

Сверхпроводимость и ее применение

А.Н.Лавров

В.И.Тельнов,
Лекции по современной экспериментальной физике
Новосибирский Государственный университет



Сверхпроводимость и ее применение (краткий обзор)

А. Н. Лавров

*(Институт неорганической химии СО РАН, Новосибирск;
Новосибирский государственный университет, Новосибирск)*

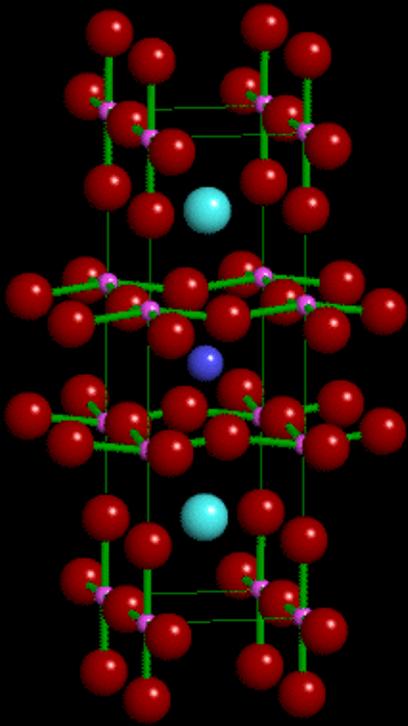


- Явление сверхпроводимости: нулевое сопротивление и эффект Мейснера (выталкивание магнитного потока). Квантование магнитного потока и эффект Джозефсона.
- Сверхпроводники первого и второго рода: критические поля, магнитные вихри Абрикосова, критические токи.
- Применение сверхпроводимости: создание высоких магнитных полей, передача и накопление электроэнергии, магнитная левитация, резонаторы и магнитометры.
- Микроскопическая природа сверхпроводимости: куперовские пары, щель в спектре электронных возбуждений, электрон-фононное взаимодействие.
- Высокотемпературная сверхпроводимость: структура и фазовая диаграмма купратов, сильные электронные корреляции, гетерофазное состояние и сверхпроводимость.

Сверхпроводимость

Сверхпроводимость стоит изучать
потому, что это очень интересно, ...

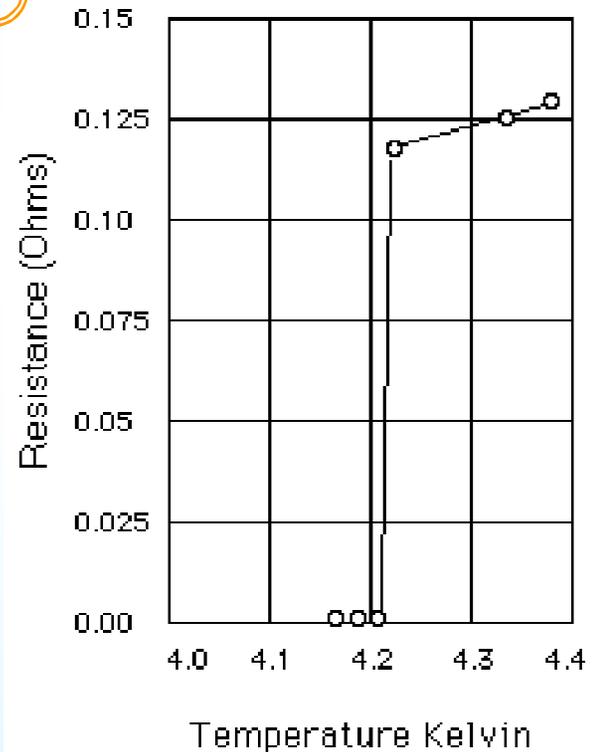
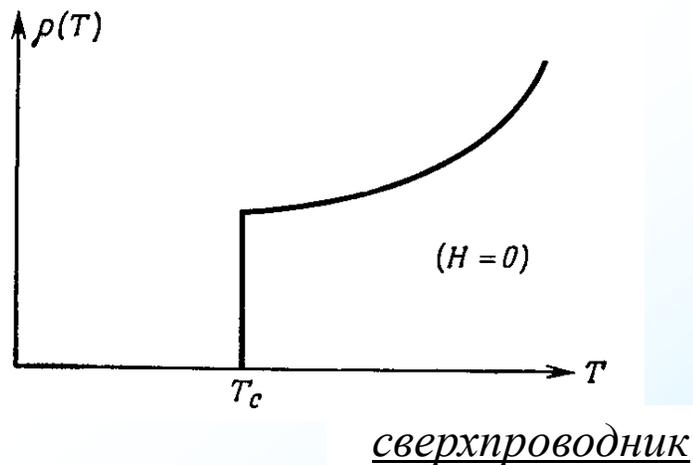
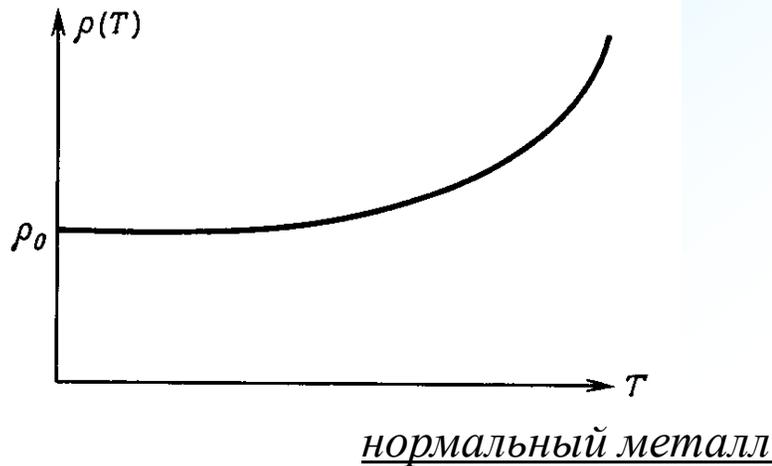
...и полезно



581 км/час

Основные свойства сверхпроводников

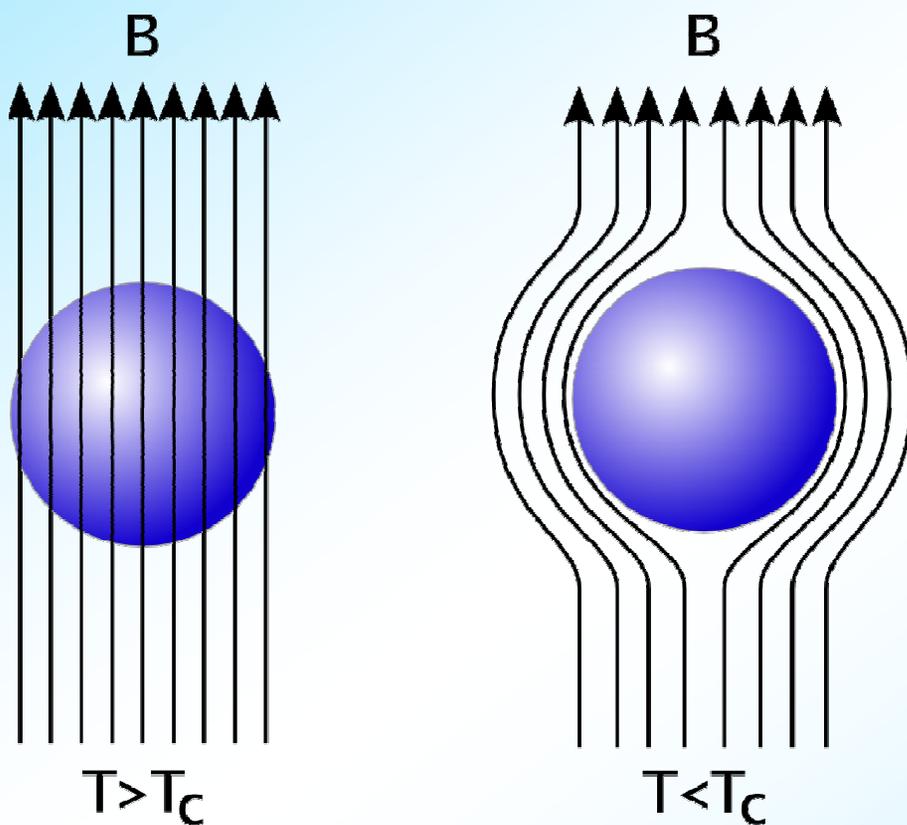
✓ Идеальный проводник – нулевое сопротивление в сверхпроводящем состоянии.



Сопротивление ртути
(Камерлинг Оннес, 1911).

