

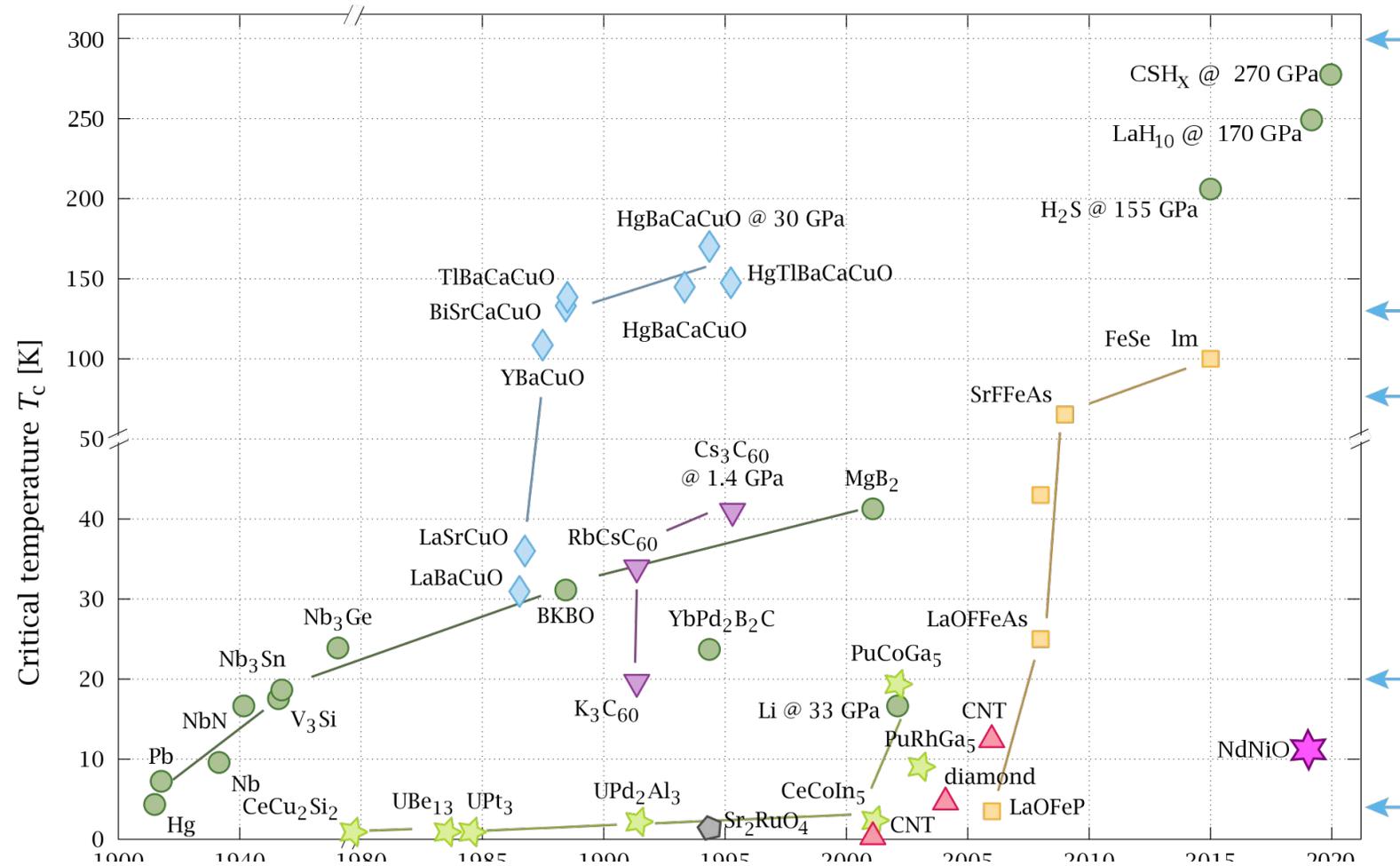
СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ. ЭФФЕКТ МЕЙССНЕРА

КУЗНЕЦОВ АРТЕМ

- СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ – СВОЙСТВО НЕКОТОРЫХ МАТЕРИАЛОВ ОБЛАДАТЬ НУЛЕВЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ ИМИ ТЕМПЕРАТУРЫ НИЖЕ ОПРЕДЕЛЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ



График открытий сверхпроводимости с 1900 по 2020 годы





ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ ДЛЯ
УСКОРТЕЛЕЙ В CERN: СВЕРХУ
ОБЫЧНЫЕ КАБЕЛИ ДЛЯ БОЛЬШОГО
ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОГО
КОЛЛАЙДЕРА ; ВНИЗУ —
СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ДЛЯ БОЛЬШОГО
АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА.

Сверхпроводящие элементы

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cr	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra																

