

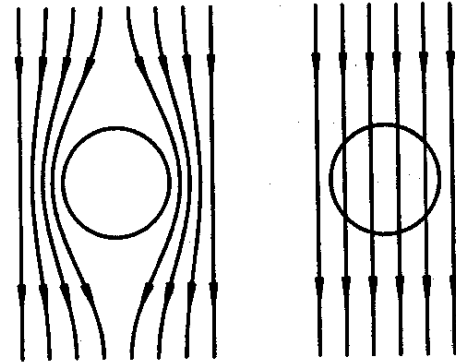
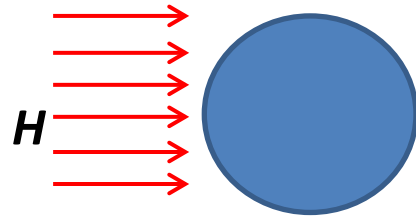
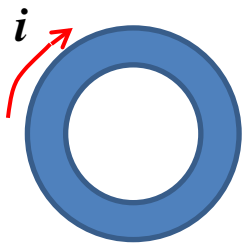
Лекция 8.1.

Введение в Сверхпроводимость

Два основных свойства сверхпроводящего состояния:

1) $\rho=0$,

2) эффект Мейсснера



Переход N→S при понижении температуры ниже T_c .

Характер фазового перехода N-S:

I род в отсутствие магнитного поля

II род в магнитном поле.

Q: почему так ?

Лекция 8.

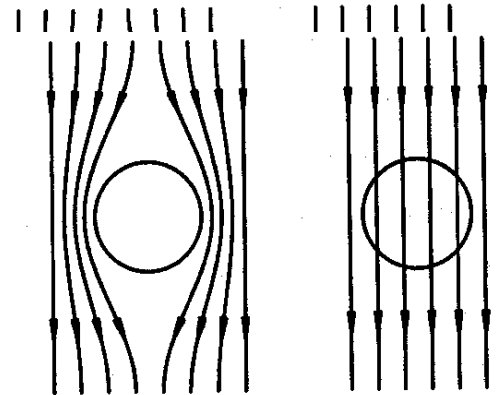
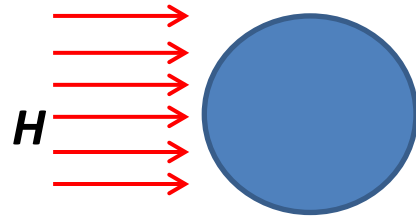
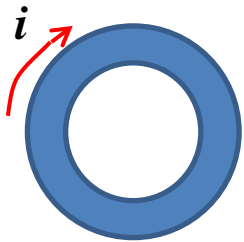
Баллистический транспорт в сверхпроводящих структурах.

S-N-S и S-I-S структуры

Два основных свойства сверхпроводящего состояния:

1) $\rho=0$,

2) эффект Мейсснера



Переход N→S при понижении температуры ниже T_c .

Характер фазового перехода N-S:

I род в отсутствие магнитного поля

II род в магнитном поле.

Q: почему так ?

A: из-за эффекта Мейсснера своб. энергия S и N состояний отличается на $H^2/4\pi$ (на 1 объема)

