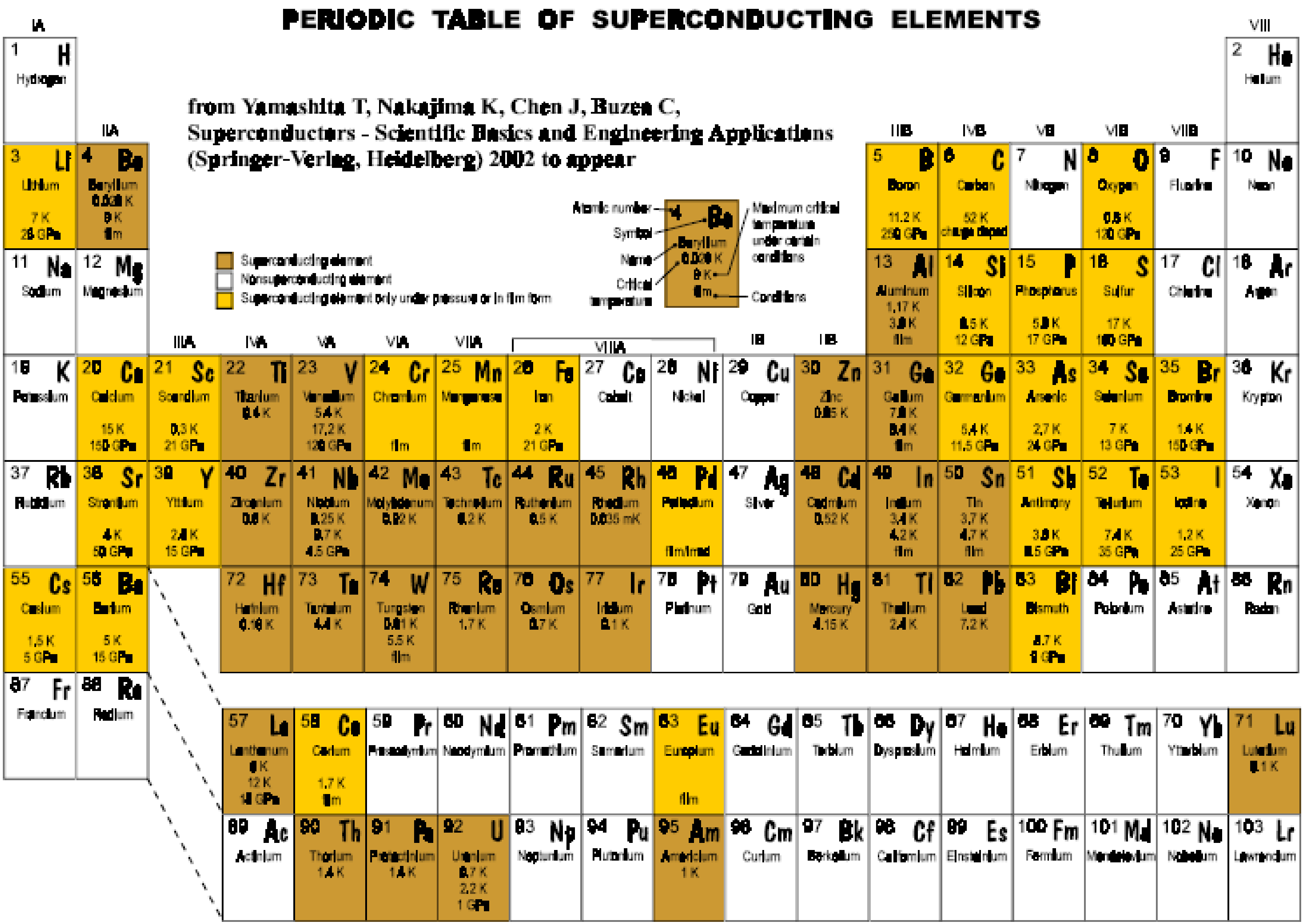
Лекция №1 по теории сверхпроводимости.

