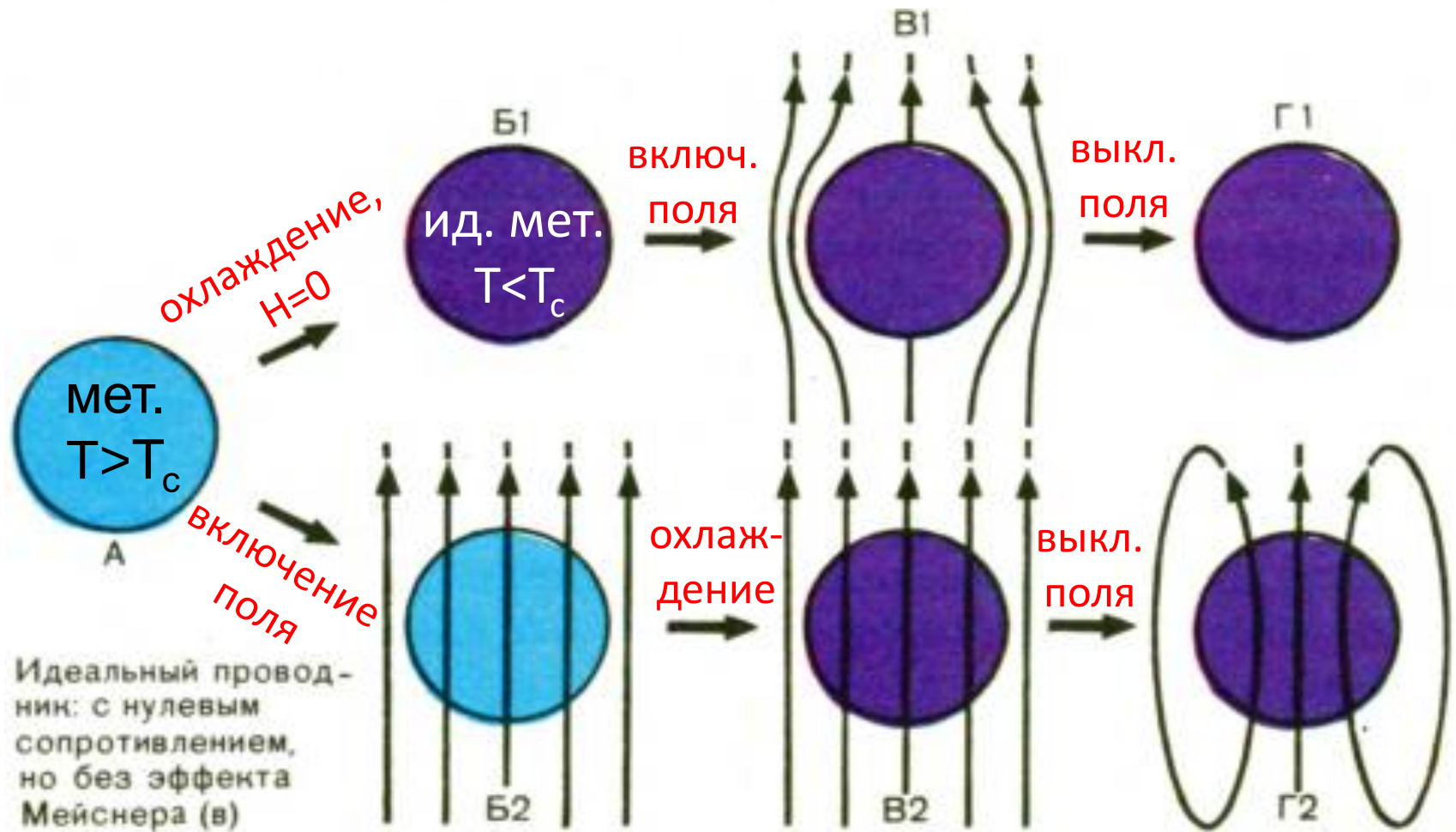
# Эффект Мейснера – Оксенфельда



# Эффект Мейснера – Оксенфельда

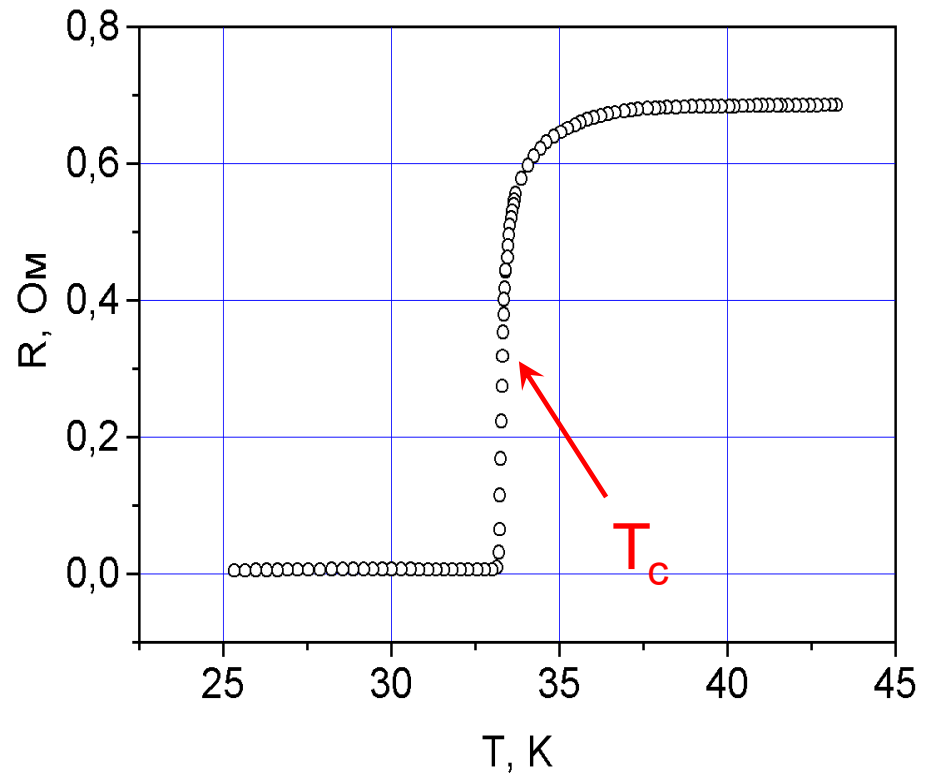