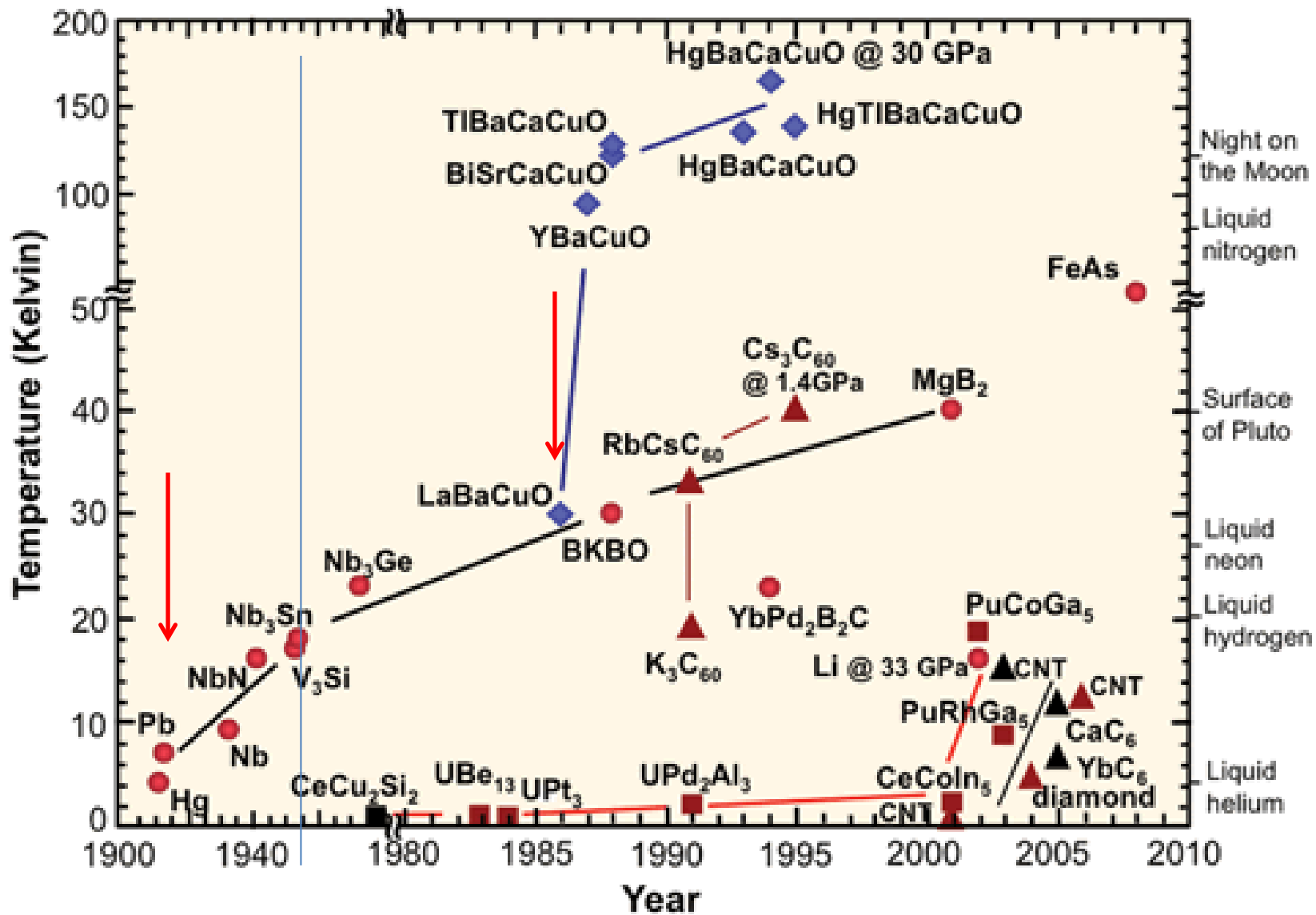
Исторические вехи

- 1898 H₂ ожижение **James Dewar** в Royal Institution of London (20cm³)
- 1906 Heike Kamerlinh-Onnes в Leiden Univ. – ожижение H₂ (4л/час)
- 1908 Не ожижение **Heike Kamerlinh-Onnes**, Gilles Holst (60cm³)
- 1902 [William Thomson](#) (Lord Kelvin), в 1902 выдвинул предположение о том, что сопротивление чистых металлов должно падать с понижением T, затем насытиться и пойти в бесконечность к абсолютному нулю T=0.
- 1911** Соревнование Heike Kamerlinh-Onnes, Gilles Holst/James Dewar
- 1933** Walter Meissner и Robert Ochsenfeld
- 1931** de Haas & Keesom: сверхпроводимость в сплавах
- 1935** Лев Шубников - высокая H_{c2} в сплавах (type II SC)
- 1935** Fritz & Heinz London: электродинамика SC
- 1950** Гинзбург-Ландау. Абрикосов- вихри.
- 1935-50** В попытках создания микроскопической теории SC терпят неудачу Dirac, Einstein, Feynman, Pauli
- 1957** John Bardeen, Leon Cooper and Robert Schrieffer
Berndt Matthias: “BCS tells us everything but finds us nothing”
- 1968** Bill McMillan *заявил, что существует верхний предел для T_c и мы уже почти приблизились к нему.* **1969** –“*Superconductivity*”, a two-volume collection of articles: *This book would represent “the last nail in the coffin of superconductivity”*