Часть 1:

Краткое введение о различных сверхпроводниках

Различные семейства сверхпроводящих материалов

Простые металлы	Elemental metals
Сплавы металлов	Metal alloys
Медь-оксидные ВТСП	Copper-oxides HTSC
MgB_2	Magnesium di-boride
Железо-мышьяк	Ferro-pnictides
Рутенаты	Rhutenium-based materials
Сверхпроводники с аномально малой плотностью электронов	Extra-low-density superconductors
Двумерные сверхпроводники	2D superconductors
Сильно неупорядоченные сверхпроводники	Strognly disordered superconductors



Review of superconducting properties of MgB2
cond-mat/0108265

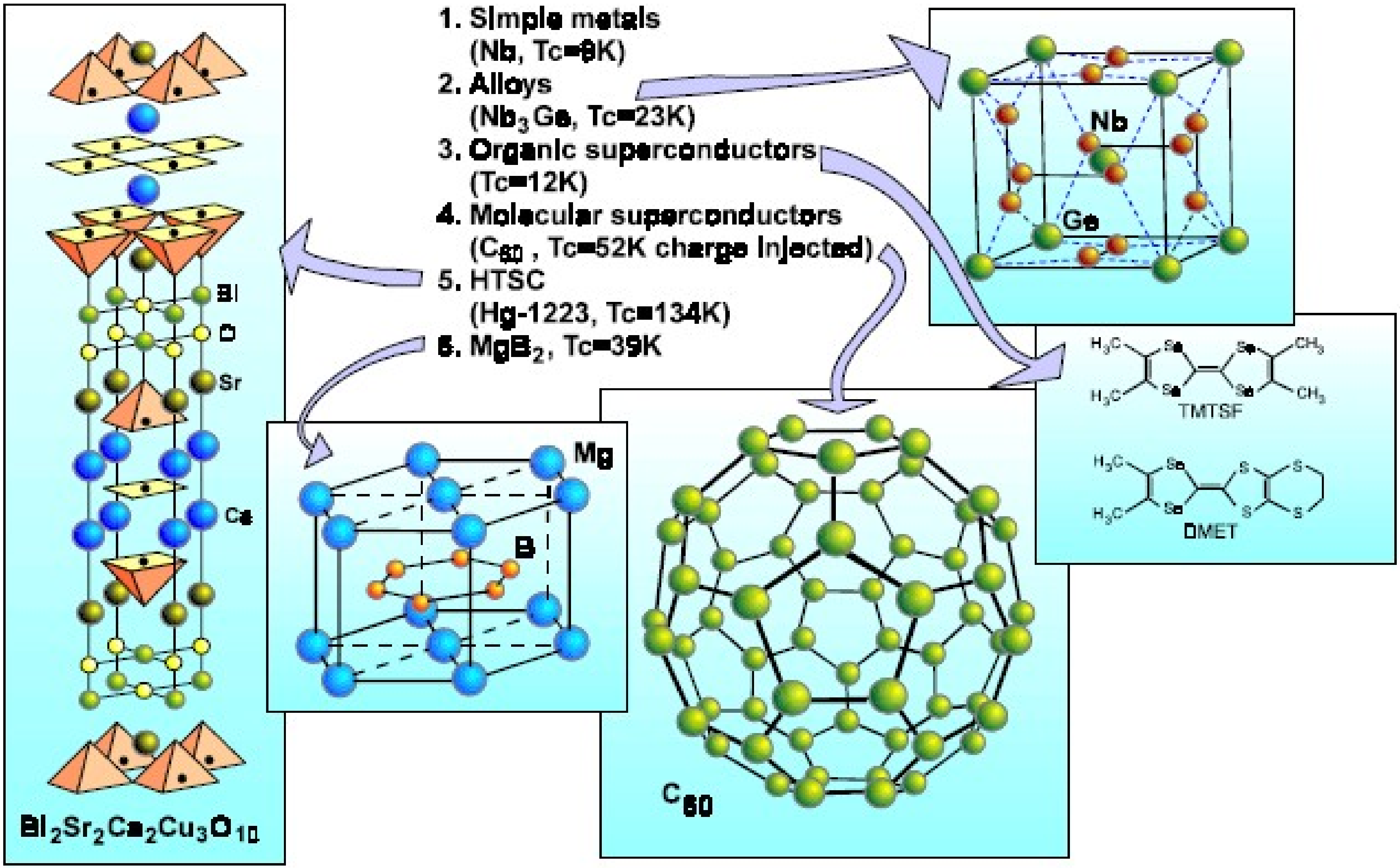


Figure 3. Comparison between the structures of different classes of superconductors

Простые сверхпроводящие металлы - элементы

.1. Критические температуры и критические магнитные п
-сверхпроводников [10].