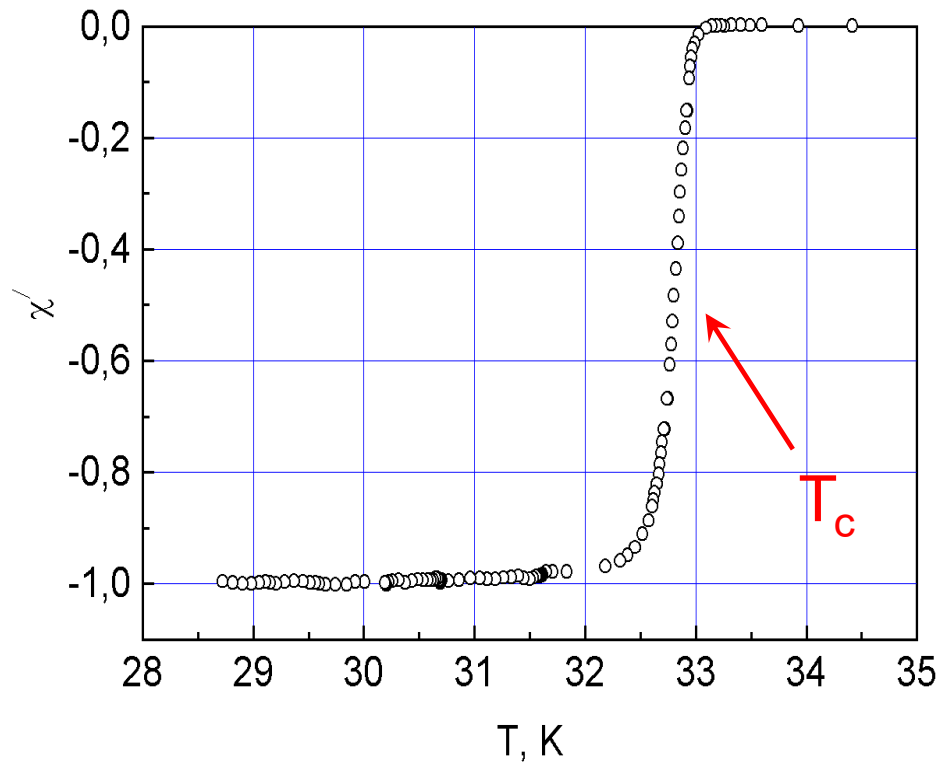


# А как ведет себя «идеальный металл»?

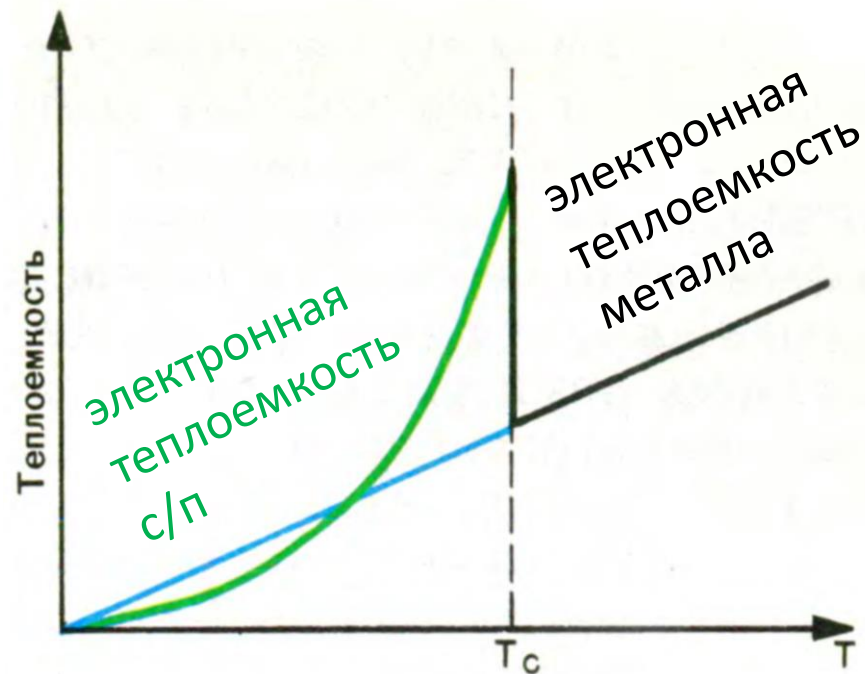
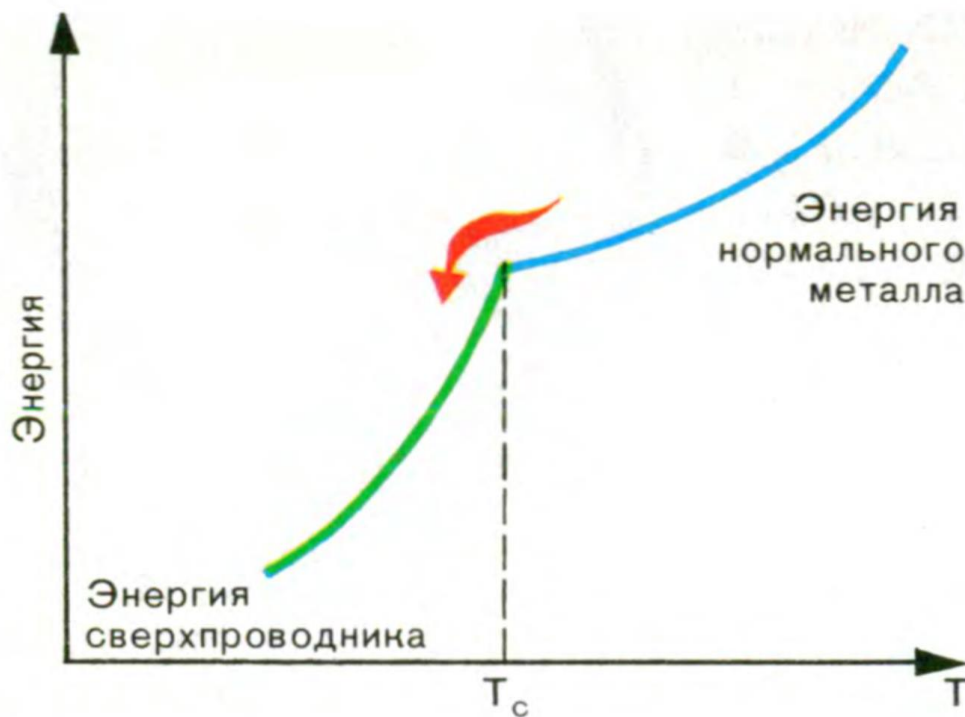