Исторические вехи

- 1964** Little
- 1964-82** Ginzburg theory group. A book “High TCSC”/ No physical limitations to Tc.
- 1973** Nb₃Ge (Tc=23K)
- 1981** Superconductivity in organics/ Later, in Cs₃C₆₀ (38K)
- 1986** Georg Bednorz and Alex Muller’s La₂BaCuO₄ (Tc=35K)
- Claude Michel and Bernard Raveau at the Univ. of Caen in France had made 123 stoichiometric copper-oxide perovskites four years before, but didn’t cool the samples!*
- 1987** M K Wu, Paul Chu YBa₂Cu₃O₇ (93K)
- 1993** E.В.Антипов, С.Н.Путилин, HgBa₂Ca₂Cu₃O₈ (138K at P=0), 166K (P=26kBar)
- 2001** MgB₂ (Tc=39K) Jun Akimitsu. Материал был синтезирован 50лет назад в CalTech. in 1957 Robinson Swift and David White in Syracuse (NY) studied Cp(T) in the range 18 – 300K and overlooked the SC/ Published a table in the J. Am. Chem. Soc.
- 2008** Hosono - FeLaAsO(F) (Tc=40K)
- 2014** December H₂S Tc=190K под давлением 1.7MBar.
- 2015** H₂S/H₃S (Tc=205K при P=2MB)

The only discovery of a high-Tc system that was driven predominantly by theory is Ba_{1-d}K_dBiO₃, or BKBO (to date at least): Len Mattheiss and Don Hamann at Bell Labs used electronic-structure calculations of an earlier low-Tc system, Ba(Pb,Bi)O₃, to predict and then make BKBO, for which their colleague Bob Cava drove the Tc to a respectable 30 K.



Переход N→S при понижении температуры ниже T_c .

Элемент	T_c (К)	H_c (Гаусс)	Соединение	T_c (К)	Год
Al	1.175	105	Nb3Sn	18.1	
Hg	4.154	411	Nb3Ge	23	1973
In	3.4	281	LaSrCuO4	34	1986
Sn	3.722	305	YBa2Cu2O7	92.4	1987
Pb	7.196	803	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈ Е.В.Антипов, С.Н.Путилин	133	1988
Nb	9.25	2060		166K (P=26kBar)	
			MgB2	39	2001
			LaFeAsO(F)	40	2008
			SmFeAsO(F) GdFeAsO(F)	55-56	2009
			H2S/H3S	190 (P=1.7МВ) 205 (P=2МВ)	2014- 2015

Переход N→S при понижении температуры ниже T_c .
Интерфейсная сверхпроводимость

Интерфейс	T_c (К)	Год	Объемный материал
LaAlO ₃ /SrTiO ₃	$T_c=0.3\text{K}$	(2007)	He СП
Монослой FeSe/SrTiO ₃	$T_c=105\text{K}$	2013	11K
Bi-1278/Bi-1201	75K	1994	Bi-1278 не существует Bi-1201 $T_c < 10\text{K}$
LSCO	52K	2002	40K
La ₂ CuO ₄ / La _{2-x} Sr _x CuO ₄	40K	2006- 2007	He СП