Основные свойства сверхпроводников

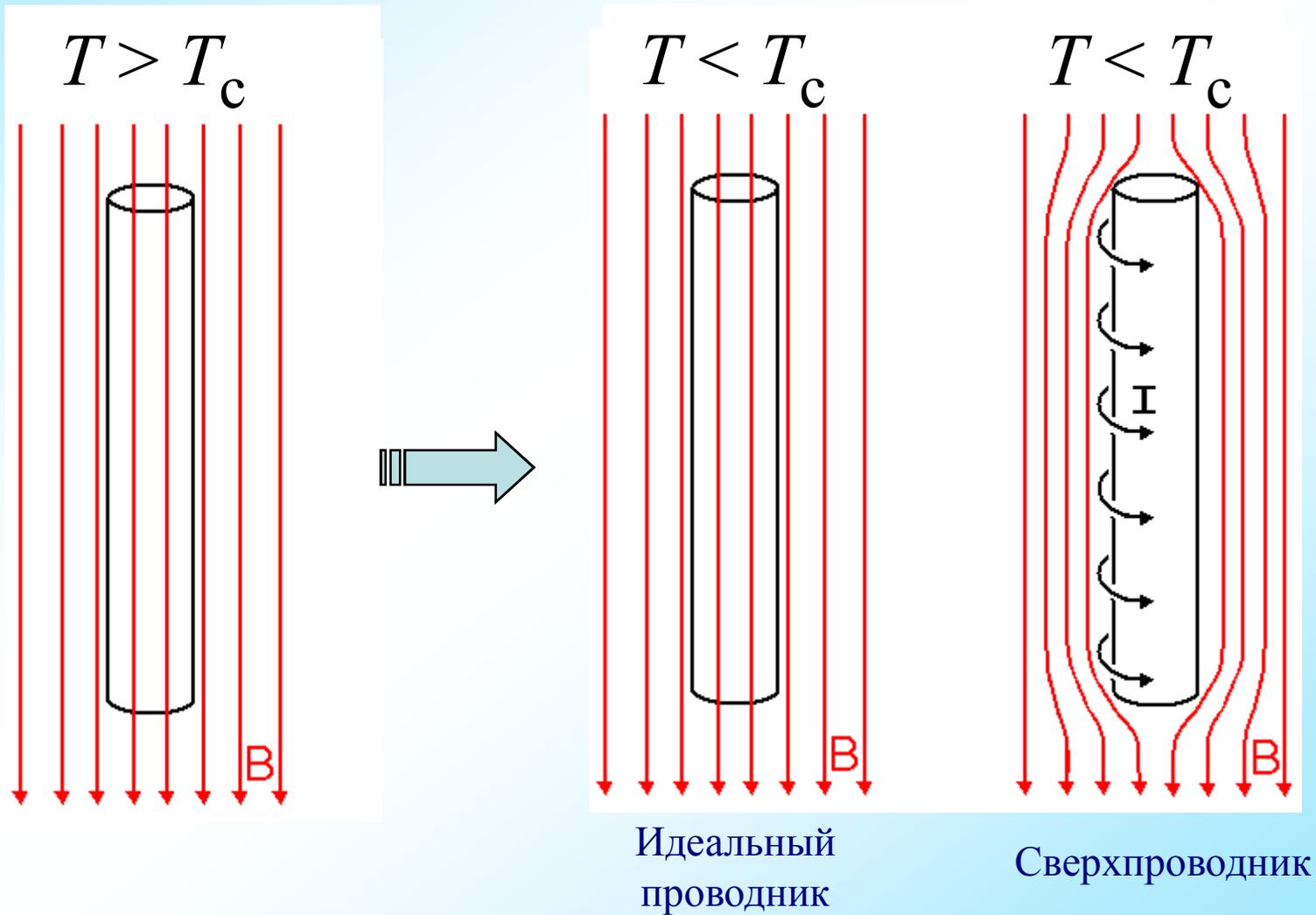
✓ Идеальный диамагнетизм – магнитное поле выталкивается из сверхпроводника (эффект Мейснера).



Левитация магнита над сверхпроводником.

Основные свойства сверхпроводников

Эффект Мейснера принципиально отличает сверхпроводник от просто идеального проводника:



Основные свойства сверхпроводников

1A																		0
1	1																	2
	H	IIA											IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	He
2	3	4											5	6	7	8	9	10
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	11	12																
	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VII	IB	II B			13	14	15	16	17	18
													Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	K	Ca	Sc	Ti	Y	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112						
	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112						

SUPERCONDUCTORS.ORG

* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Значительная часть элементов (металлов) и тысячи химических соединений переходят в состояние сверхпроводника при низких температурах.

Основные свойства сверхпроводников

Волновая функция сверхпроводящих электронов в феноменологической теории Гинзбурга-Ландау (макроскопически когерентное состояние):

$$\psi = |\psi| e^{i\varphi}$$

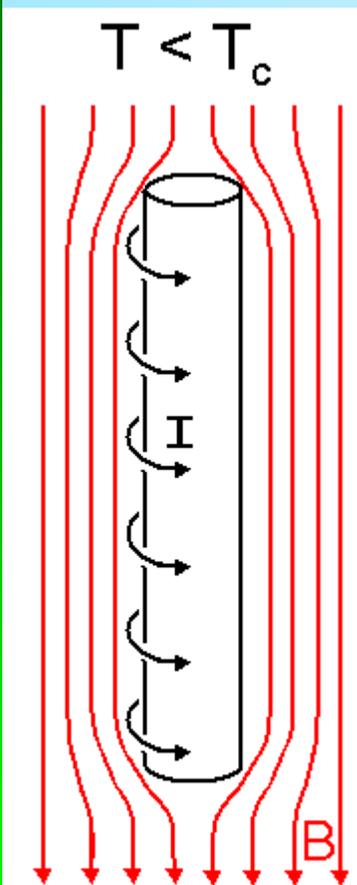
В микроскопической теории данная волновая функция описывает “куперовскую пару”, – связанное состояние двух электронов – с зарядом $2e$ и массой $2m_e$. Ток для такой волновой функции можно записать как для обычных частиц:

$$\mathbf{J} = -\frac{e}{2m} \left[\psi^* \left\{ \left(\frac{\hbar}{i} \nabla + \frac{2e}{c} \mathbf{A} \right) \psi \right\} + \left\{ \left(\frac{\hbar}{i} \nabla + \frac{2e}{c} \mathbf{A} \right) \psi \right\}^* \psi \right]$$

В объемном сверхпроводнике, где плотность сверхпроводящих

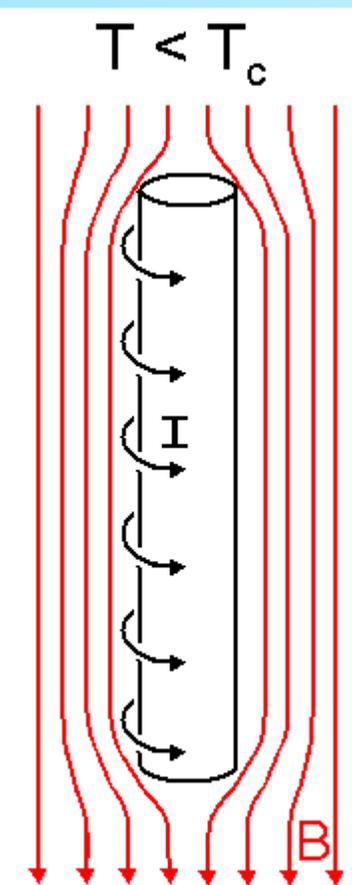
пар $n_s = |\psi|^2$ изменяется незначительно:

$$\mathbf{J} = - \left[\frac{2e^2}{mc} \mathbf{A} + \frac{e\hbar}{m} \nabla \varphi \right] |\psi|^2$$



Основные свойства сверхпроводников

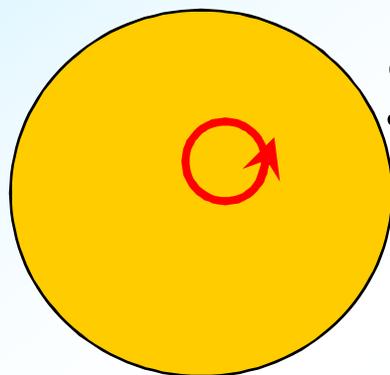
Может ли магнитное поле остаться в сверхпроводнике?



$$\mathbf{J} = - \left[\frac{2e^2}{mc} \mathbf{A} + \frac{e\hbar}{m} \nabla \varphi \right] |\psi|^2$$

$$\oint \mathbf{J} d\mathbf{l} = 0$$

Токов в объеме нет

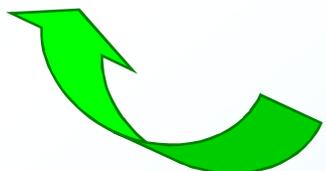


$$\frac{2e^2}{mc} \Phi$$

Φ - магнитный поток через контур

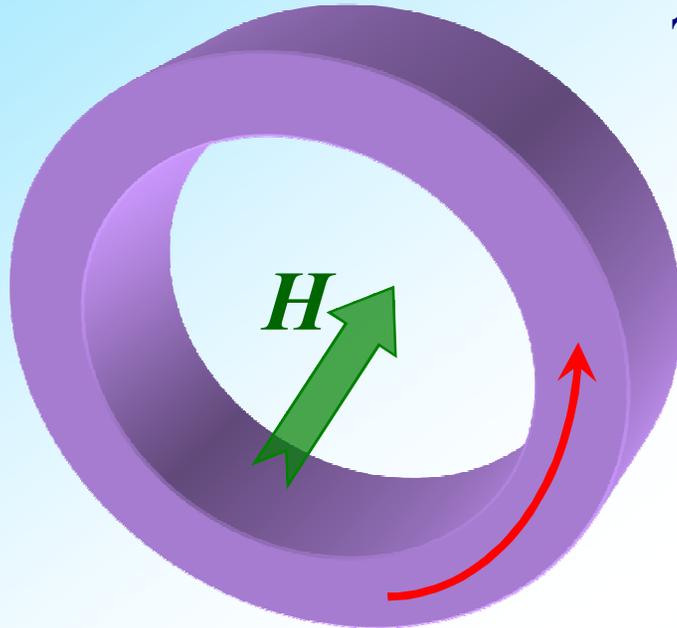
из однозначности фазы:
 $\oint \nabla \varphi d\mathbf{l} = \Delta \varphi = 2\pi n$

$$\frac{e\hbar}{m} 2\pi n$$



Для односвязного объемного сверхпроводника возможно лишь одно решение: $\Phi=0$.