Элемент	T_c, К	$H_{cm}(0)$, Э
Al	1.175 ± 0.002	104.9 ± 0.3
Be	0.026	
Cd	0.517 ± 0.002	28 ± 1
Ga	1.083 ± 0.001	59.2 ± 0.3
Hf	0.128	
Hg (α)	4.154 ± 0.001	411 ± 2
Hg (β)	3.949	339
In	3.408 ± 0.001	281.5 ± 2
Ir	0.1125 ± 0.001	16 ± 0.05
La (α)	4.88 ± 0.02	800 ± 10
La (β)	6.00 ± 0.1	1096, 1600
Lu	0.1	< 400
Mo	0.915 ± 0.005	96 ± 3
Nb	9.25 ± 0.02	2060 ± 50
Os	0.66 ± 0.03	70
Pa	1.4	
Pb	7.196 ± 0.006	803 ± 1
Re	1.697 ± 0.006	200 ± 5
Ru	0.49 ± 0.015	69 ± 2
Sn	3.722 ± 0.001	305 ± 2
Ta	4.47 ± 0.04	829 ± 6
Tc	7.8 ± 0.01	1410
Th	1.38 ± 0.02	160 ± 3
Ti	0.40 ± 0.04	56
Tl	2.38 ± 0.04	178 ± 5
V	5.40 ± 0.05	1408
W	0.0154 ± 0.0005	1.15 ± 0.03
Zn	0.850 ± 0.01	54 ± 0.3
Zr	0.61 ± 0.15	47

Некоторые сверхпроводящие сплавы и соединения

Таблица 1.2. Критические температуры некоторых интерметаллических соединений и высокотемпературных сверхпроводников.

Соединение	T_c, K
Nb_3Sn	18.1
$(Nb_3Al)_4 + Nb_3Ge$	20
$La_{0.925}Sr_{0.075}CuO_4$	34
$YBa_2Cu_3O_7$	92.4
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	111
$Tl_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	123
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$	133

Все это сверх-
проводники
 2 рода !
У них два разных
критических поля

$H_{c1} \ll H_{c2}$

MgB_2 T_c = 39 K H_{c2} = 20-30 Tesla

The Intriguing Superconductivity of Strontium Ruthenate
http://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.1349611

Экзотические материалы

The Intriguing Superconductivity of Strontium Ruthenate
http://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/1.1349611

Sr_2RuO_4

Iron-based superconductors (FeSC)

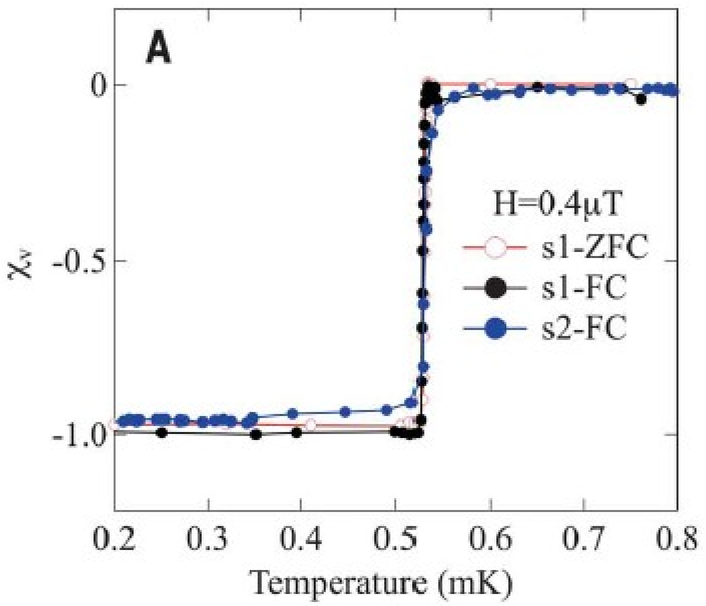
Oxypnictide	T_c **(K)**
$LaO_{0.89}F_{0.11}FeAs$	26[11]
$LaO_{0.9}F_{0.2}FeAs$	28.5[12]
$CeFeAsO_{0.84}F_{0.16}$	41[11]
$SmFeAsO_{0.9}F_{0.1}$	43[11][13]
$La_{0.5}Y_{0.5}FeAsO_{0.6}$	43.1[14]
$NdFeAsO_{0.89}F_{0.11}$	52[11]
$PrFeAsO_{0.89}F_{0.11}$	52[15]
$ErFeAsO_{1-y}$	45[16]

Сверхпроводимость почти без электронов

Evidence for bulk superconductivity in pure bismuth single crystals at ambient pressure