# Магнитная восприимчивость сверхпроводника

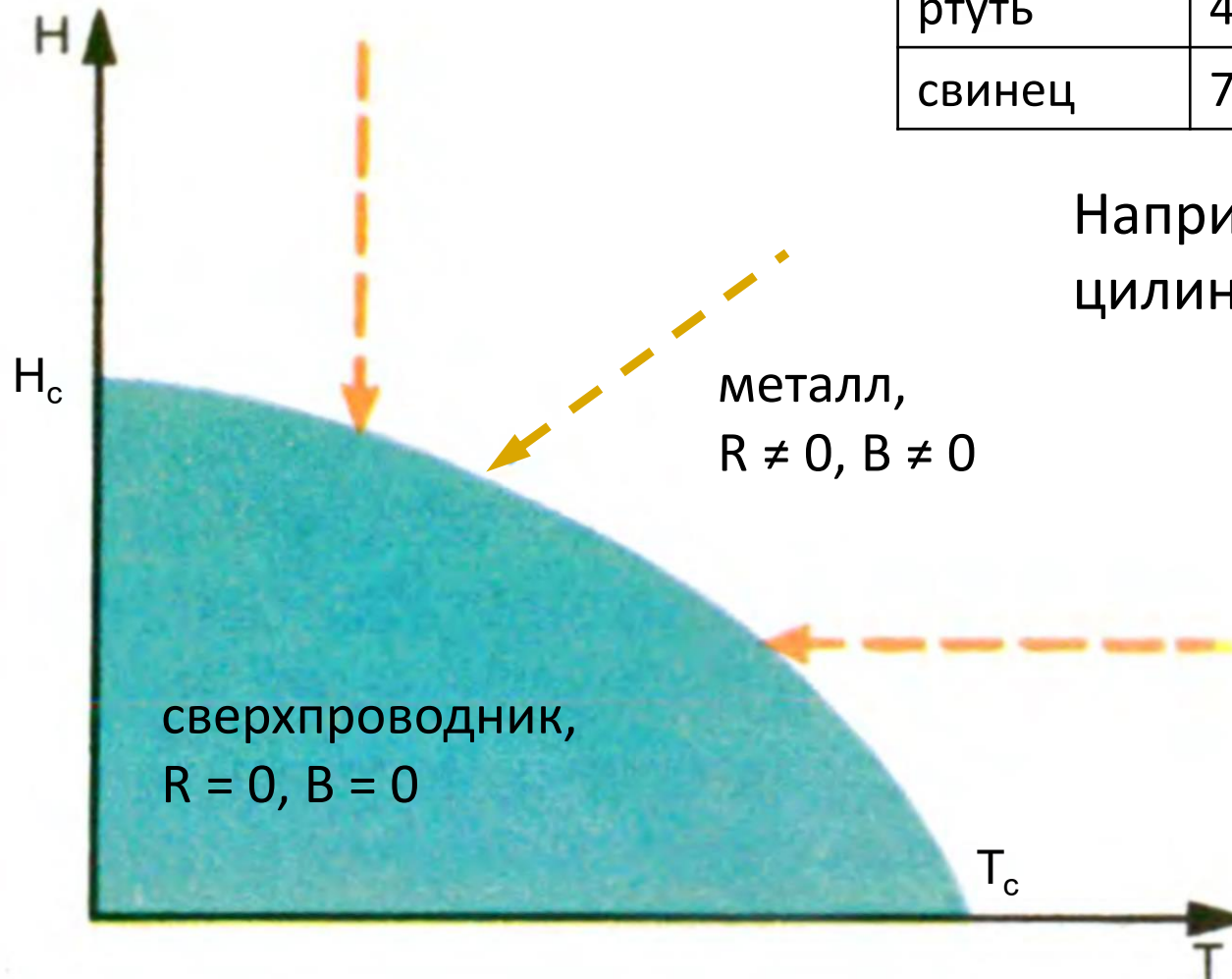


# Фазовый переход в сверхпроводящее состояние



# Фазовая диаграмма сверхпроводника

| с/п      | $T_c$ , К | $H_c$ , Э |
|----------|-----------|-----------|
| алюминий | 1.2       | 100       |
| ртуть    | 4.15      | 410       |
| свинец   | 7.2       | 803       |