Основные свойства сверхпроводников



Для неодносвязного сверхпроводника, например кольца, контур обхода фиксирован и возможны ненулевые потоки:

$$\frac{2e^2}{mc} \Phi = \frac{e\hbar}{m} 2\pi n$$

$$\Phi = n \frac{hc}{2e} = n\Phi_0$$

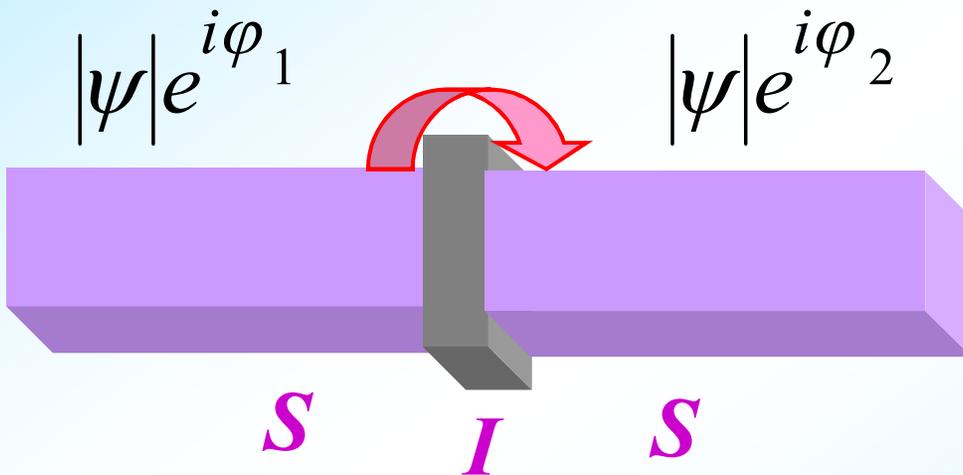
Φ_0 – квант магнитного потока $\Phi_0 \approx 2 \times 10^{-7}$ Гс \times см²

✓ Магнитный поток в сверхпроводящем контуре жестко квантован $\Phi = n\Phi_0$.

↖ Аналог квантования орбитального момента в атоме, только волновая функция описывает уже не один электрон, а весь конденсат.

Эффекты Джозефсона

Следствие макроскопической
квантовой когерентности:



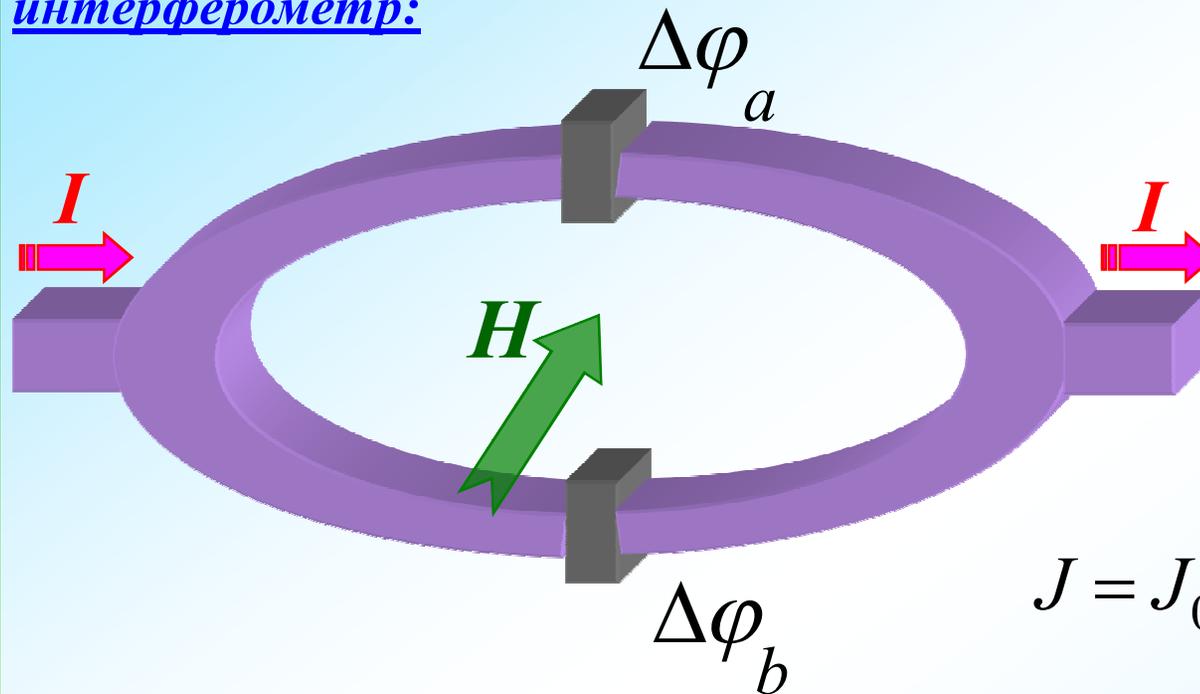
✓ Туннельный контакт может пропускать не только обычный туннельный ток электронов, но и поток сверхпроводящего конденсата, т.е. сверхпроводящих пар.

✓ Через туннельный контакт будет протекать сверхток даже при отсутствии разности потенциалов:

$$J = J_0 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Эффекты Джозефсона

Сверхпроводящий квантовый интерферометр:



Разница фаз на контактах:

$$\Delta\varphi_a - \Delta\varphi_b = 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

Сверхток через интерферометр:

$$J = J_0 \{ \sin(\Delta\varphi_a) + \sin(\Delta\varphi_b) \}$$

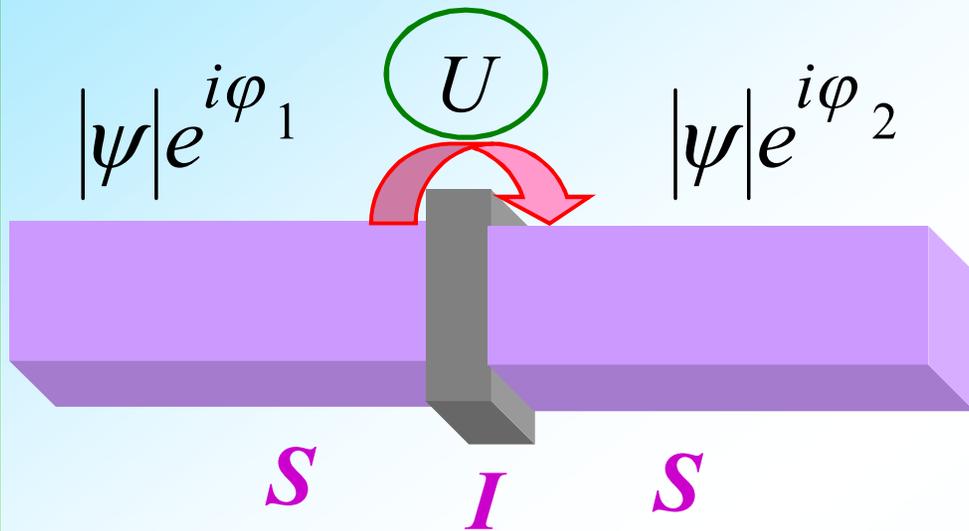
При изменении магнитного поля через кольцо интерферометра, сверхток осциллирует от 0 до $2J_0$.

$$J_{\max} = 2J_0 \left| \cos \left(\pi \frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \right|$$

Задав ток через интерферометр $I \geq 2J_0$, можно регистрировать изменения потока на уровне $10^{-3}\Phi_0 \approx 10^{-10} \text{ Гс} \times \text{см}^2$

Эффекты Джозефсона

Нестационарный эффект Джозефсона:



✓ При приложении напряжения к туннельному контакту, разность фаз начинает изменяться со временем:

$$\frac{\partial(\varphi_1 - \varphi_2)}{\partial t} = \frac{2eU}{\hbar},$$

что приводит к появлению переменного тока со строго заданной частотой:

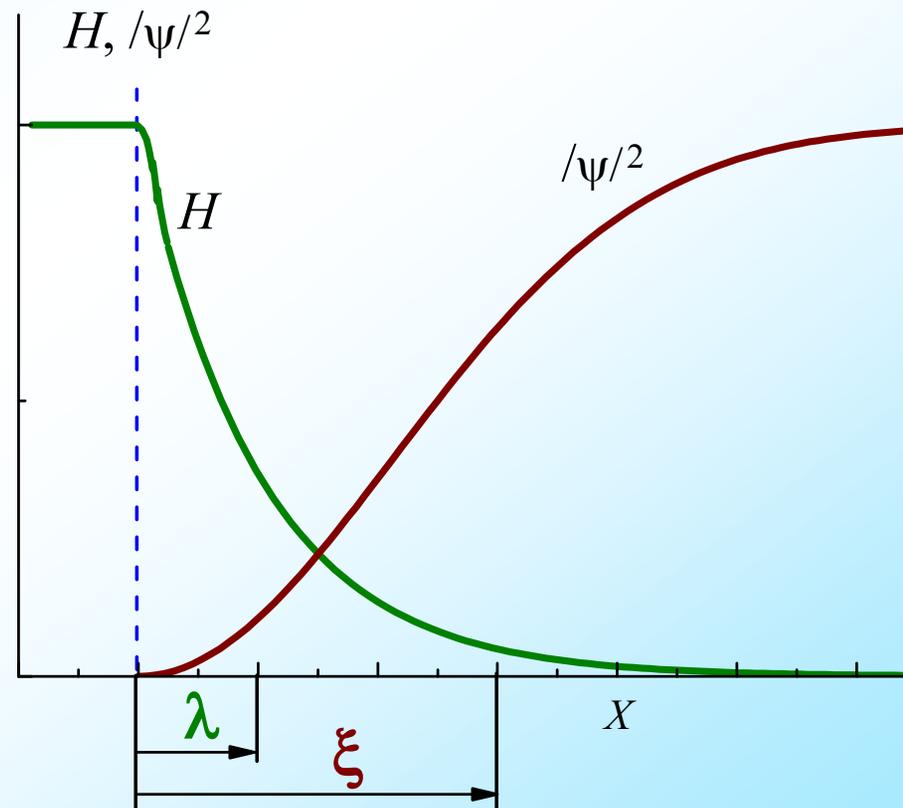
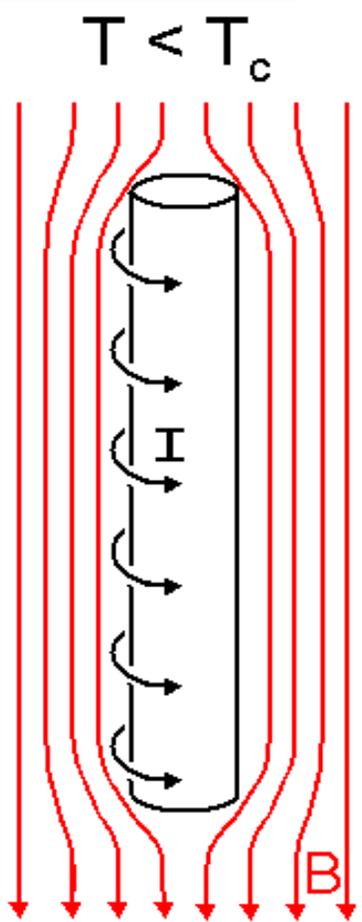
$$\omega = \frac{2eU}{\hbar}$$

Уникальная связь напряжения с частотой ($\nu/U=483.6$ МГц/ μ В) позволяет создавать СВЧ генераторы, прецизионные вольтметры, и т.п.

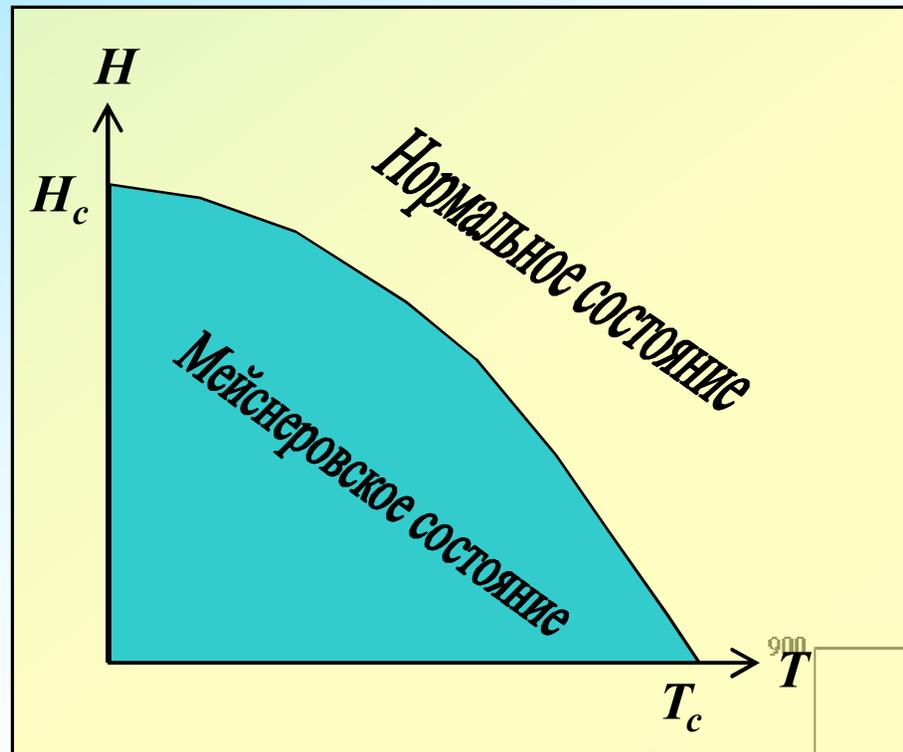
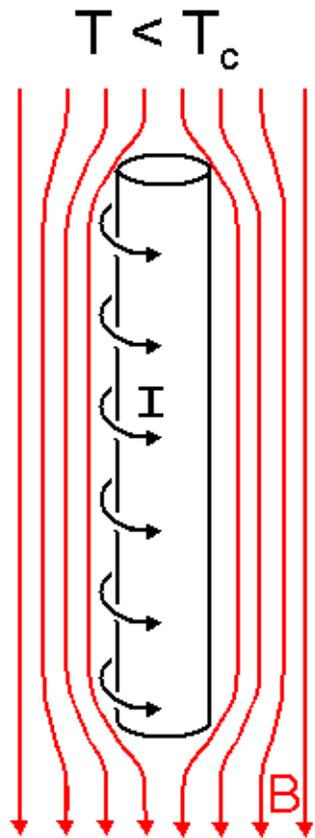
Сверхпроводники первого и второго рода

В случае внешнего магнитного поля, на поверхности сверхпроводника возникают экранирующие токи и магнитное поле экспоненциально спадает при удалении от поверхности с характерной длиной λ – “глубиной проникновения магнитного поля”.

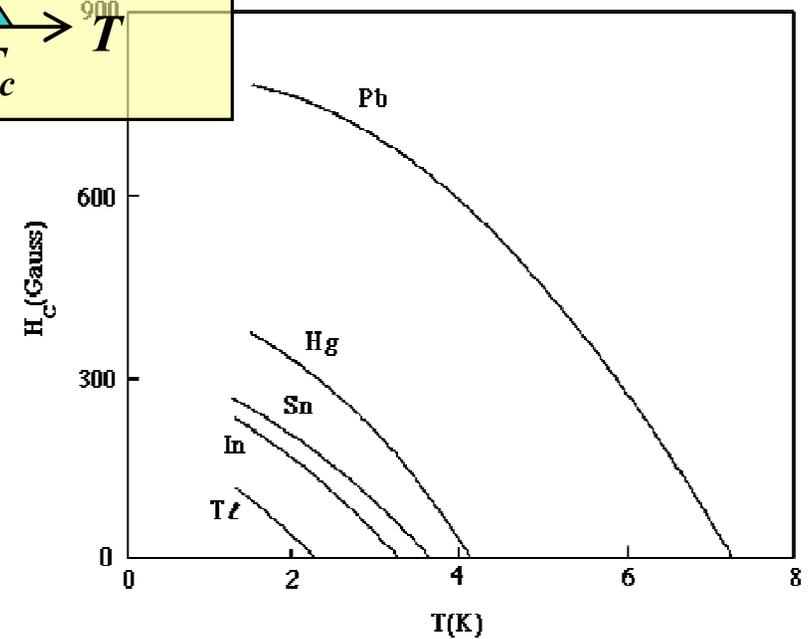
Вторым характерным масштабом в сверхпроводниках является ξ – “длина когерентности”, описывающая скорость изменения в пространстве параметра порядка $|\psi|^2$. Радиус минимальной сверхпроводящей области – ξ .



Сверхпроводники первого и второго рода

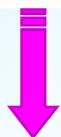
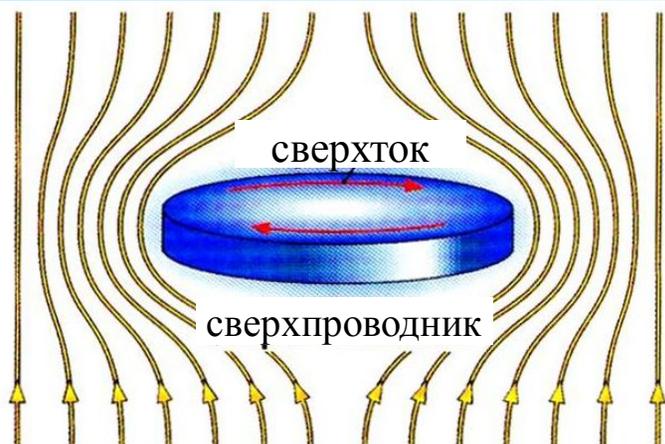


Проигрыш в энергии из-за выталкивания поля $-H^2/8\pi$ определяет критическое поле разрушения сверхпроводимости.