Prakash *et al.*, *Science* **355**, 52–55 (2017) 6 January 2017

$$n \approx 3 \times 10^{17}\ \mathrm{cm}^{-3}$$



Single gap superconductivity in doped $SrTiO_3$

https://arxiv.org/abs/1703.04716

Плотность носителей 10^{17} - 10^{20}

ε > 20 000

Слабо допированный почти сегнетоэлектрик

2D superconductors

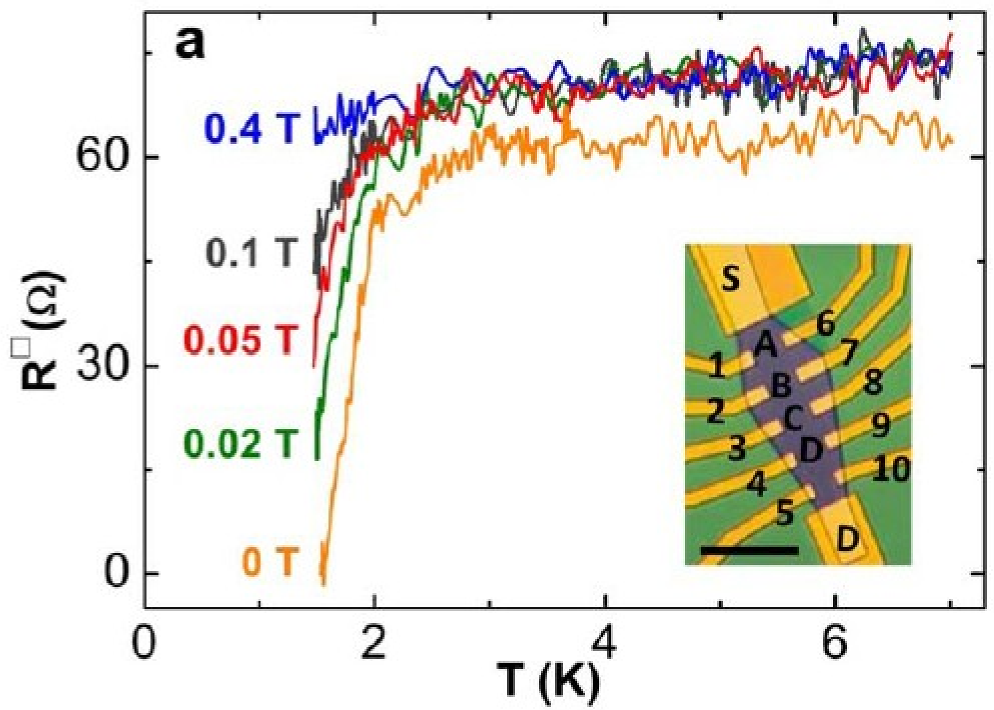
Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 013002 (37pp)

Takashi Uchihashi

Two-dimensional superconductors with atomic-scale thickness

$LaAlO_3/SrTiO_3$ Atomic-thickness interface between two insulators

MoS_2 – атомный слой



Очень сильно неупорядоченные сверпроводники и квантовый переход сверхпроводник-изолятор