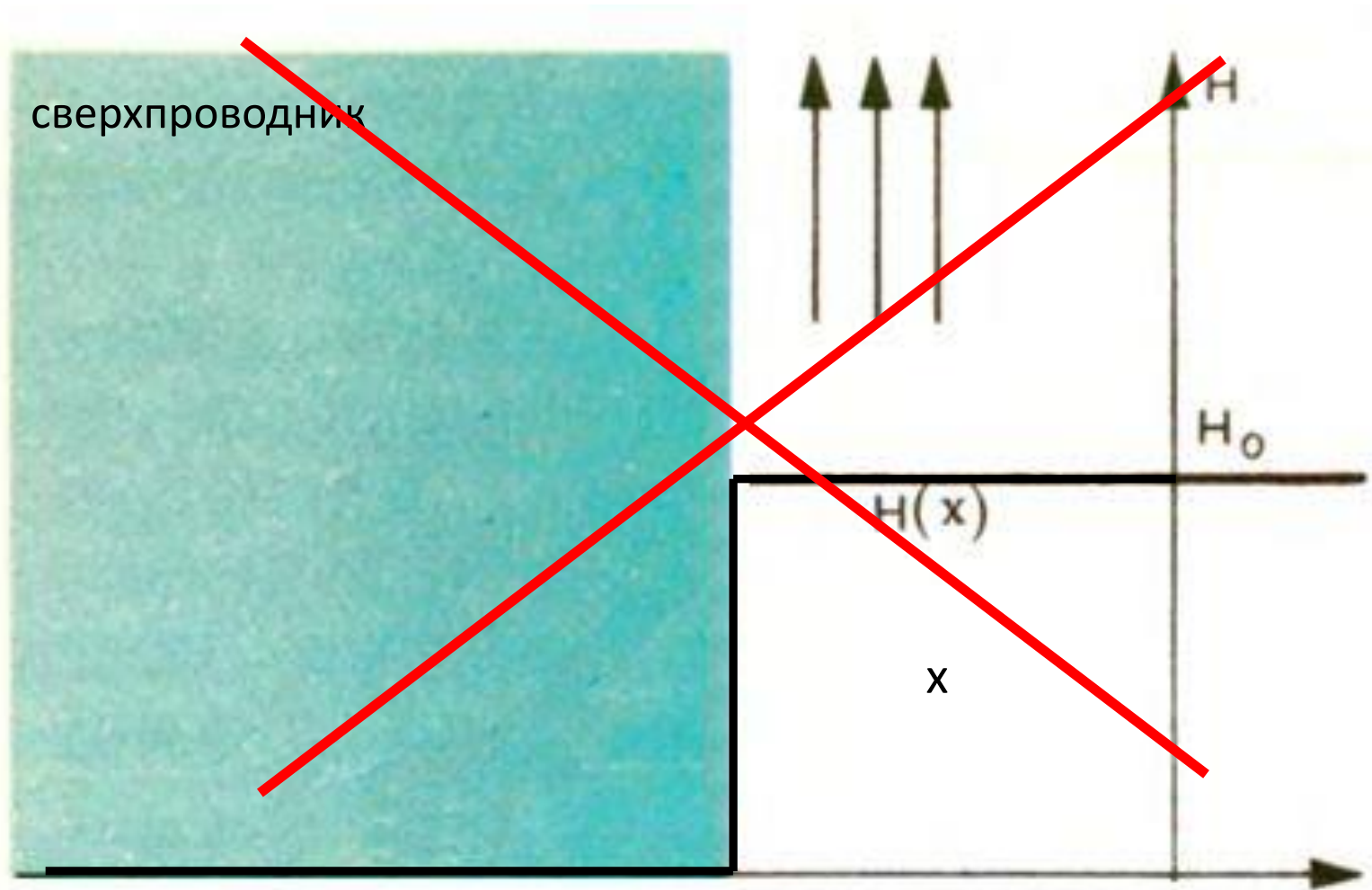
Например, для  
цилиндра радиуса  $r$ :

$$H = \frac{1}{4\pi} \frac{2I}{r}$$

отсюда критический  
ток:

$$I_c = 2\pi r H_c$$

# Лондоновская глубина проникновения

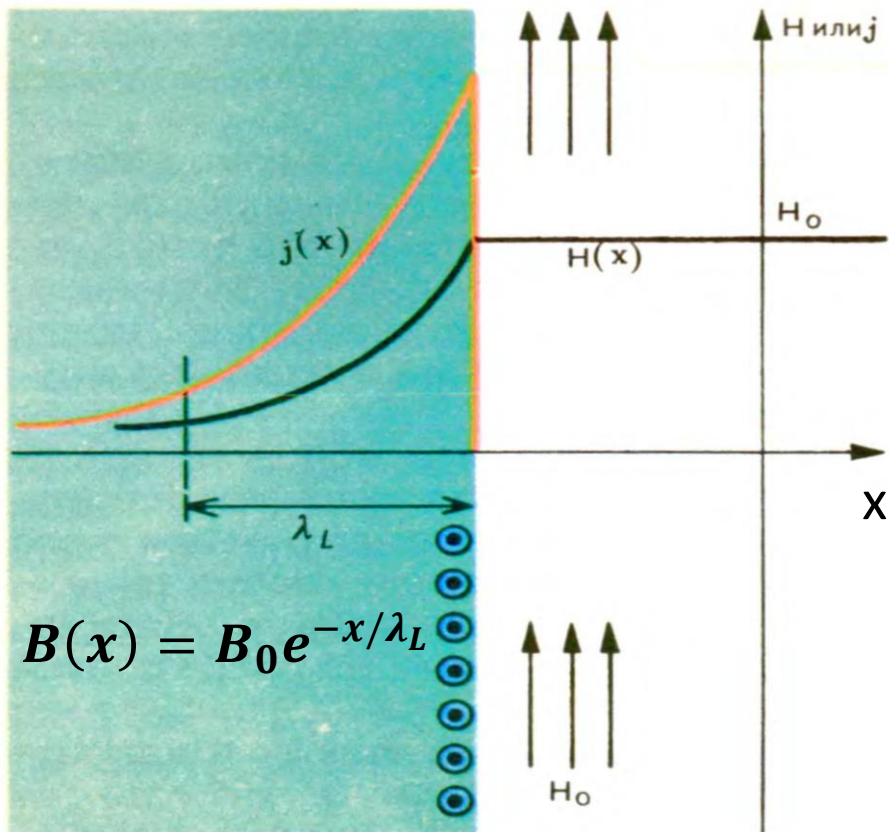


$$\lambda_L^2(T=0) = \frac{m_e c^2}{4\pi n_s e^2}$$

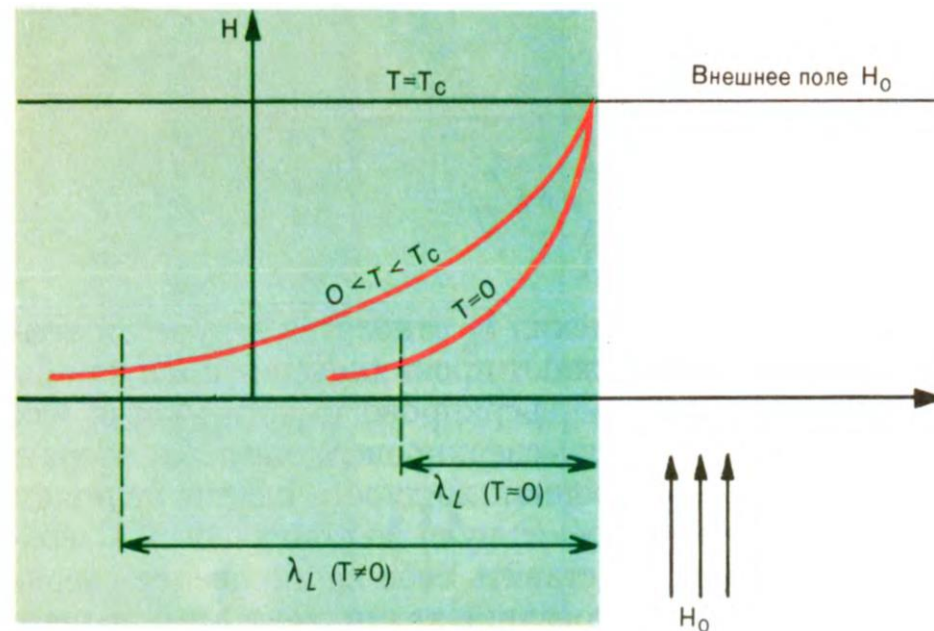
$m_e$  – масса носителей тока,  $e$  – заряд электрона,  
 $n_s$  – локальная концентрация сверхпроводящих электронов.