СП в научных установках



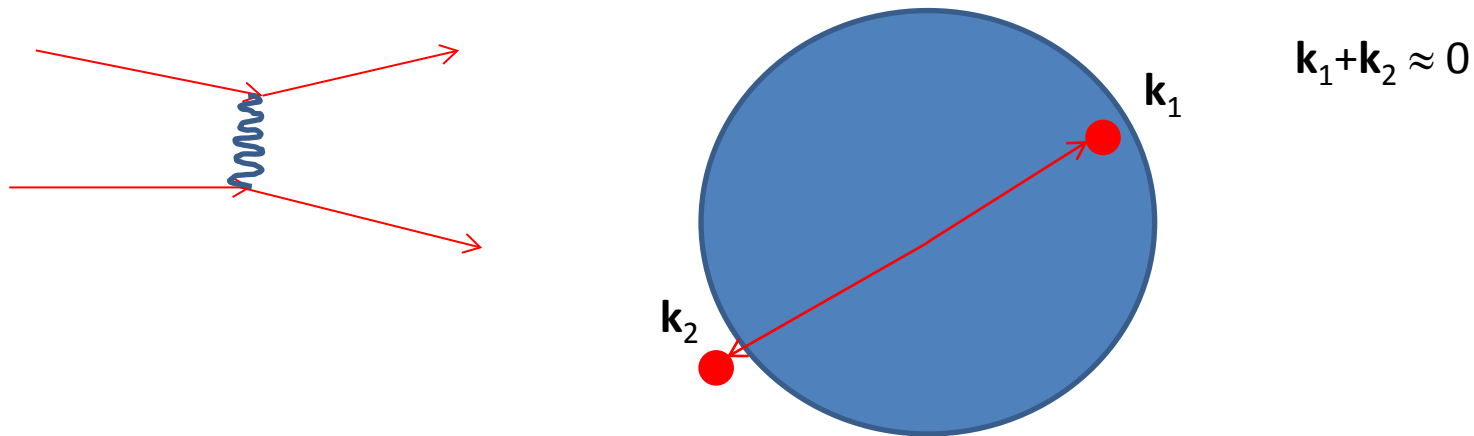
Рис. 7. Суперпроводящий соленоид (весом 224 т, включая около 15 т Nb-Ti суперпроводящего кабеля) для детекторов частиц Большого адронного коллайдера



Рис. 6. Два из 1232 суперпроводящих дипольных магнита (длиной по 15 м и весом 35 т каждый) для Большого адронного коллайдера ЦЕРН

При понижении T ниже T_c - фазовый переход в новое квантовое макроскопическое состояние.

В нормальном металле (N) носители заряда – электроны с зарядом e и спином $1/2$
В S – “куперовские” пары с зарядом $2e$ и спином 0 (синглетное спаривание)



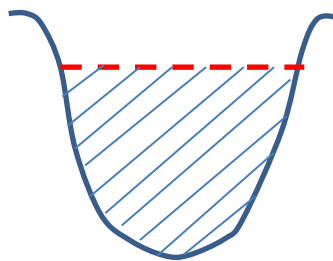
Все пары – в одном квантовом состоянии, описываются одной волновой функцией