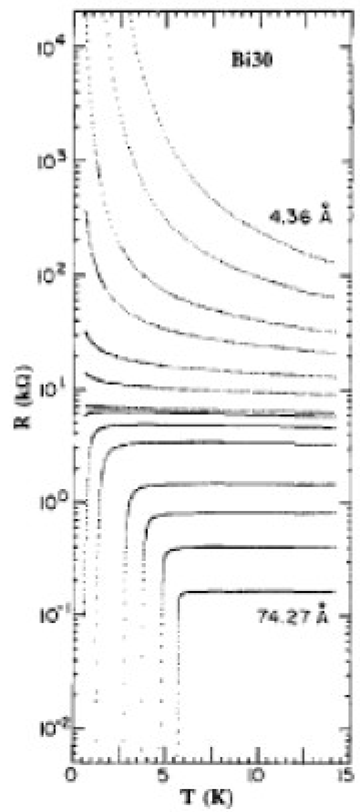
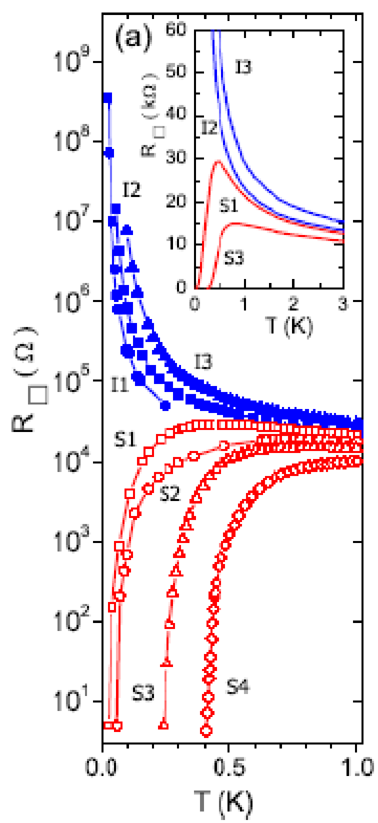
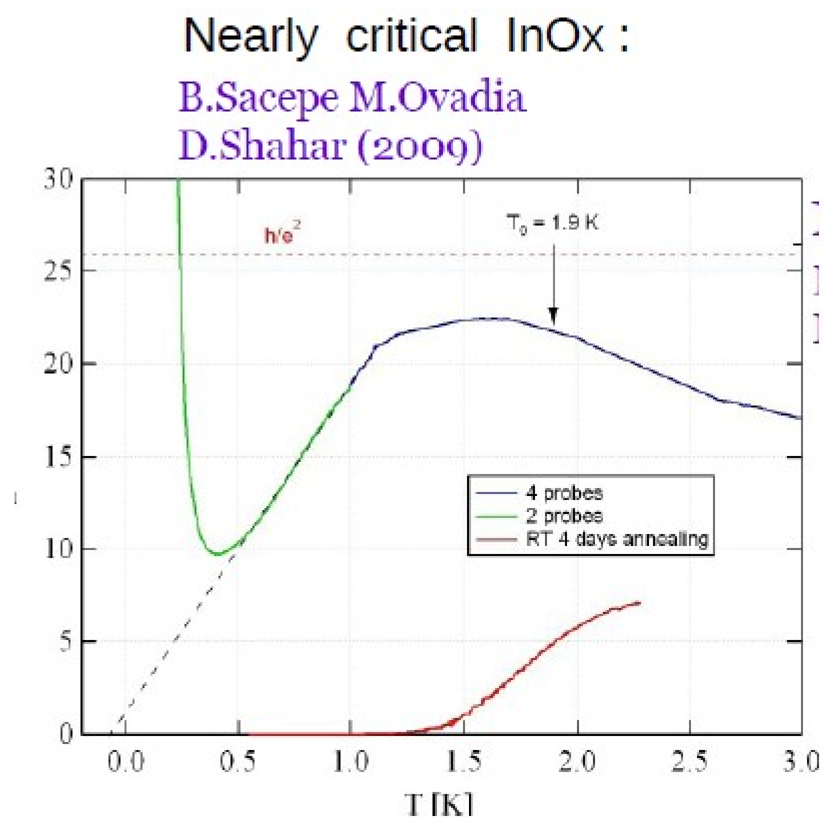


Fig. 5. Temperature dependence of the sheet resistance $R(T)$ for Bi films deposited onto Ge [15]. The films are considered to be homogeneous.



TiN thin films

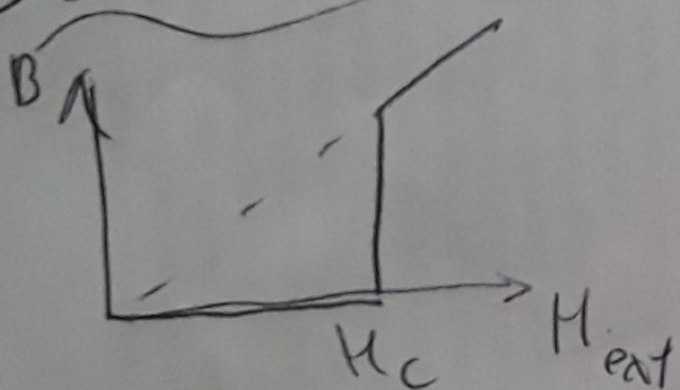


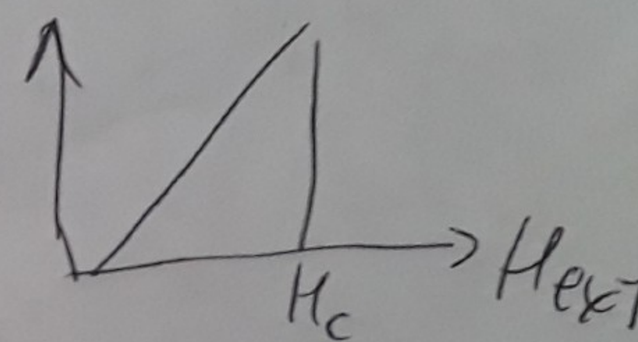
Часть 2: Основные
общие свойства сверхпроводников