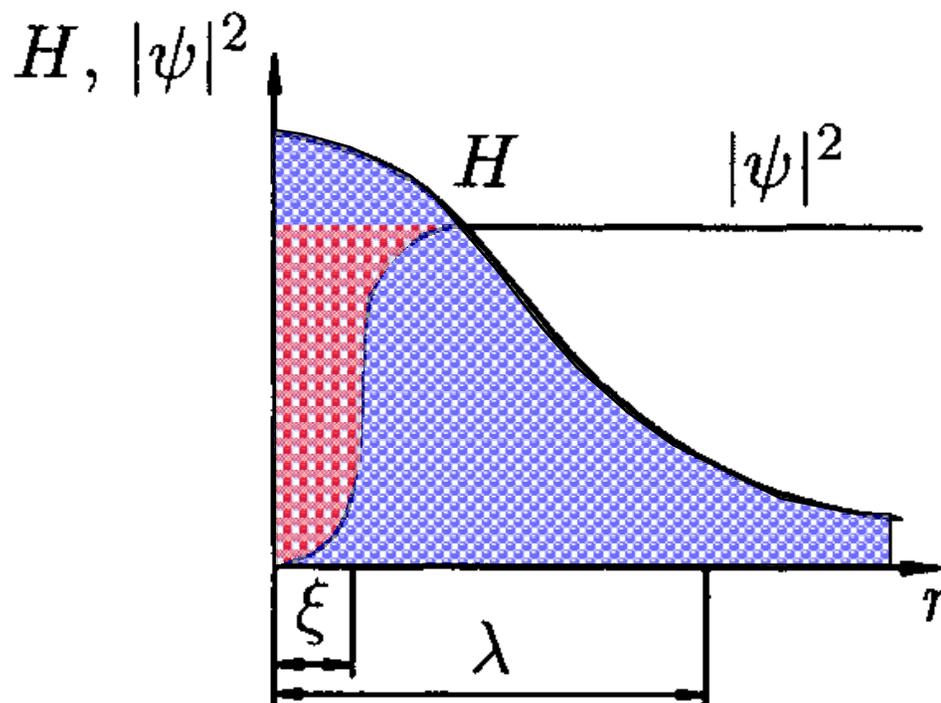
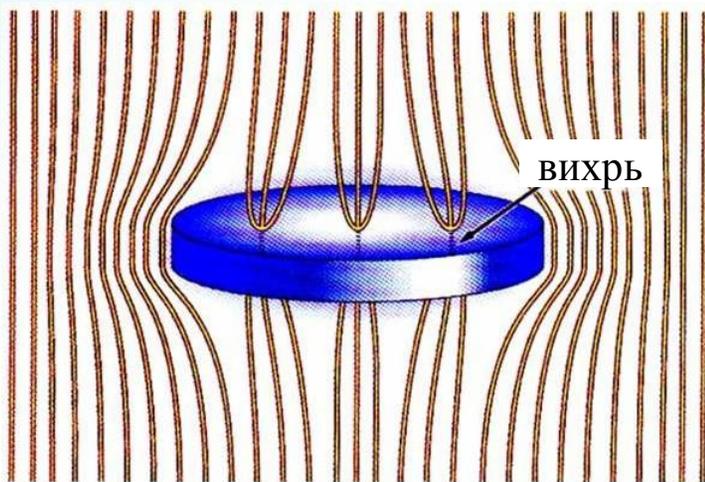


Сверхпроводники первого и второго рода

В случае, когда глубина проникновения магнитного поля λ оказывается больше длины когерентности $\xi/\sqrt{2}$, возможно образование неоднородного сверхпроводящего состояния. Выигрыш в энергии от проникновения магнитного поля в образец $\propto \frac{H_c^2}{4\pi\lambda^2}$ превысит проигрыш в энергии от образования областей нормальной фазы $\propto \frac{H_c^2}{2\pi\xi^2}$.

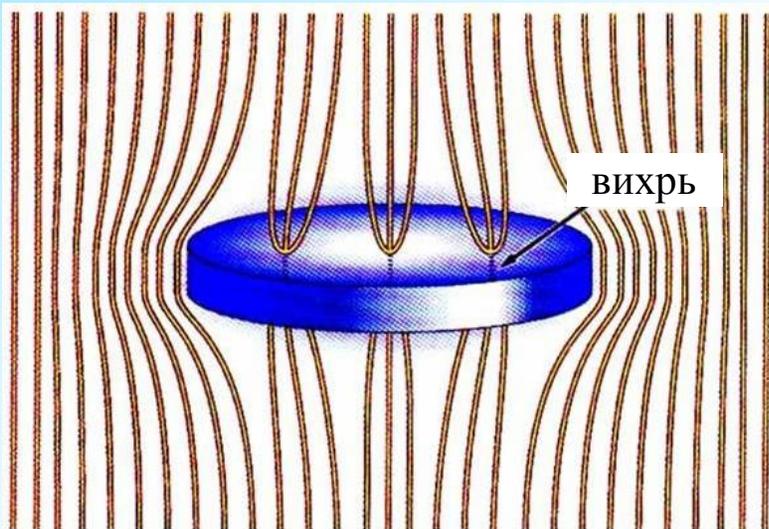


Зачем терять всё, когда можно пожертвовать лишь частью?



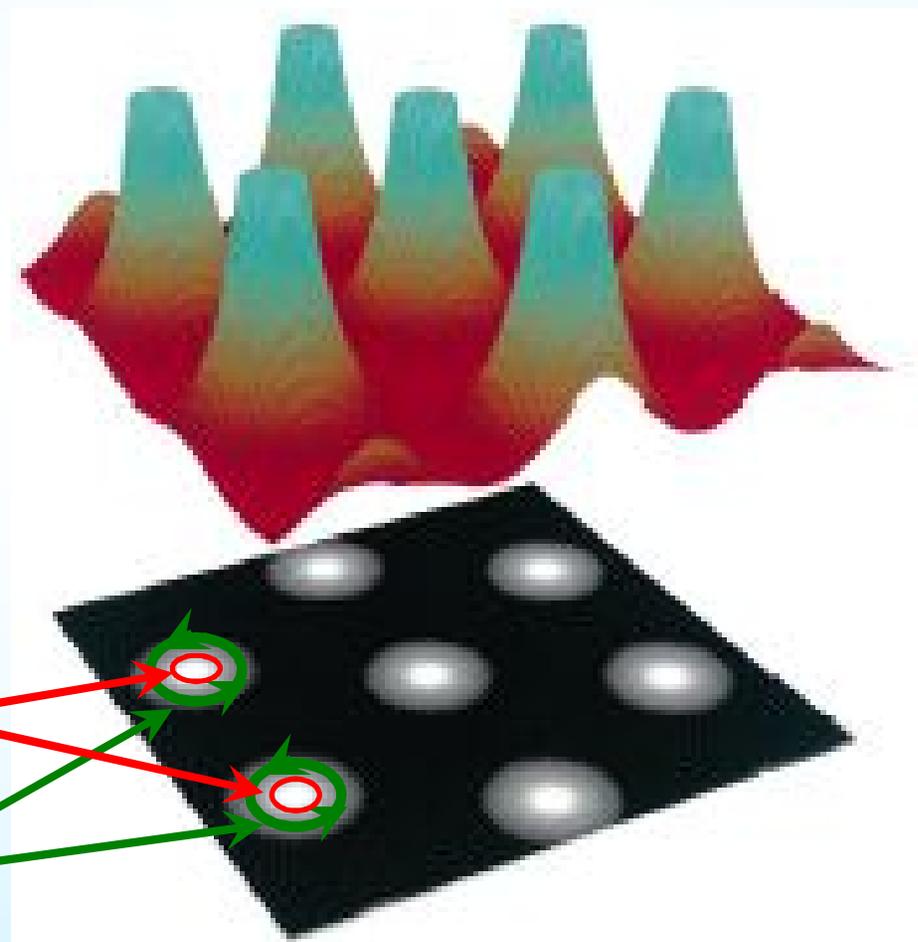
Сверхпроводники первого и второго рода

Поле проникает в образец в виде вихрей (вихрей **Абрикосова**), несущих строго по одному кванту потока. Пример распределения магнитного поля в образце:



Коры вихрей, находящиеся в нормальном (несверхпроводящем) состоянии

Экранирующие токи, защищающие остальную (сверхпроводящую) часть образца от проникновения поля