$$\Psi(r) = |\Psi| \exp(i\varphi(r))$$

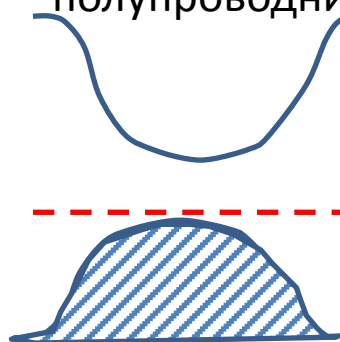
Все пары – бозоны, и все когерентны

Энергетический спектр сверхпроводника

металл

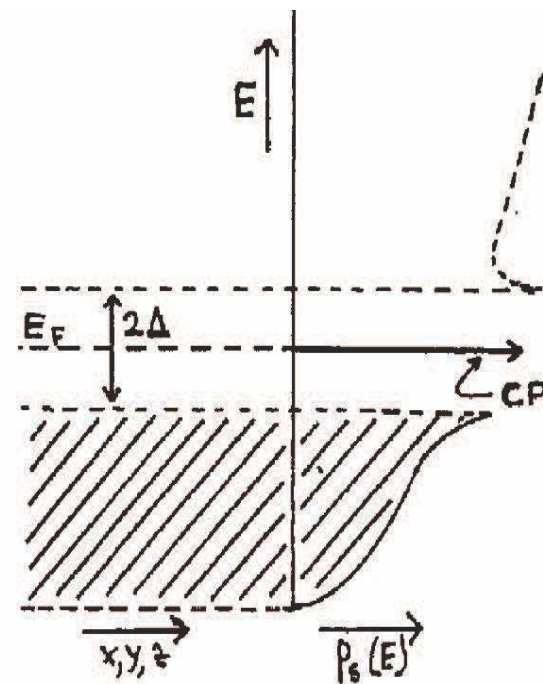
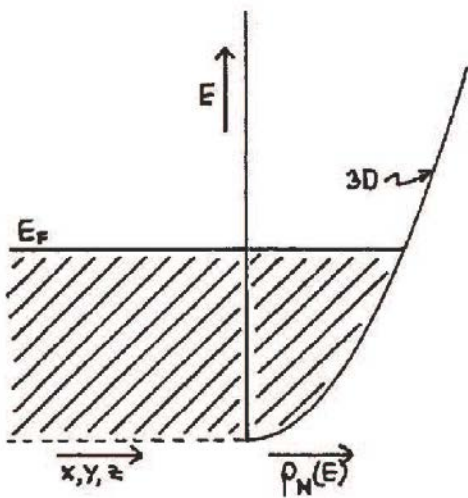


полупроводник



сверхпроводник

В спектре возникает щель 2Δ



Q: почему при казалось бы похожей энергетической щели в спектре в полупроводнике проводимость исчезает при $T=0$, а в сверхпроводнике, наоборот, становится бесконечной ?

Для разрыва пары требуется энергия 2Δ

Щель зависит от температуры $\Delta = \Delta(T)$.

Обычно $2\Delta(0) = 3.5T_c$

$\Delta \ll E_F \sim 1-10\text{eV}$

Оценим размер пары:

электроны спариваются в интервале $\delta E \sim \pm kT_c$

$$\delta p = \delta E / v_F = kT_c / v_F$$

$$\delta x \equiv \xi = h / \delta p = \hbar v_F / kT_c$$

Из микроскопической теории получается $\xi = \hbar v_F / \Delta$

ξ - размер волнового пакета пары = (50 – 5) нм

Какая физ. величина изменяется при СП фазовом переходе?

Параметр порядка $\Delta = |\Delta| \exp(i\varphi)$.

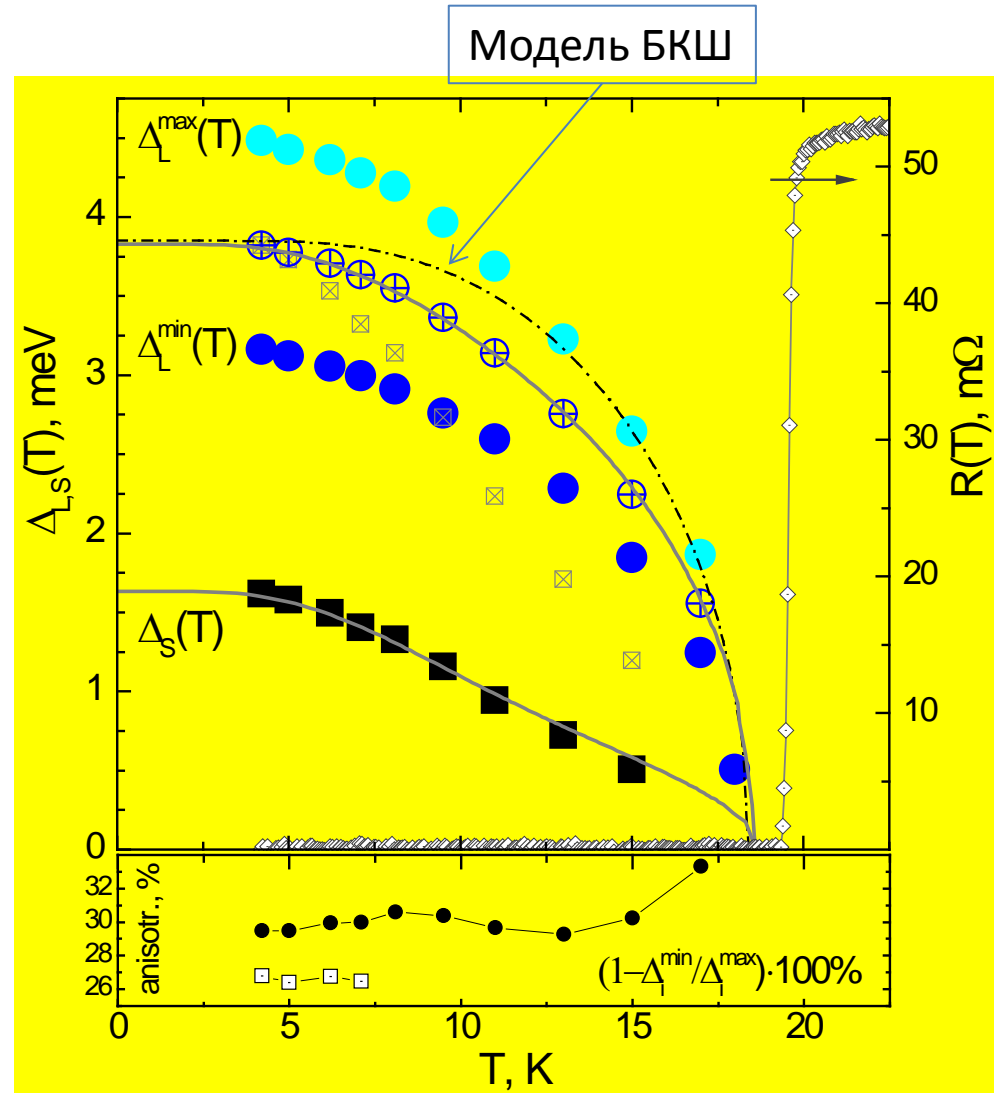
В основном состоянии СП (нет тока) фаза φ постоянна