Сверхпроводники 1-ого и 2-ого рода

③ С-ки I^ого и II^ого рода

$$B = H + 4\pi M$$





"Промежуточное состояние

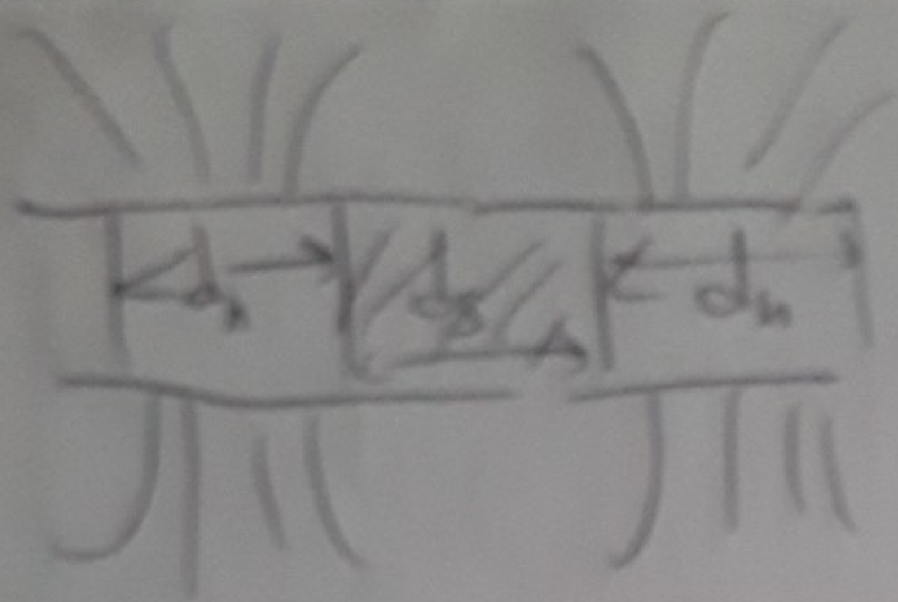
[см. ЭСС §3, §29]