D. J. Bishop et al., *Scientific American*, 48 (1993)

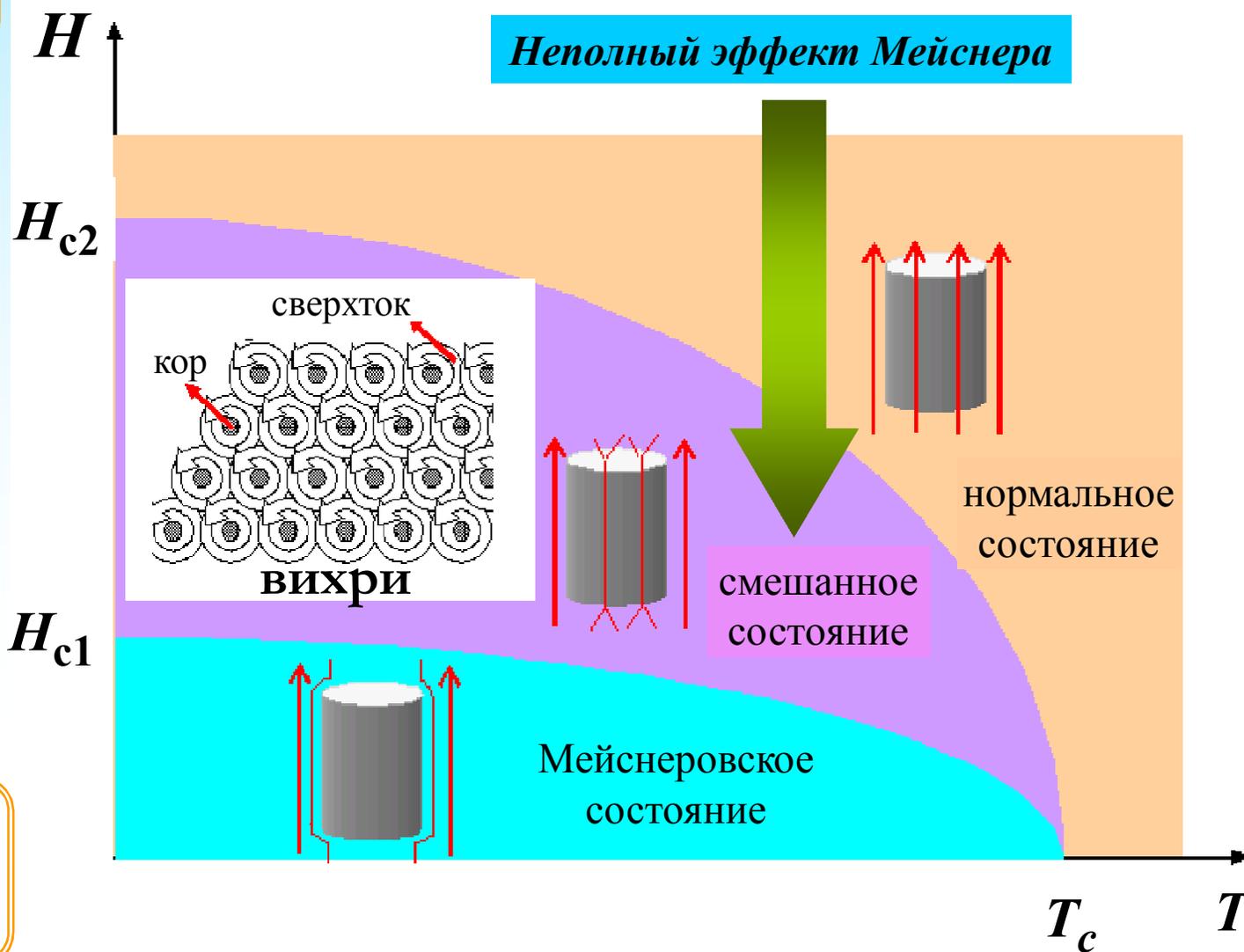
Сверхпроводники первого и второго рода

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

Верхнее критическое поле

Нижнее критическое поле

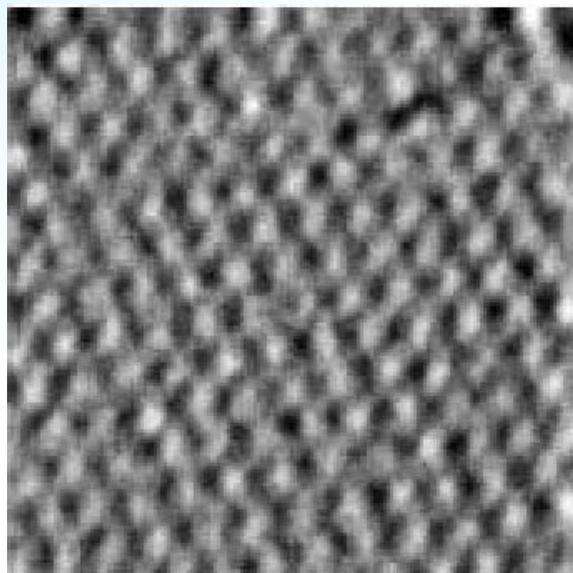
$$H_{c1} = \frac{\Phi_0}{4\pi\lambda^2}$$



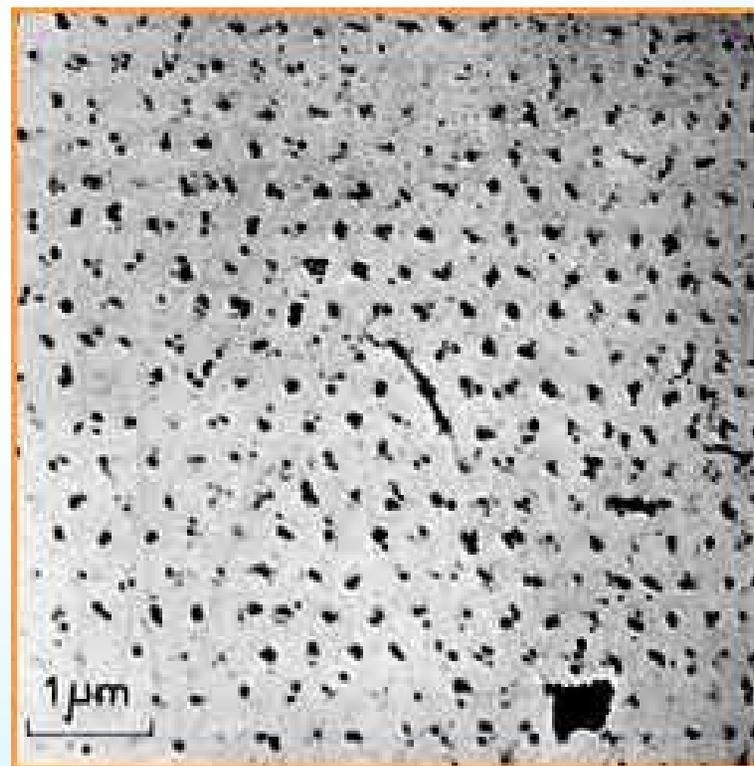
Сверхпроводники первого и второго рода

Вихри Абрикосова, хотя и являются уникальным продуктом квантовых эффектов, являются уже достаточно макроскопическими, массивными объектами и, соответственно, подлежат скорее классическому описанию. Выделился даже подраздел науки о “вихревой материи” (vortex matter).

В равновесном состоянии, вихри образуют гексагональную (треугольную) решетку. [Решетка искажается в случае анизотропного материала, отражая анизотропию λ и ξ].



NbSe₂

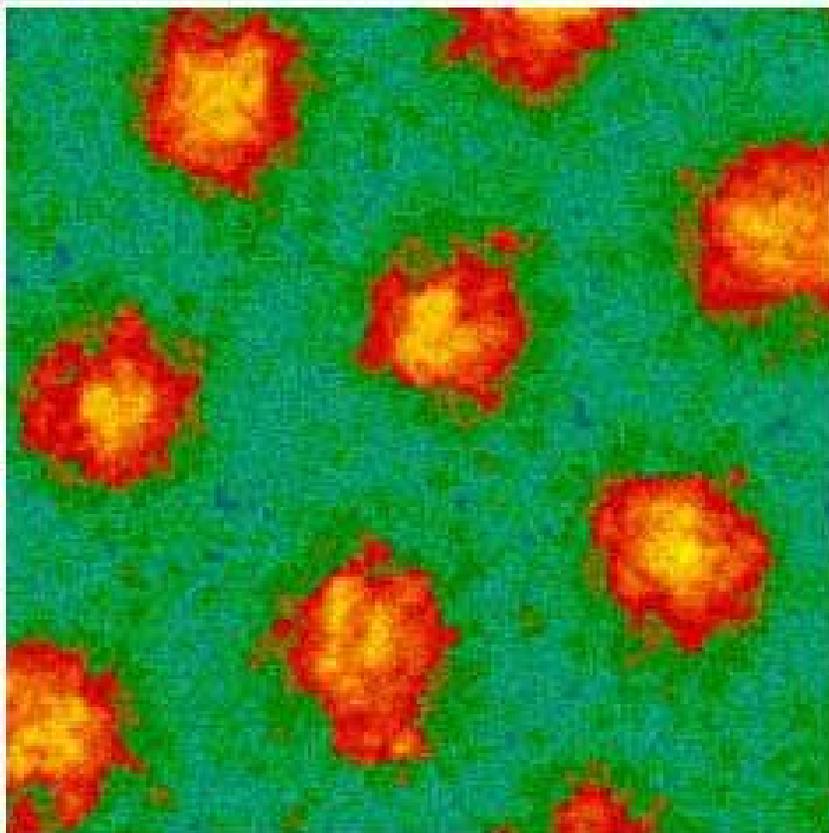


Pb-4at%In

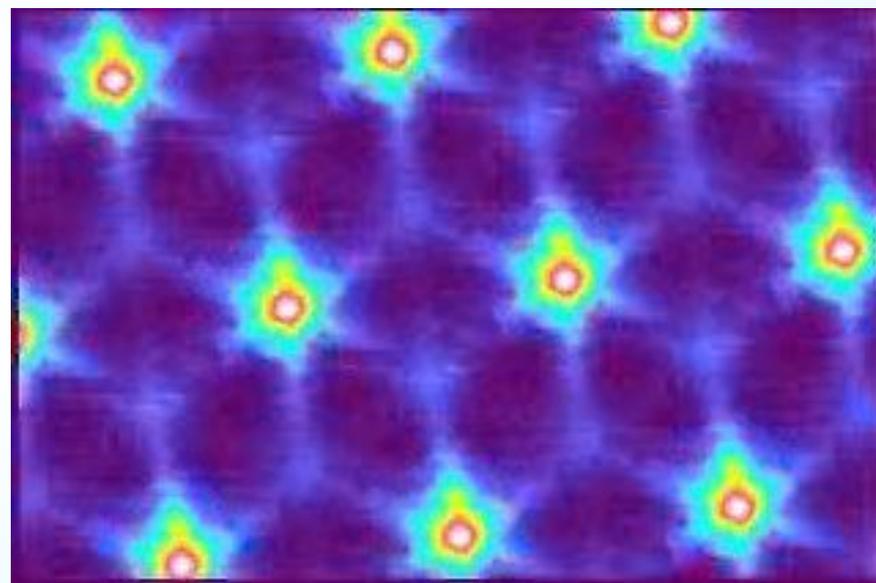
*U. Essmann and H. Trauble,
Physics Lett. A 24, 526 (1967).*

Сверхпроводники первого и второго рода

По мере развития техники, картинки вихревых решеток становятся все красивее, но их суть не меняется: для однородного материала, решетка вихрей определяется взаимодействием между вихрями (отталкиванием) и соответствует их наиболее плотной упаковке.