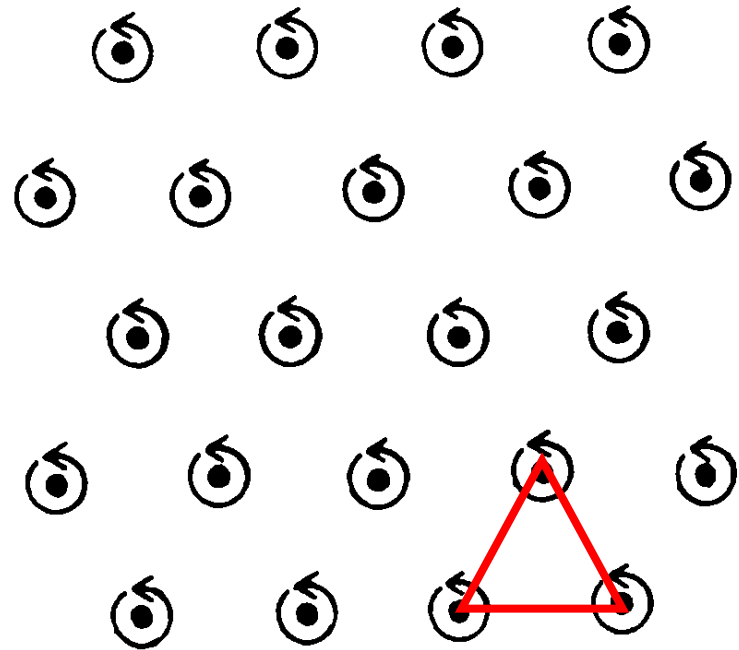
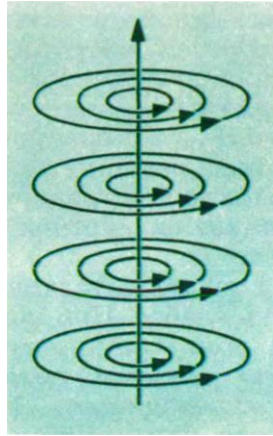
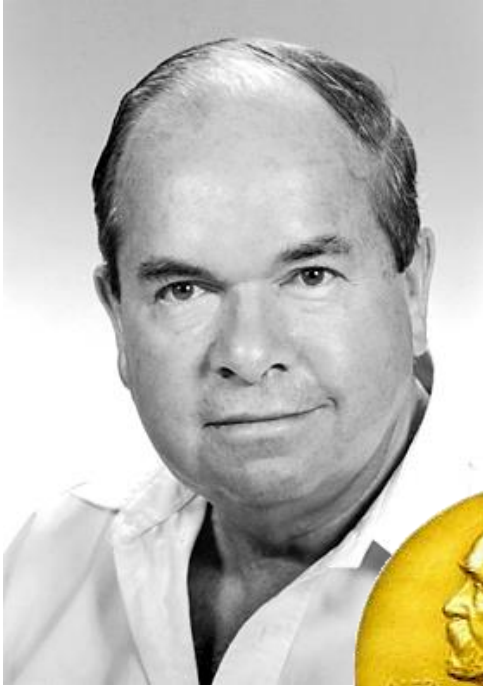
# Лондоновская глубина проникновения



| с/п      | $T_c$ , К | $\lambda_L$ , Å ( $T \rightarrow 0$ ) |
|----------|-----------|---------------------------------------|
| алюминий | 1.2       | 500                                   |
| ртуть    | 4.15      | 410                                   |
| свинец   | 7.2       | 390                                   |
| ниобий   | 9.2       | 470                                   |