$$B_{n1} = B_{n2}$$

$$H_{t1} = H_{t2}$$

$$(1 - n)H + nB = H_{ext}$$

$$H = \frac{H_{ext}}{1 - n}$$

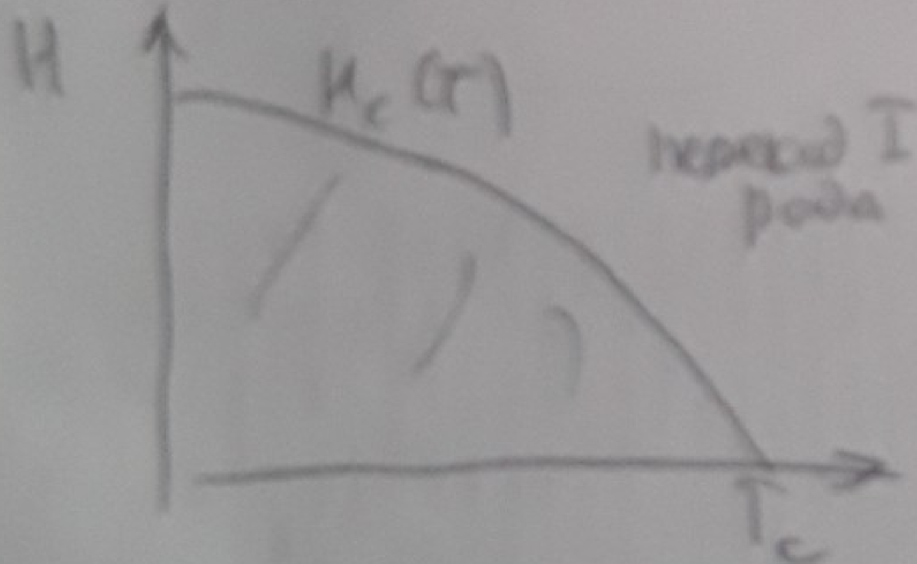


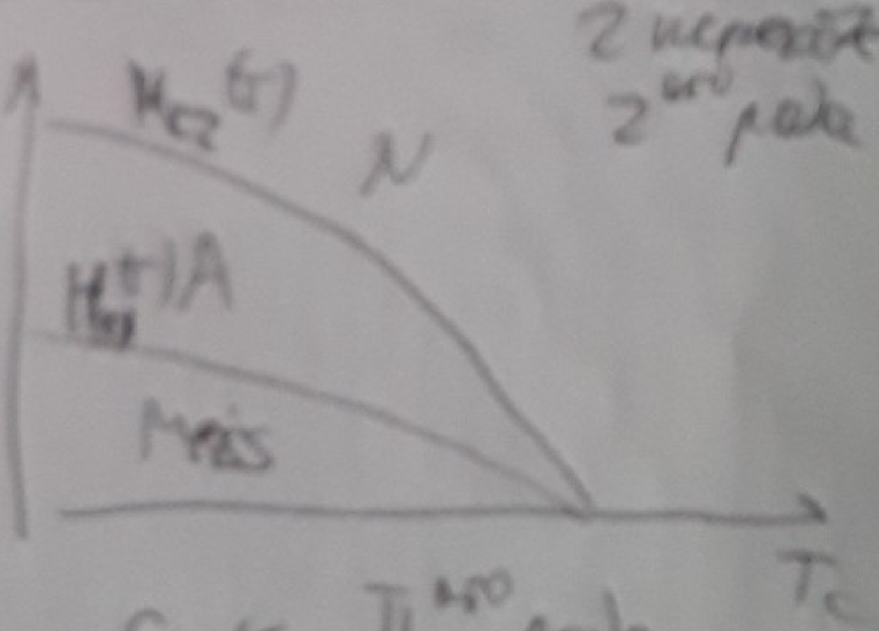
чередование SC и N областей

граница S/N имеет "поверхн. натяжение"

С-к II рода [предсказан А. Абрикосовым, 1957]
ведет себя не так!

Фазовая диаграмма на (H - T):





С-К II-го рода

$\sigma < 0$, поле проникает в виде вихрей $\Phi_v = \Phi_0 = \frac{2\pi\hbar c}{e}$

Термодинамика с-ков I рода

$$F_{sH} = F_{s0} + H^2/8\pi \qquad -M\,dH = \frac{H\,dH}{4\pi} = d\left(\frac{H^2}{8\pi}\right)$$

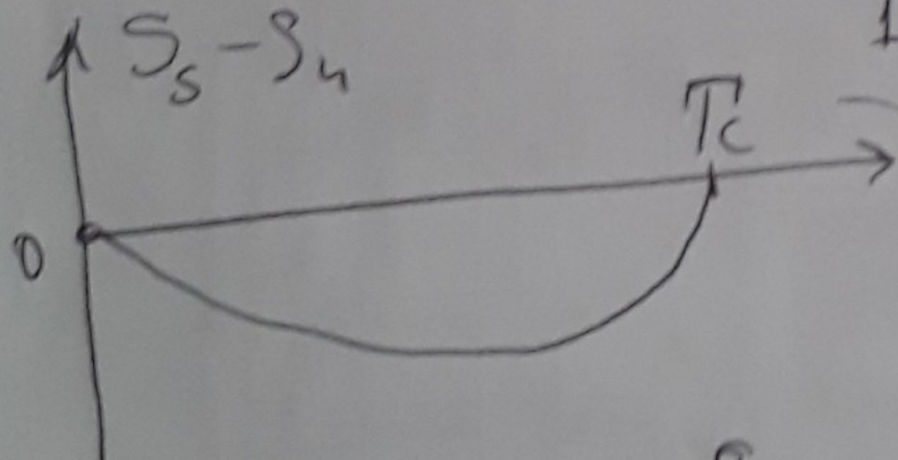
переход I рода при $F_n - F_{s0} = H_c^2/8\pi$

Энтропия: $S = -\frac{\partial F}{\partial T}$

$$-S_n + S_s = \frac{H_c}{4\pi}\frac{\partial H_c}{\partial T}$$

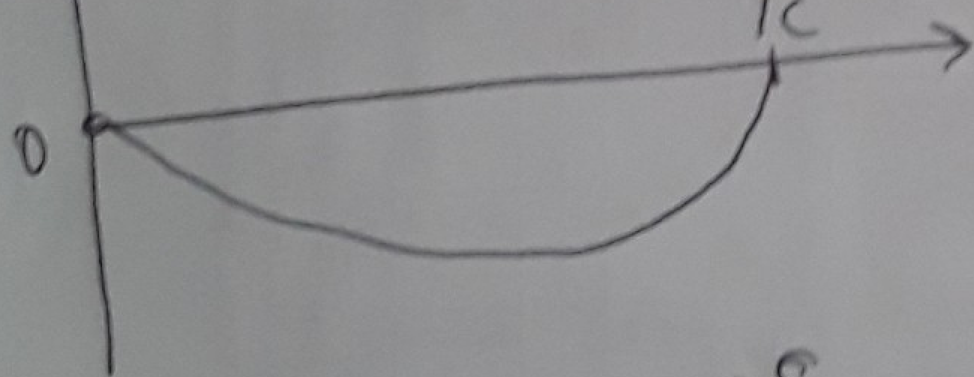
$$S_c(T) = S_n(T) - \frac{H_c}{4\pi}\left|\frac{\partial H_c}{\partial T}\right|$$

$$S_c < S_n$$



1) S – упорядочение
2) $\Delta S = 0$ при $T = T_c$, $H = 0$
3) $\Delta S \neq 0$ при $H \neq 0$