Энергетическая щель в спектре сверхпроводника

$\Delta(T)$ – убывающая функция от T
 $\Delta(T=T_c, T>T_c)=0$ по определению
 $2\Delta(0) \approx 3.52 k_B T_c$ – в модели БКШ,
 для случая слабой связи

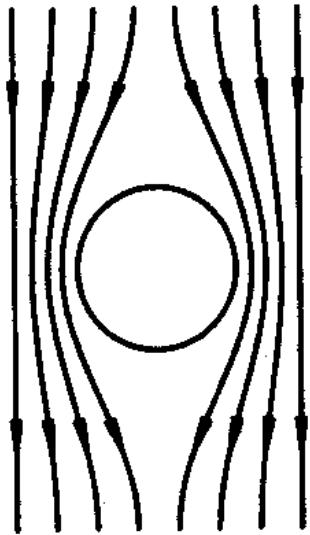
Пример измеренной зависимости $\Delta(T)$ для Ва-122:

- 1) Две щели в СП-спектре
- 2) Щели анизотропные в плоскости k_x - k_y



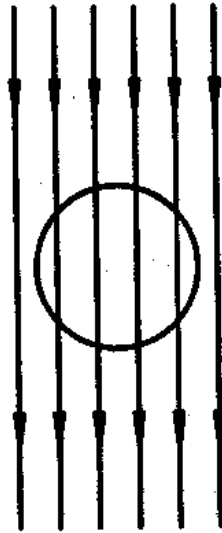
Охлаждаем образец в магнитном поле

СП



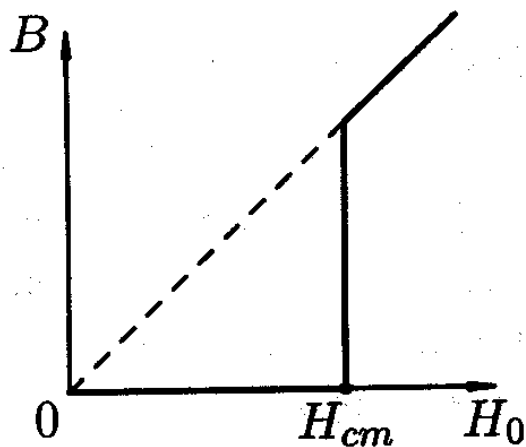
а)

идеальный металл ($\sigma = \infty$)