# Вихри Абрикосова

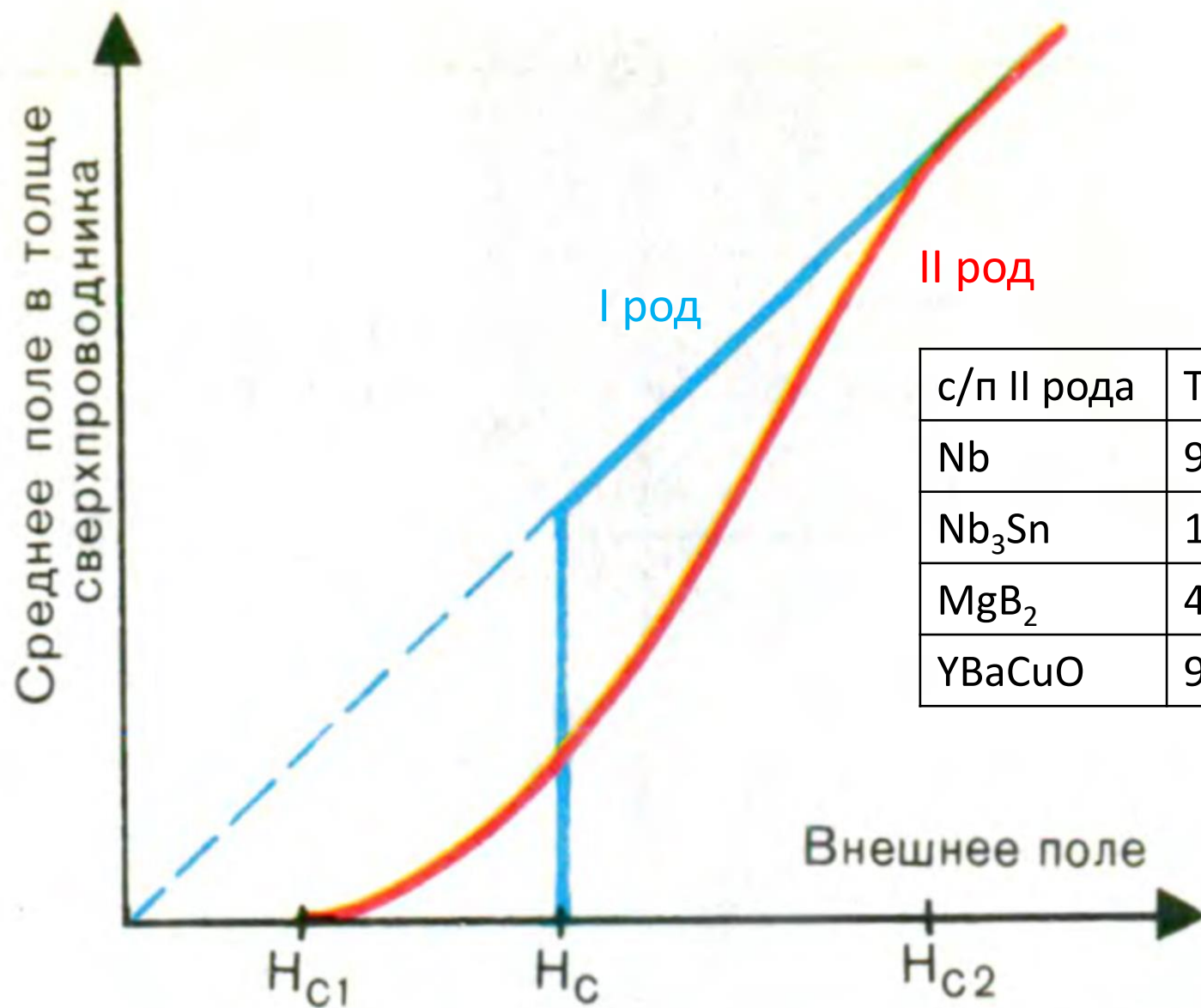


Оказывается, что каждый вихрь несет квант магнитного потока:

$$\Phi_0 = \frac{2\pi\hbar}{e} = 2.07 \times 10^{-7} \text{ Гс} \cdot \text{см}$$

| с/п II рода        | $T_c$ , К | $H_{c1}$ , Э |
|--------------------|-----------|--------------|
| Nb                 | 9.2       | 1970         |
| Nb <sub>3</sub> Sn | 18        | 500          |
| MgB <sub>2</sub>   | 40        | 300          |
| YBaCuO             | 93        | 800          |