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu								



Al Сверхпроводник



Si Сверхпроводник при высоких давлениях или в виде тонкой пленки



Li Металл, у которого сверхпроводимость пока не обнаружена



B Неметалл



Fe Элемент с магнитным упорядочением

ЭФФЕКТ МЕЙСНЕРА-ОКСЕНФЕЛЬДА

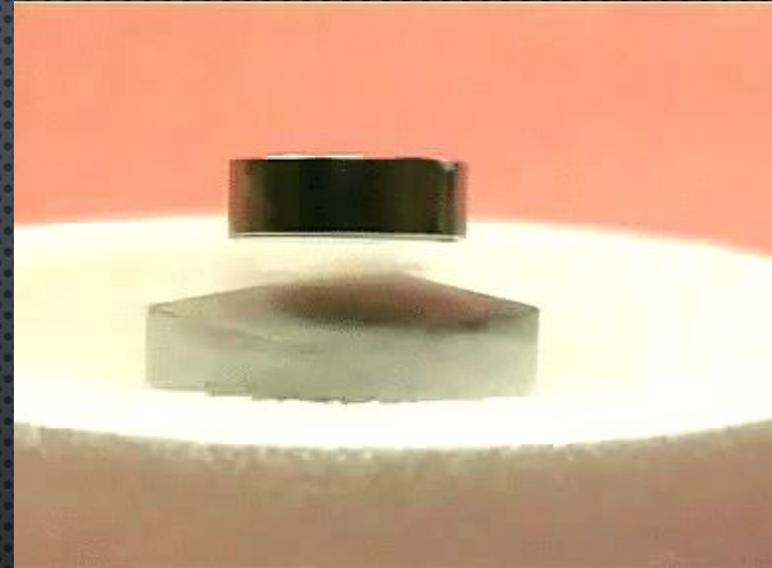
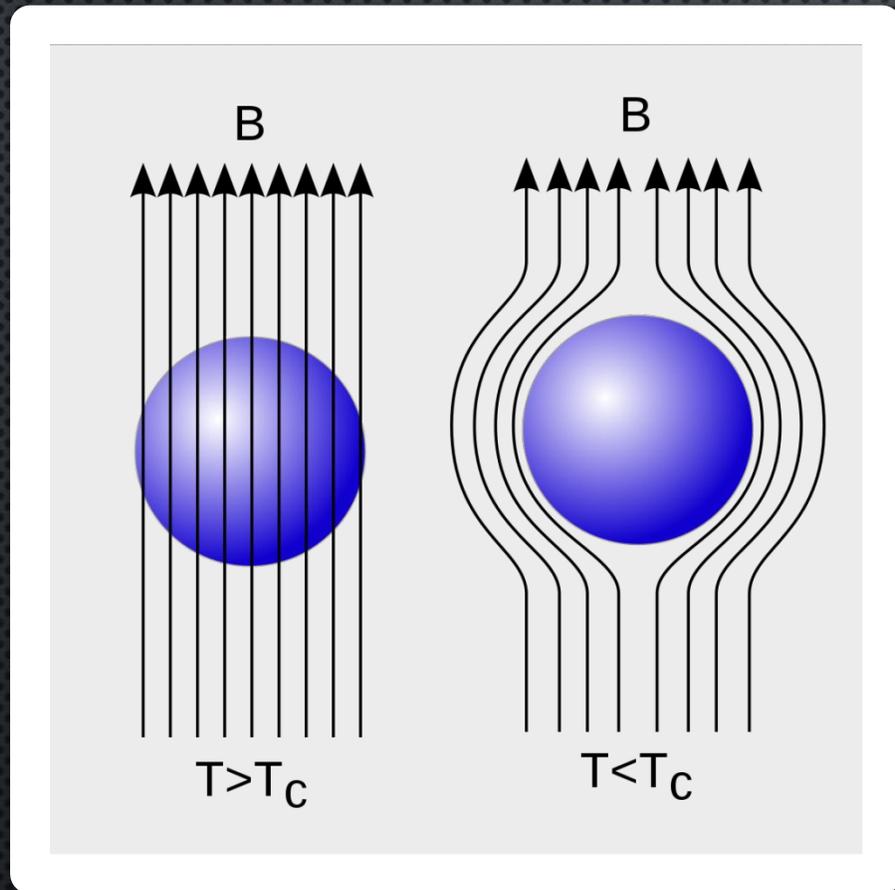
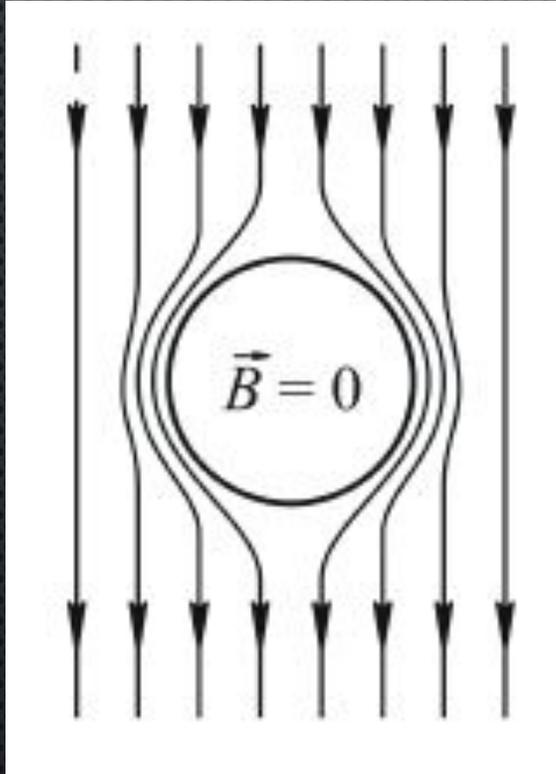


Схема эффекта Мейснера. Показаны линии магнитного поля и их вытеснение из сверхпроводника, находящегося ниже своей критической температуры

ЭФФЕКТ МЕЙСНЕРА-ОКСЕНФЕЛЬДА



$$\vec{F} = q\vec{E} + \frac{q}{c}[\vec{v} \times \vec{B}] \text{ (СГС).}$$

q -величина заряда, v - скорость его движения, E - напряженность электрического поля, B - магнитная индукция, H - напряженность магнитного поля.