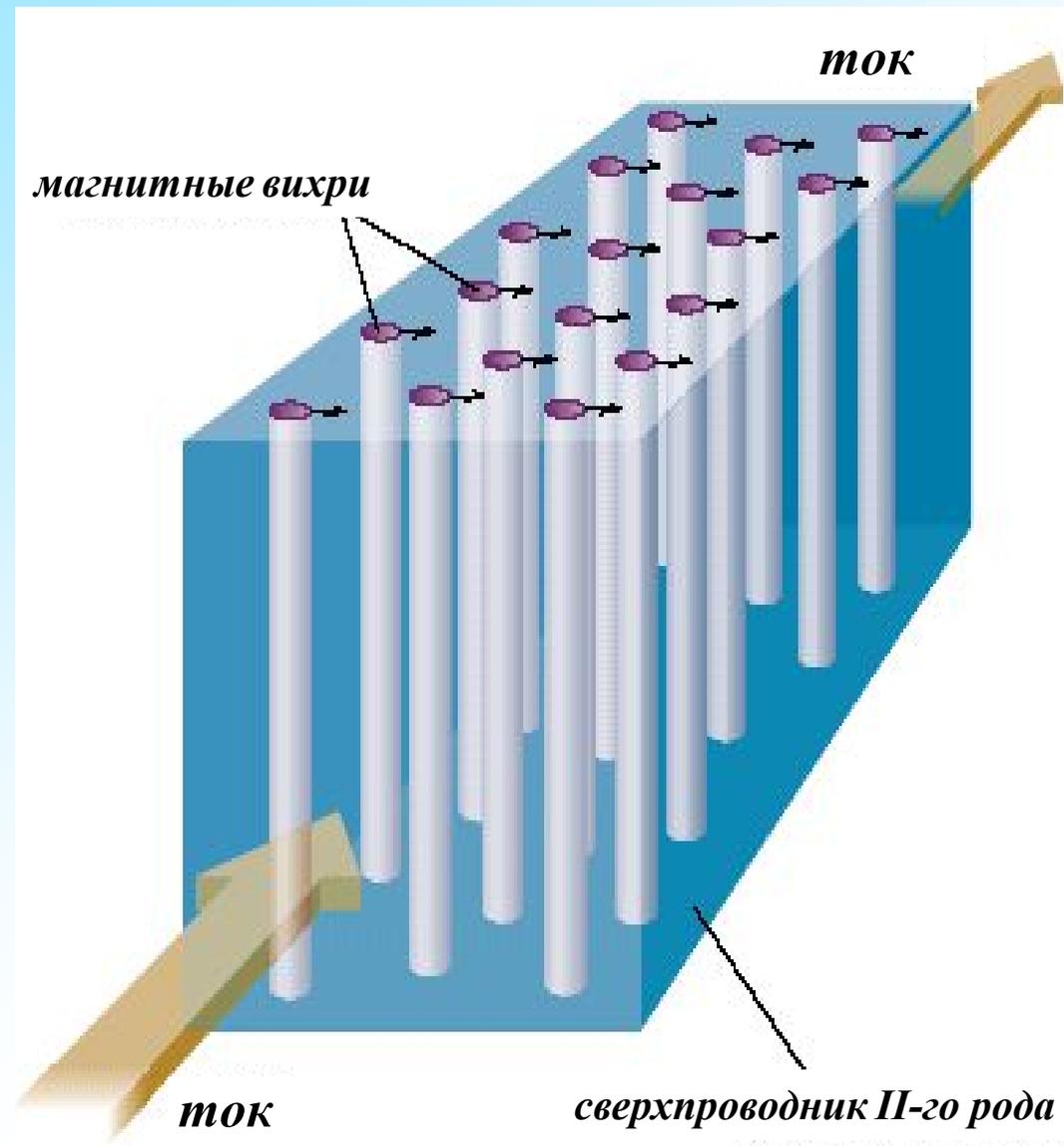


MgB₂



M. R. Eskildsen et al., Phys. Rev. Lett. 89, 187003 (2002)

Движение вихрей и критический ток



D. J. Bishop et al., *Scientific American*, 48 (1993)

Зачем вообще заниматься вихрями?

Вихри определяют величину критического тока – одного из основных “потребительских” параметров сверхпроводника:

➤ При пропускании тока через сверхпроводник с вихрями, на последние действует сила Лоренца, перпендикулярная току и магнитному полю;



➤ При определенной величине тока J_c вихри начинают скользить, вызывая диссипацию энергии;

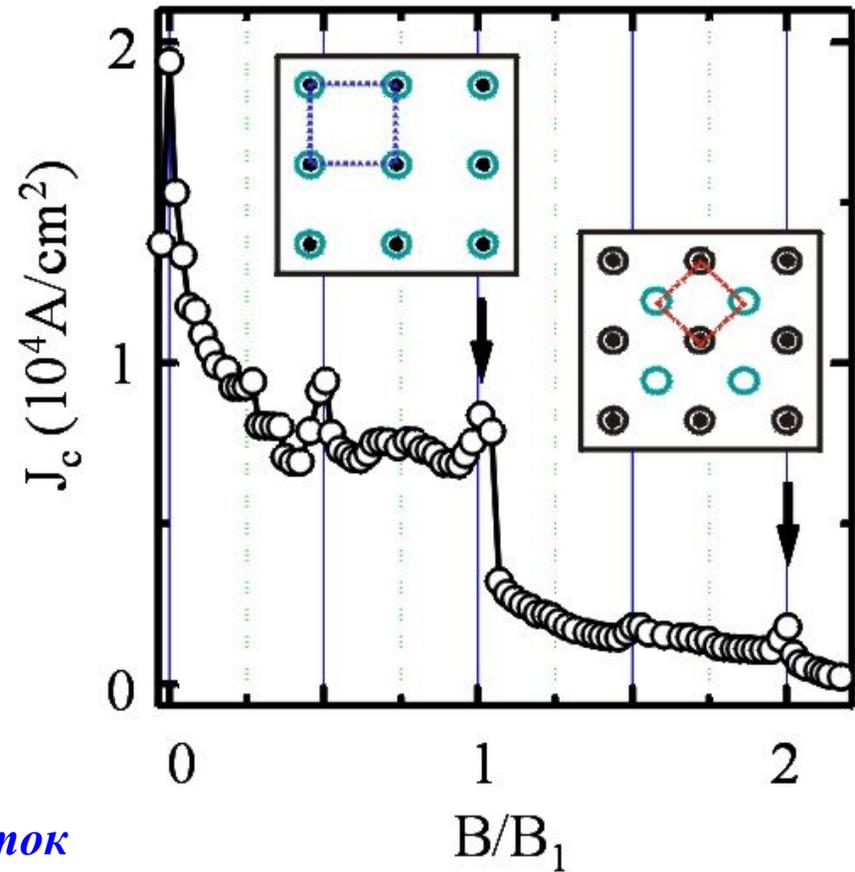
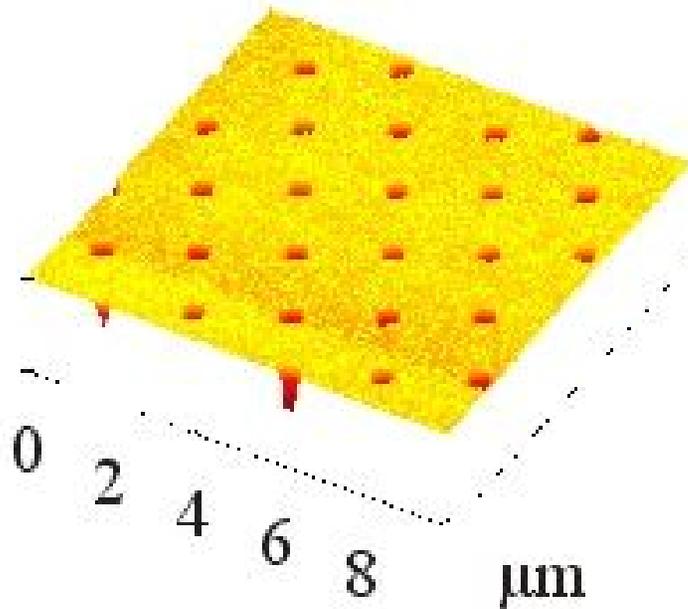


➤ Сверхпроводящее состояние разрушается.

Движение вихрей и критический ток

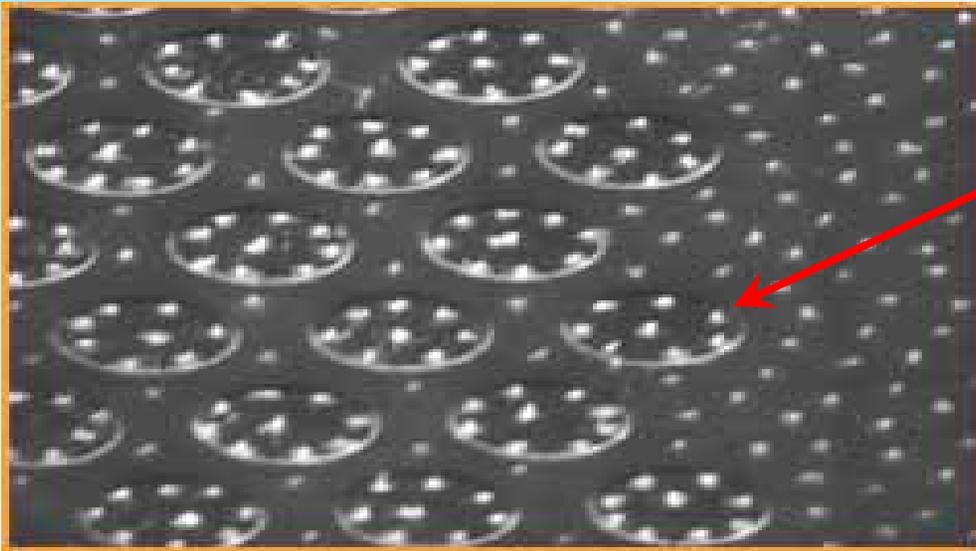
Наиболее эффективный пиннинг (закрепление) вихрей осуществляют микро-области с разрушенной или ослабленной сверхпроводимостью: в таких областях не тратится энергия на разрушение сверхпроводящего состояния в ко́рах вихрей.