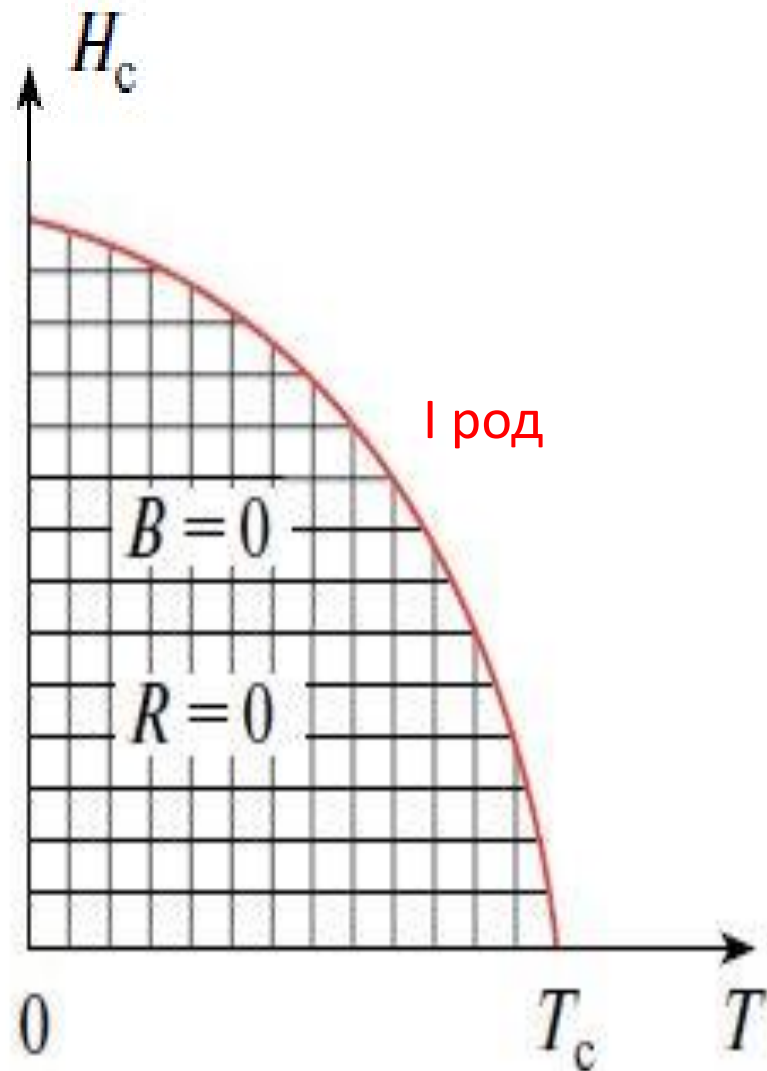
# Сверхпроводники II рода



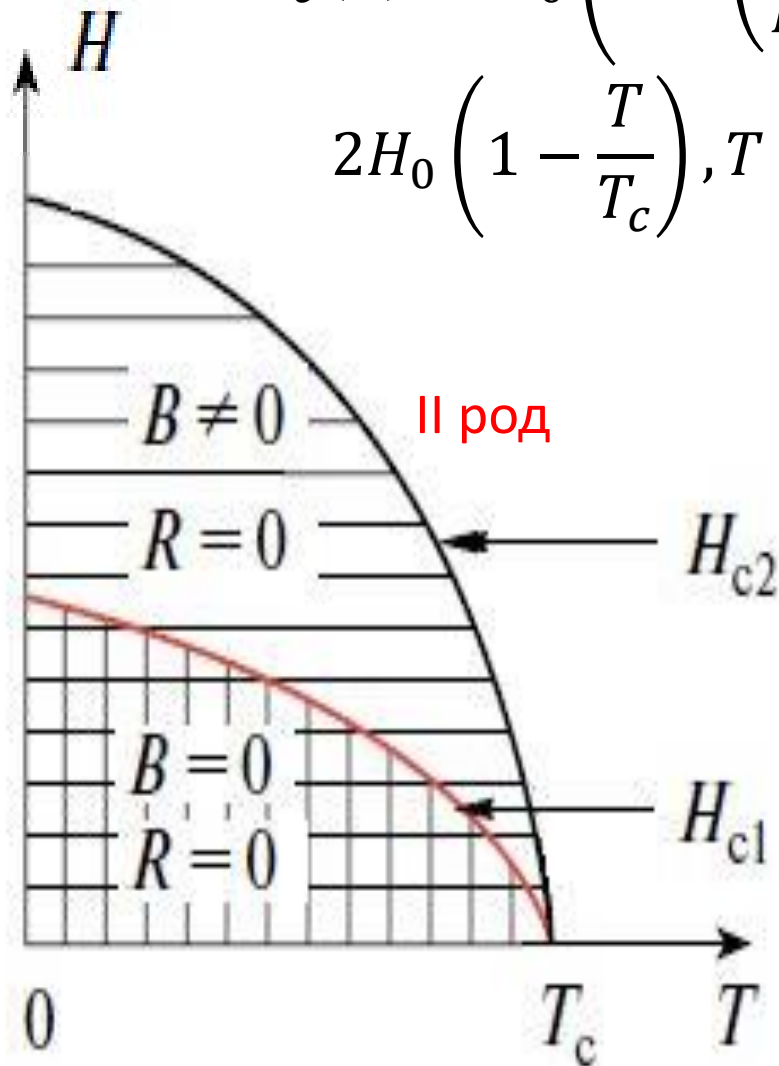
| с/п II рода        | $T_c$ , К | $H_{c2}$ , Тл |
|--------------------|-----------|---------------|
| Nb                 | 9.2       | 0.2           |
| Nb <sub>3</sub> Sn | 18        | 23            |
| MgB <sub>2</sub>   | 40        | 35            |
| YBaCuO             | 93        | 100           |

# Сверхпроводники II рода

$$H_c(T) = H_0 \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right) \approx 2H_0 \left( 1 - \frac{T}{T_c} \right), T \rightarrow T_c$$



I род



II род

# Критические поля некоторых сверхпроводников

| Сверхпроводник | $T_c$ , К | $H_c$ , Э |
|----------------|-----------|-----------|
| Ртуть          | 4,15      | 410       |
| Свинец         | 7,2       | 803       |
| Ниобий         | 9,2       | 1970      |
| Алюминий       | 1,18      | 100       |
| Ванадий        | 5,3       | 1370      |

| Вещество                           | $T_c$ , К | $H_{c2}$ , Э, при 4,2 К |
|------------------------------------|-----------|-------------------------|
| $Nb_xTi_{1-x}$ ( $x \approx 0,5$ ) | 8 – 10    | 90 000 – 130 000        |
| $V_3Ga$                            | 14,5      | 220 000                 |
| $Nb_3Sn$                           | 18        | 230 000                 |
| $V_3Si$                            | 17        | 230 000                 |
| $Nb_3Ga$                           | 20,3      | 340 000                 |
| $Nb_3Al_{0,7}Ge_{0,3}$             | 20,7      | 370 000                 |
| $Nb_3Ge$                           | 24        | 400 000                 |

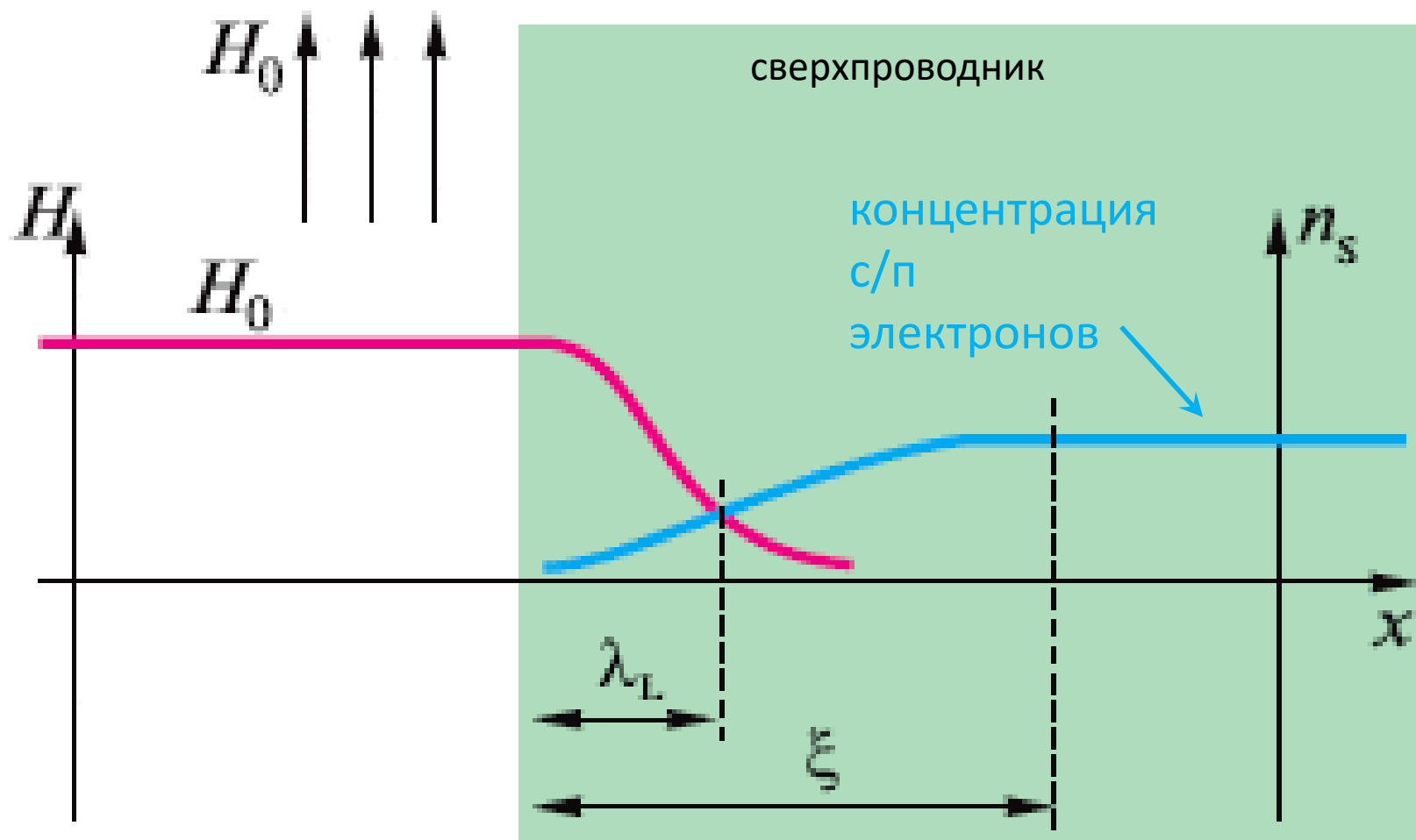
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$