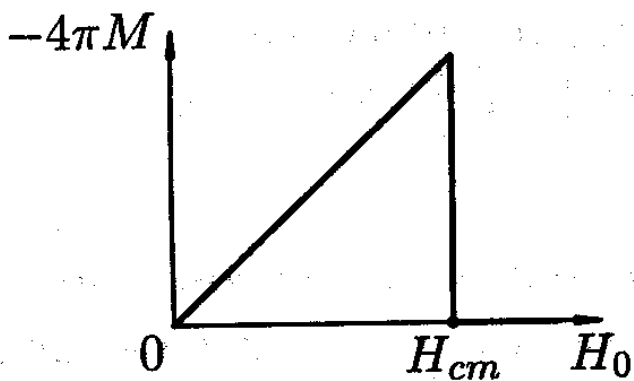


б)

Намагничивание идеального сверхпроводника (длинный цилиндр)

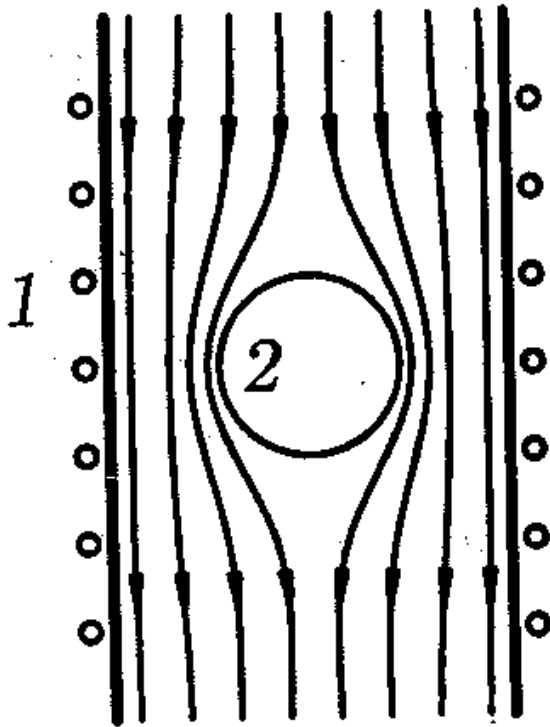


а)



б)

Промежуточное состояние СП в магнитном поле

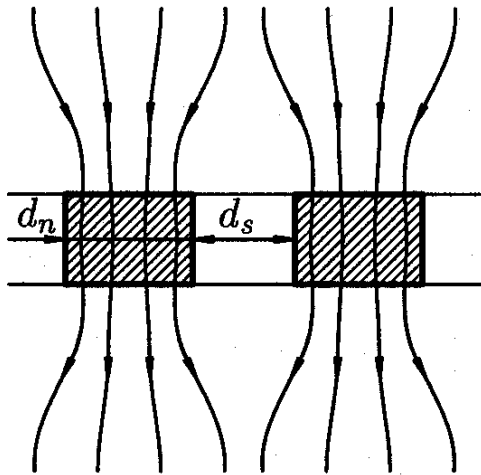


Максимальное поле H_m - на экваторе

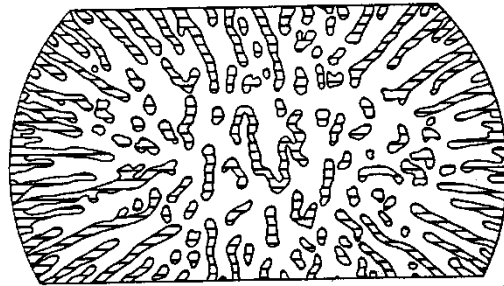
$$H_m = H_0 / (1 - n)$$

геметрия	n
Цилиндр полю	0
Цилиндр \perp полю	$\frac{1}{2}$
Шар	$\frac{1}{3}$
Плоская пластина \perp полю	1