" H " и " B " связаны посредством формулы:

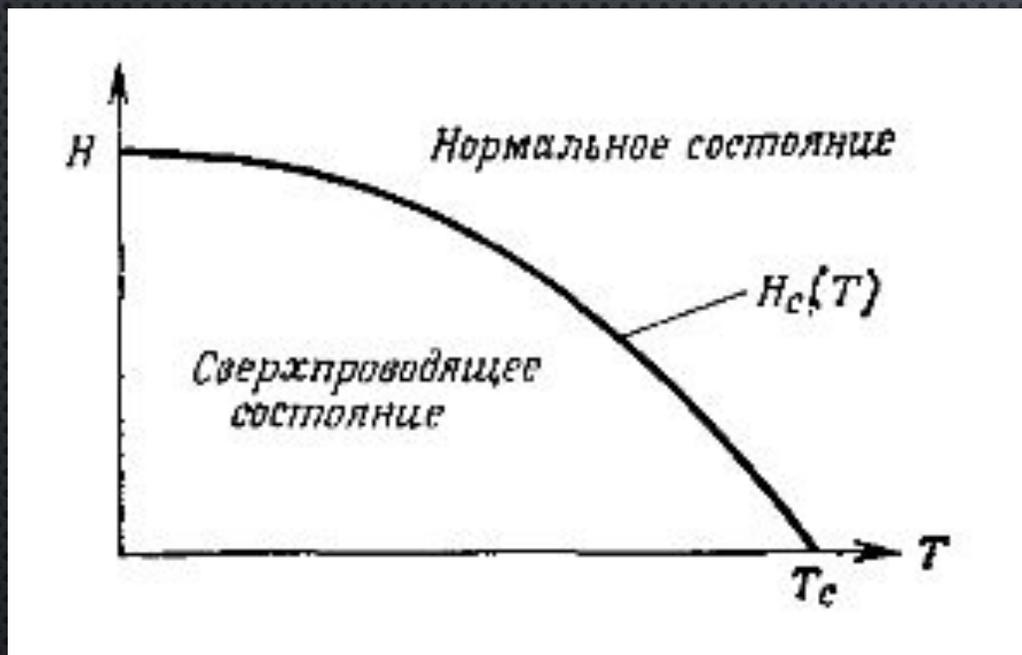
$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{M},$$

Глубина проникновения зависит от температуры так, что $\delta(T) \rightarrow \infty$ при $T \rightarrow T_c$

СВЕРХПРОВОДНИК 1-ГО РОДА.

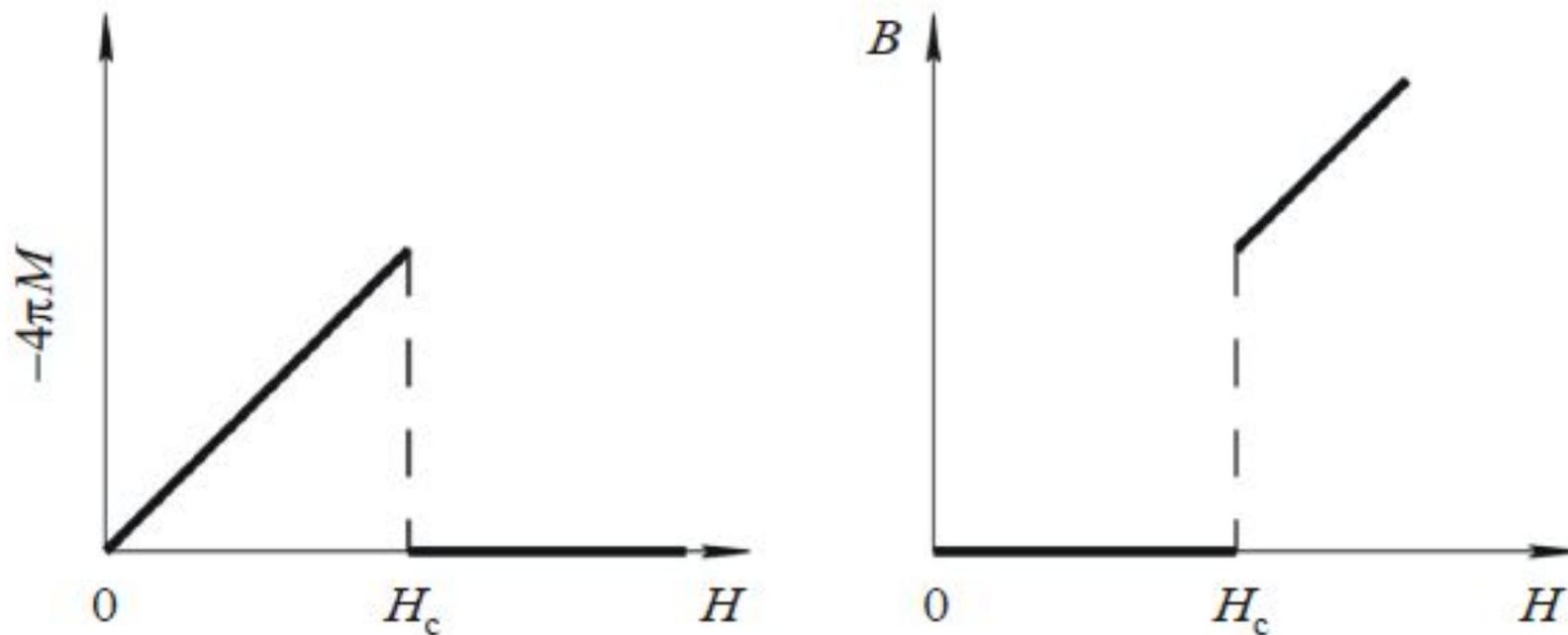
Зависимость $H_c(T)$ описывается формулой:

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - (T/T_c)^2 \right].$$



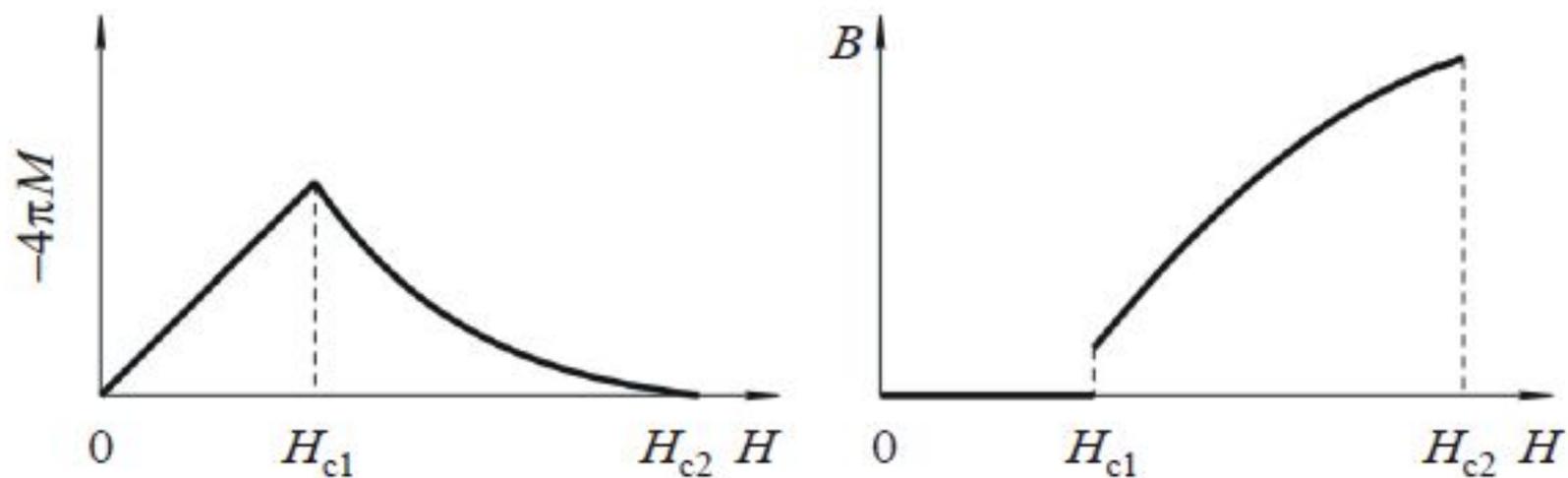
Фазовая граница H - T для
сверхпроводника 1-го рода.

СВЕРХПРОВОДНИК 1-ГО РОДА.



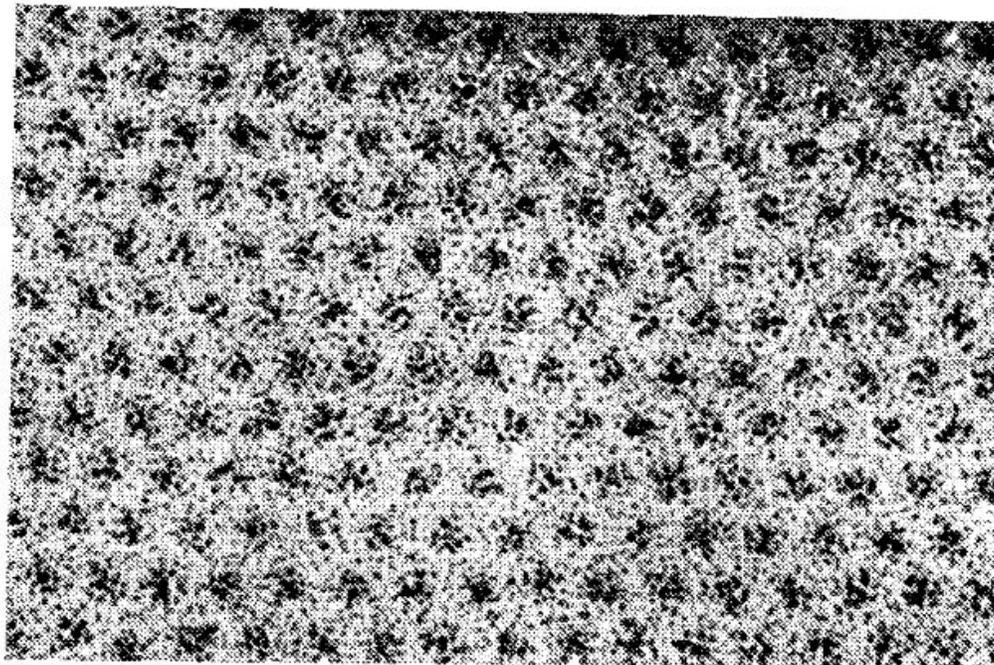
Зависимость намагниченности (магнитной индукции) от напряженности внешнего магнитного поля для сверхпроводников 1-го рода

СВЕРХПРОВОДНИК 2-ГО РОДА.



Зависимость намагниченности (магнитной индукции) от напряженности внешнего магнитного поля для сверхпроводников 2-го рода.