123 К

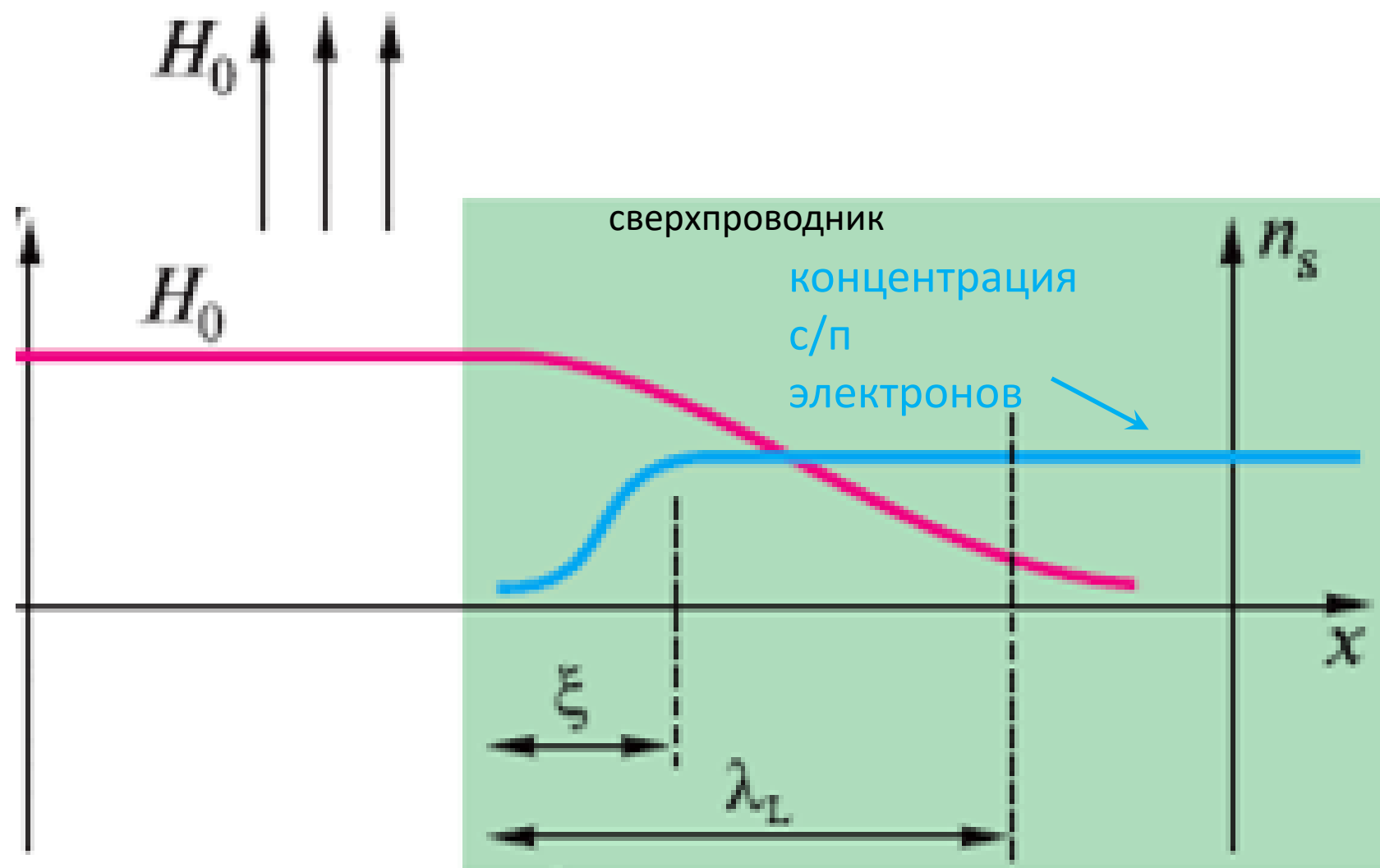
2 000 000 Э (200 Т)



# Сверхпроводник I рода в магнитном поле



# Сверхпроводник II рода в магнитном поле



# Характерные длины сверхпроводника $\lambda_L$ и $\xi$

| с/п                | $T_c$ , К | $\xi$ , Å | $\lambda_L$ , Å |
|--------------------|-----------|-----------|-----------------|
| алюминий           | 1.2       | 15000     | 500             |
| олово              | 3.7       | 2500      | 510             |
| таллий             | 4.7       | 2700      | 920             |
| ниобий             | 9.2       | 600       | 470             |
| Nb <sub>3</sub> Ta | 18        | 300       | 900             |
| MgB <sub>2</sub>   | 40        | 400       | 1000            |

$$H_{c1} = \frac{\Phi_0}{4\pi\lambda_L^2}$$

$$H_{c2} = \frac{\Phi_0}{2\pi\xi^2}$$



# Спасибо за сверхвнимание!

Использованы материалы книги  
В.Л. Гинзбург, Е.А. Андрюшин, «Сверхпроводимость»,  
М.: «Альфа-М» (2006)