т.е. переход 1ого рода



2) $\Delta S = 0$ при $H = 0$

3) $\Delta S \neq 0$ при $H \neq 0$

т.е. переход $1^{ого}$ рода

Есть T^* когда $\frac{\partial \Delta S}{\partial T} = 0$, т.е.

$$C_s = C_n$$

$$C_s - C_n = T\frac{\partial (S_s - S_n)}{\partial T} = \frac{T}{4\pi}\left[\left(\frac{\partial H_c}{\partial T}\right)^2 + H_c\frac{\partial^2 H_c}{\partial T^2}\right]$$

$$\Delta C\Big|_{T_c} = \frac{T_c}{4\pi}\left(\frac{\partial H_c}{\partial T}\right)^2 \leftarrow$$ <u>конечный скачок!</u>

Электродинамика с-ков

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \sigma \cdot \frac{1}{c}\dot{\vec{A}}$$

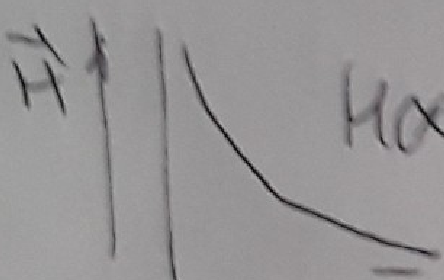
металл: $\vec{j}_\omega = \frac{i\omega\sigma}{c}\delta\vec{A}_\omega$

с-к: $\sigma(\omega) = \frac{i\rho_s c}{\omega} \Rightarrow \vec{j} = -\rho_s \delta\vec{A}$

$$= -\frac{c}{4\pi\lambda^2}\delta\vec{A}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{4\pi}{c}\vec{j}$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = -\frac{1}{\lambda^2}\vec{A} \Rightarrow \frac{d^2 A}{dx^2} = \frac{1}{\lambda^2}A$$



$H(x) = H_0 e^{-x/\lambda}$

$$\frac{d^2 j}{dx^2} = \frac{1}{\lambda^2} j$$

$$F_{sn} = F_{s0} + \frac{1}{8\pi}\int\left\{\vec{H}^2 + \lambda^2\left[\vec{\nabla}\times\vec{H}\right]^2\right\} d^3x$$

приближение Лондонов для св. энергии

$n_s m v_s^2/2 = m j_s^2/2 n_s e^2 = \frac{m}{2n_s e^2}\left(\frac{c}{4\pi}[\nabla\times\vec{H}]\right)^2 = \frac{\lambda^2}{8\pi}[\vec{\nabla}\times\vec{H}]^2$ где $\lambda^2 = \frac{mc^2}{4\pi n_s e^2}$

Не всегда применимо:

$$\vec{j}(\vec{r}) = -\int Q(\vec{r},\vec{r}\,')A(\vec{r}\,')d\vec{r}\,'$$

$|\vec{r}-\vec{r}\,'| \sim \xi_0$ (размер пар)

если $\xi_0 \gtrsim \lambda$, то

нелокальность важна

роль примесей!

предел Пиппарда

$$\lambda = \frac{\int H(x)dx}{H_0}$$

Кинетическая индуктивность

$$F^M = \frac{1}{8\pi}\int H^2\, d^3r = \frac{1}{2c^2} L^M I^2$$

$$F^K = \frac{\lambda^2}{8\pi}\int (\bar{\nabla}\times\bar{H})^2\, d^3r = \frac{1}{2c^2} L^K I^2$$

$$\bar{j}_s = n_s e \bar{v}_s$$

$$L^K = \frac{4\pi\lambda^2}{I^2}\int j_s^2\, d^3r$$

проволоке $R \gg \lambda$

$$j_s = j_{s0}\, e^{-x/\lambda}$$

$$L^K_\square = 2\pi\lambda$$

$$I = 2\pi R \lambda j_{s0}$$

$$L^K = l_z \frac{\lambda}{R}$$

$$L^M_\square = 2\pi\lambda$$