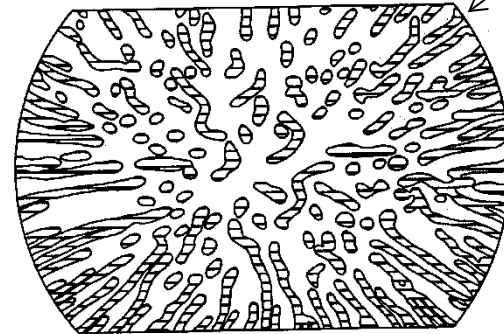
Вхождение поля в СП в промежуточном состоянии



Промеж. состояние пластины

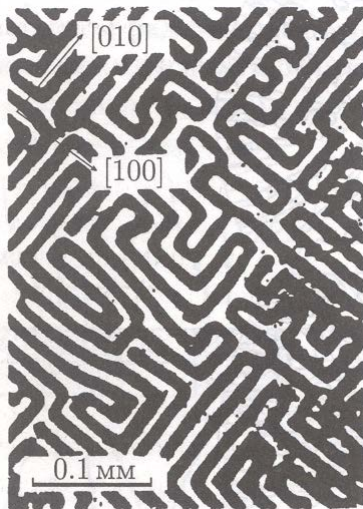


СП области заштрихованы

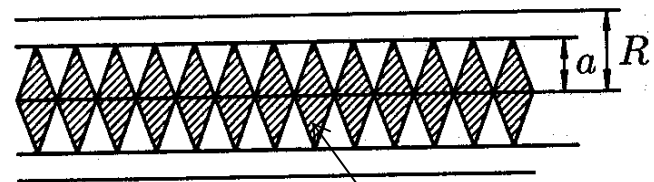


Распределение N и S областей в шаре из Sn

Промеж. состояние пластины из монокристалла Sn



Промеж. состояние провода с током



СП области заштрихованы

Термодинамика СП перехода

$$\delta F = -S\delta T \quad F_n - F_s(T=0) = \frac{H_c^2}{8\pi}$$

$$S = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)$$

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

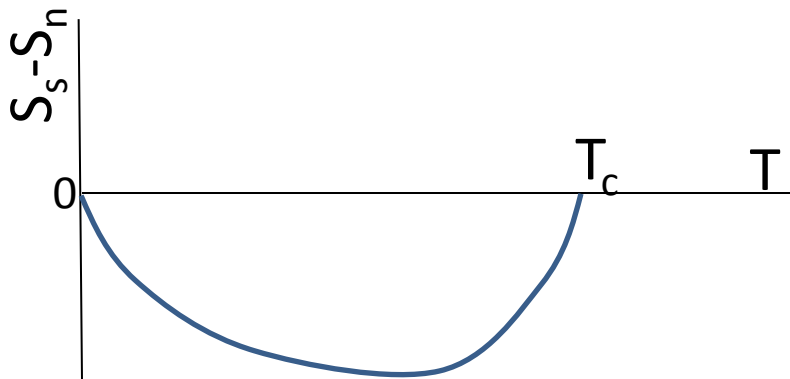
H_c - крит поле
массивного
образца

Энтропия = 0 при $T=0$. Поэтому $(dH_c/dT)|_{T=0}=0$.

При увеличении температуры H_c падает, т.е. $dH_c/dT < 0$.

Следовательно, $S_s < S_n$ во всем интервале температур.

Поле $H_c=0$ при $T=T_c$, значит $S_s = S_n$ при $T=T_c$.



SC состояние - более упорядоченное,
чем N - состояние !

Термодинамика СП перехода

$$\delta F = -S\delta T \quad F_n - F_s(T=0) = \frac{H_{cm}^2}{8\pi}$$

H_{cm} - крит поле
массивного
образца

$$S = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right) \quad S_s - S_n = \frac{H_{cm}}{4\pi} \left(\frac{\partial H_{cm}}{\partial T}\right)$$

$$C = T\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right) \quad C_s - C_n = \frac{T}{4\pi} \left[\left(\frac{\partial H_{cm}}{\partial T}\right)^2 + H_{cm} \frac{\partial^2 H_{cm}}{\partial T^2} \right]$$

$$C_s - C_n = \frac{T}{4\pi} \left(\frac{\partial H_{cm}}{\partial T}\right)_{T_c}^2$$

$H_{cm} = 0$ при $T = T_c$