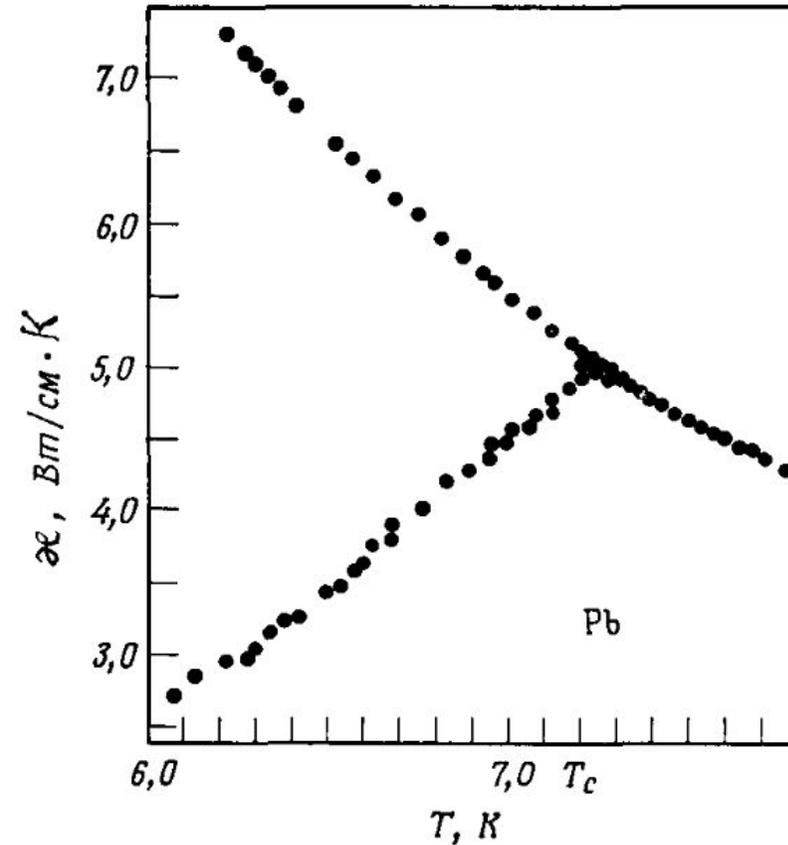
СВЕРХПРОВОДНИК 2-ГО РОДА.



Треугольная решетка вихревых линий, выходящих на поверхность сверхпроводящей фольги из $Pb_{0,98}In_{0,02}$, помещенной в поле 80 Гс, направленное перпендикулярно поверхности. (Фотография любезно предоставлена Силкоксом и Доланом.)

Вихри выявляются с помощью мельчайших частичек ферромагнитного порошка, концентрирующихся вблизи них. Расстояние между соседними вихрями составляет примерно 0,5 мкм.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА



Теплопроводность свинца.

При температурах, меньших T_c , нижняя кривая описывает теплопроводность образца в сверхпроводящем состоянии, а верхняя — в нормальном состоянии. Ниже T_c образец переводят в нормальное состояние, прикладывая магнитное поле. При этом предполагается, что поле не оказывает никакого другого влияния на теплопроводность.

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Теплоемкость нормального состояния :

$$AT+BT^3$$

Замена линейного члена в сверхпроводящем состоянии:

$$\exp(-\Delta/k_B T)$$

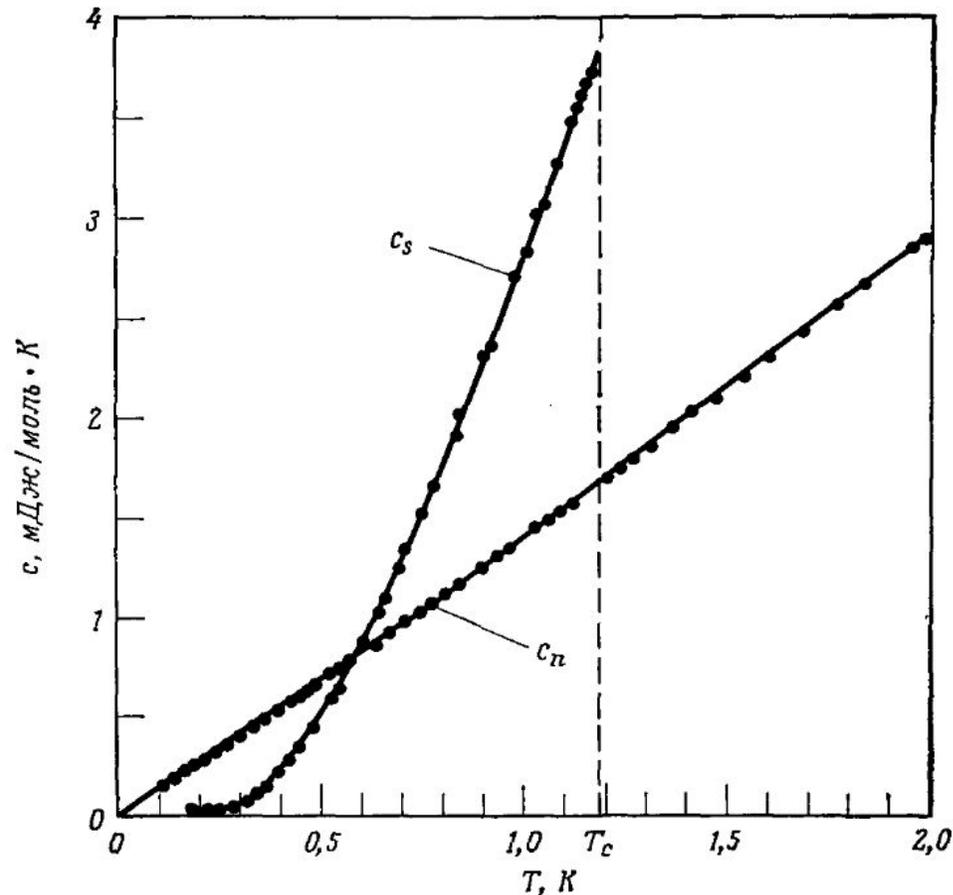


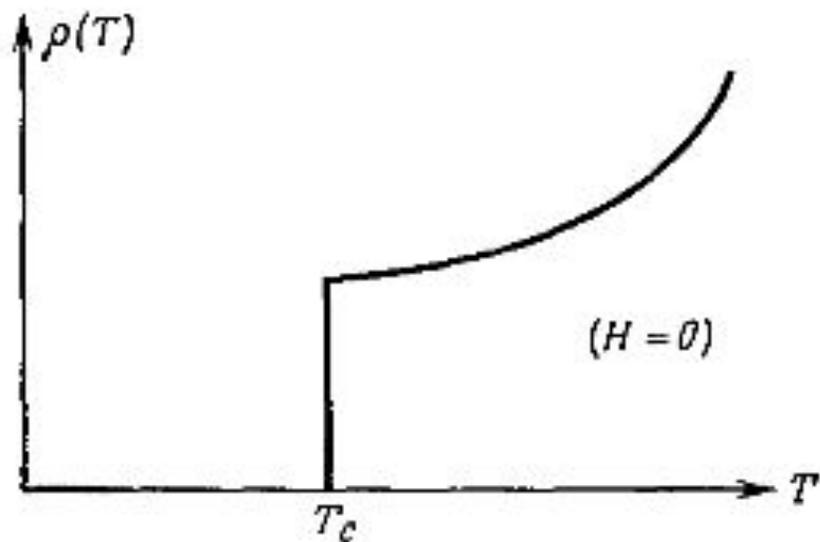
Рис. 1. Низкотемпературная теплоемкость нормального и сверхпроводящего алюминия.

Нормальная фаза при $T < T_c$ создается с помощью слабого (300 Гс) магнитного поля, которое разрушает сверхпроводящее упорядочение, но не влияет на величину теплоемкости. Температура Дебая для алюминия весьма высока, поэтому в рассматриваемом температурном интервале определяющим оказывается электронный вклад в теплоемкость (на что указывает близкий к линейному ход теплоемкости в нормальном состоянии). Величина скачка теплоемкости при температуре T_c хорошо согласуется с предсказываемым теорией результатом [см. (34.22)]; $(c_s - c_n)/c = 1,43$. Значительно ниже T_c теплоемкость c_s падает до величины, существенно меньшей c_n , что указывает на возможность существования энергетической щели.

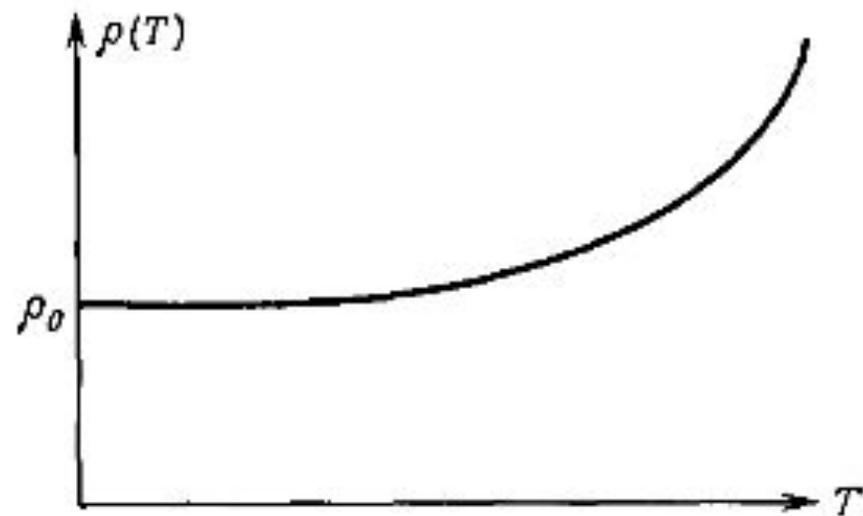
Элемент	T_c , К	H_c , Гс б)
Al	1,196	99
Cd	0,56	30
Ga	1,091	51
Hf	0,09	—
Hg α (ромбоэдр.)	4,15	411
β	3,95	339
In	3,40	293
Ir	0,14	19
La α (г.п.у.)	4,9	798
β (г.ц.к.)	6,06	1096
Mo	0,92	98
Nb	9,26	1980
Os	0,655	65
Pa	1,4	—
Pb	7,19	803
Re	1,698	198
Ru	0,49	66
Sn	3,72	305
Ta	4,48	830
Tc	7,77	1410
Th	1,368	162
Ti	0,39	100
Tl	2,39	171
U α	0,68	—
U γ	1,80	—
V	5,30	1020
W	0,012	1
Zn	0,875	53
Zr	0,65	47

ИЗОТОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

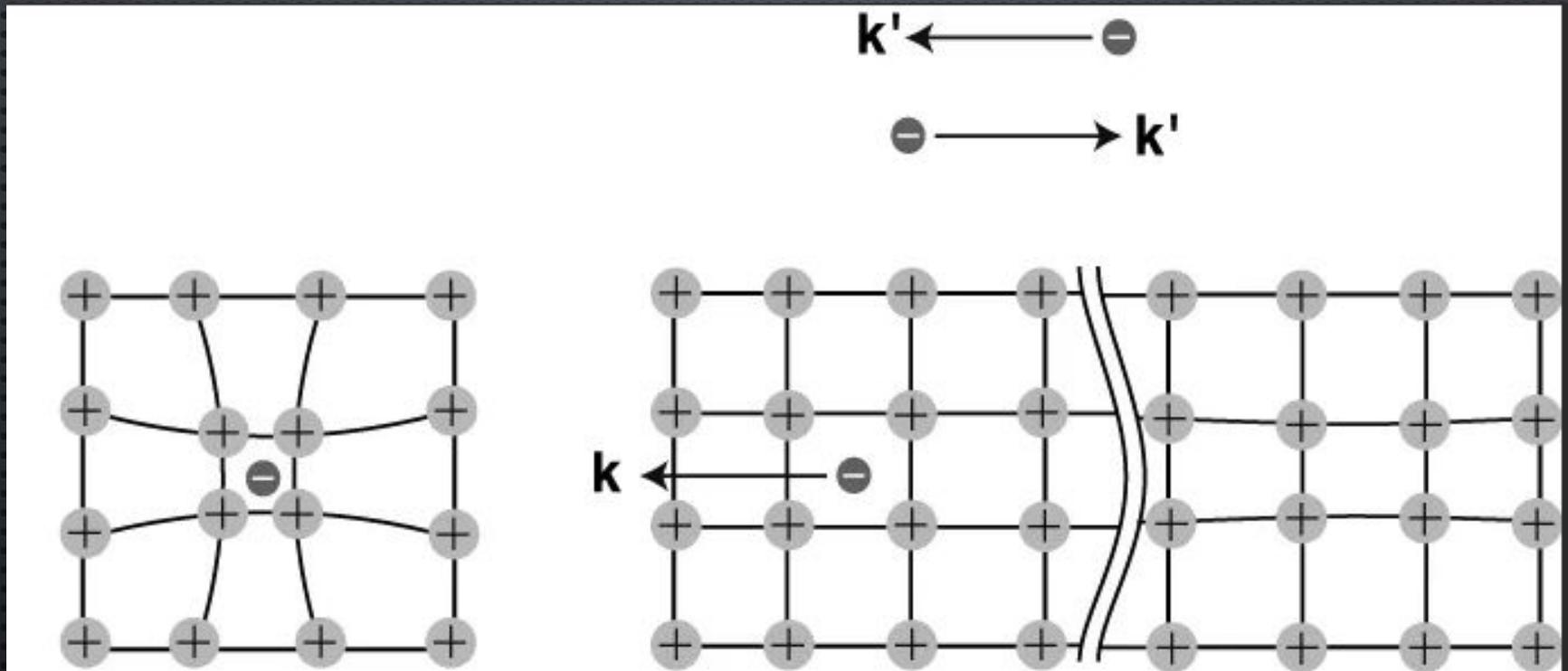
$$T_c \sim M^{-1/2}, H_c \sim M^{-1/2}.$$



Сопротивление сверхпроводника с немагнитными примесями при низких температурах (в нулевом магнитном поле)



Удельное сопротивление нормального с немагнитными примесями при низких температурах



$$\tau \sim \frac{\hbar}{\Delta e} \approx \frac{1}{\omega_D}$$

$$r_0 \approx \frac{2V_F}{\omega_D} \sim \frac{V_F}{s} a \approx \frac{10^5 \text{ м/с}}{10^3 \text{ м/с}} a \approx 10^2 a \gg a,$$

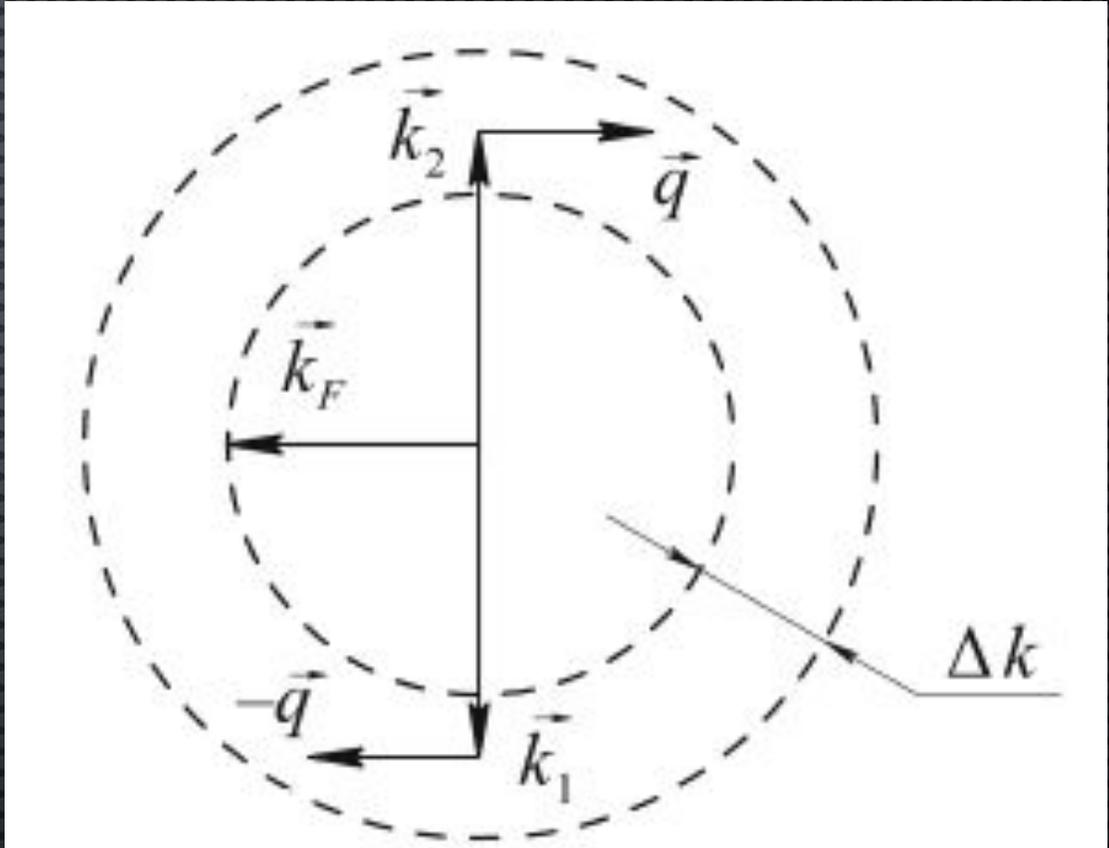
Оценка радиуса действия сил притяжения между электронами

Формула энергии связи через T_c :

$$\Delta \sim k_B T_c$$

Отношение энергии связи к кинетической энергии электронов

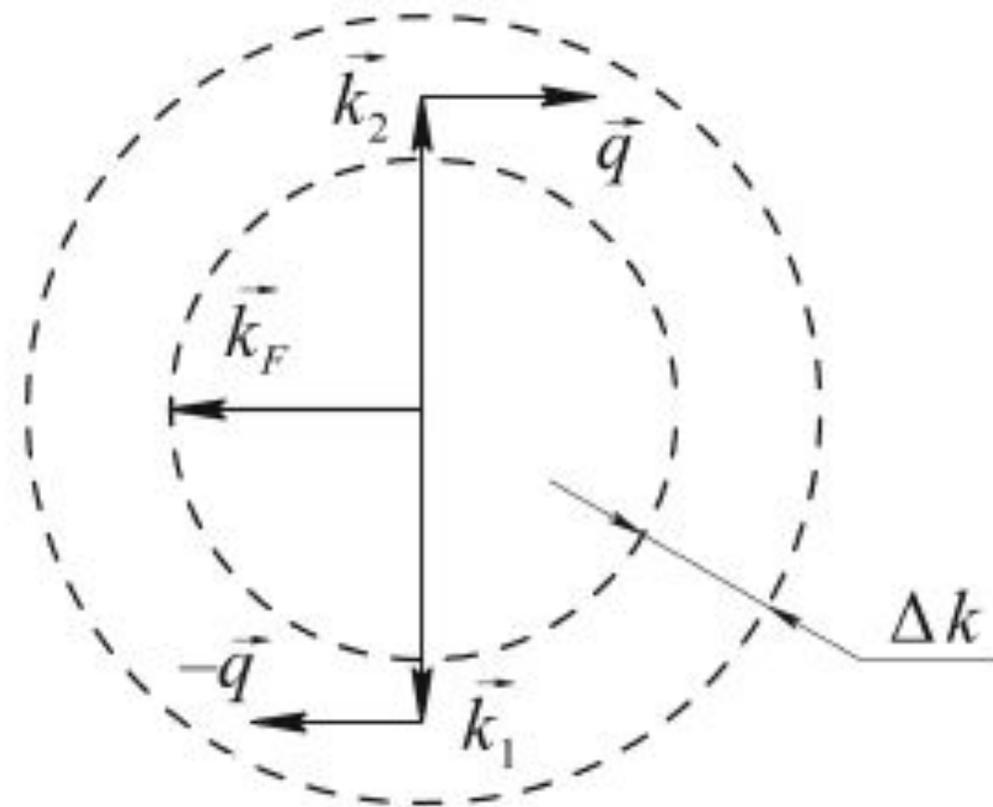
$$\frac{\Delta}{\varepsilon_F} \sim 10^{-4}$$



Волновые векторы \vec{k}_1 и \vec{k}_2 электронов, взаимодействующих с фононами, антипараллельны и лежат в узком шаровом слое толщиной $\Delta k \approx \omega_D/v_F$, вблизи сферы Ферми в обратном пространстве. Волновые векторы виртуальных фононов, с которыми взаимодействуют электроны, равны $\pm \vec{q}$

Правило перехода от трехмерных интегралов к одномерному

$$\int \frac{d^3\vec{k}}{(2\pi)^3} \dots = \frac{1}{2} v(\varepsilon_F) \int d\varepsilon \dots,$$



Волновые векторы \vec{k}_1 и \vec{k}_2 электронов, взаимодействующих с фононами, антипараллельны и лежат в узком шаровом слое толщиной $\Delta k \approx \omega_D/v_F$, вблизи сферы Ферми в обратном пространстве. Волновые векторы виртуальных фононов, с которыми взаимодействуют электроны, равны $\pm\vec{q}$



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- КВАНТОВАЯ МАКРОФИЗИКА. В.В. КИСЕЛЕВ. ЕКАТЕРИНБУРГ: УРО РАН 2010 г. 192-212 стр.
- ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА. П.В.ПАВЛОВ, А.Ф.ХОХЛОВ. УЧЕБ. – 3-Е ИЗД., СТЕП.-М.: ВЫСШ.ШК.;2000. 399-411 стр.
- ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА. Н.АШКРОФТ, Н.МЕРМИН. ТОМ 2. 340-361 стр.
- ТЕОРИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА. А.С.ДАВЫДОВ. 278-292 стр.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!