Модельная система – пленка с “дырочками” (антиточками):



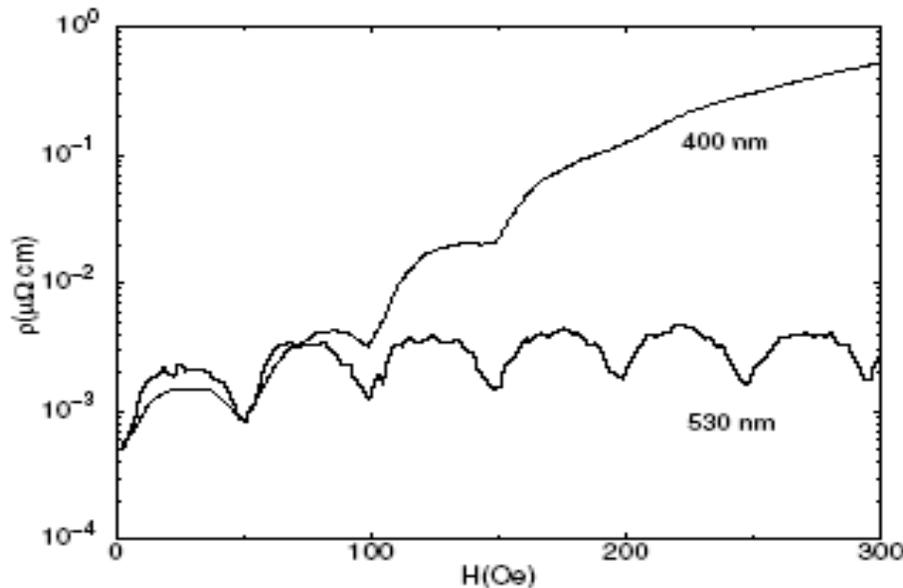
Как и следовало ожидать, критический ток имеет максимумы при концентрации вихрей кратной концентрации антиточек (1/2; 1; 2).

Движение вихрей и критический ток

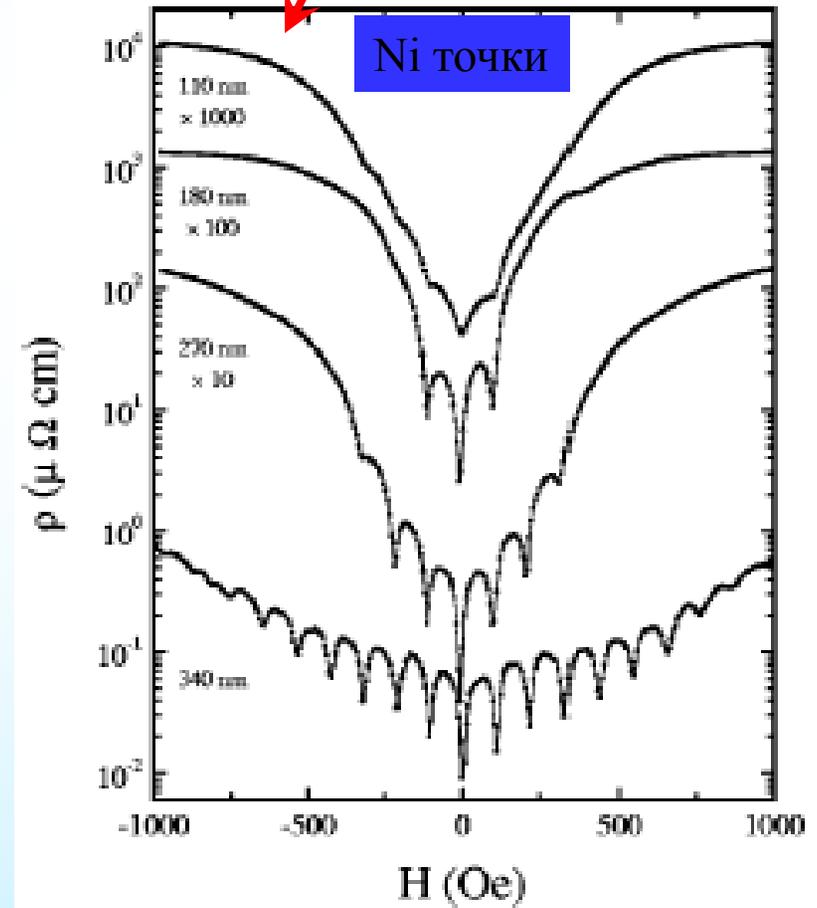


A. Bezryadin et al., *Phys. Rev. B* 53, 8553 (1996)

Модельные системы:
❖ большие дефекты, вмещающие несколько вихрей;
❖ магнитные точки.



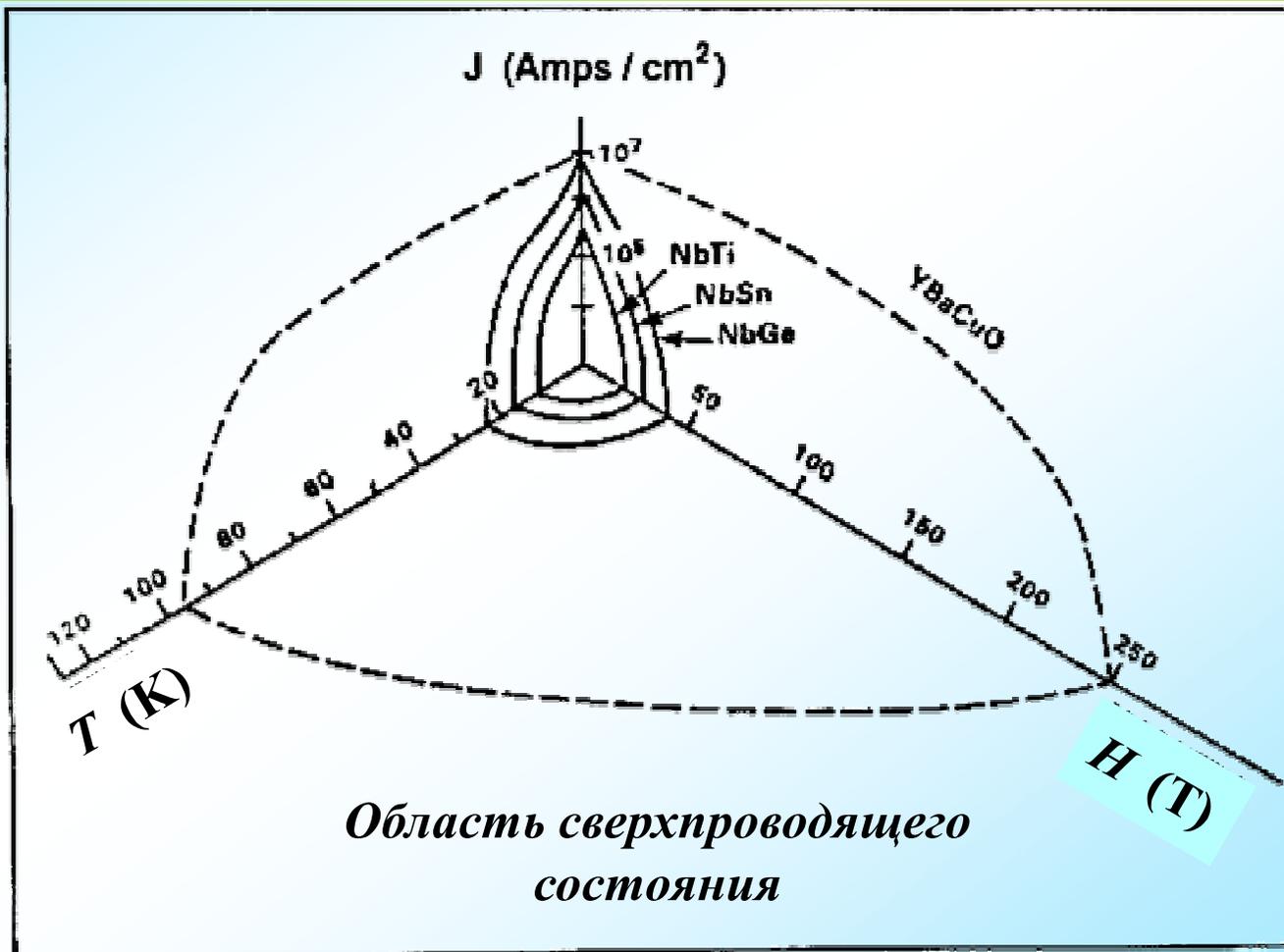
C. Reichhardt et al., *Phys. Rev. B* 64, 052503 (2001)



A. Hoffmann et al., *Phys. Rev. B* 61, 6958 (2000)

Движение вихрей и критический ток

В реальных материалах повышение криттока за счет структурных дефектов, примесей, фаз включения, ионного облучения и т.п. Но в любом случае приходится балансировать на 3D диаграмме, выбирая оптимальное соотношение рабочих температур, токов и магнитных полей.

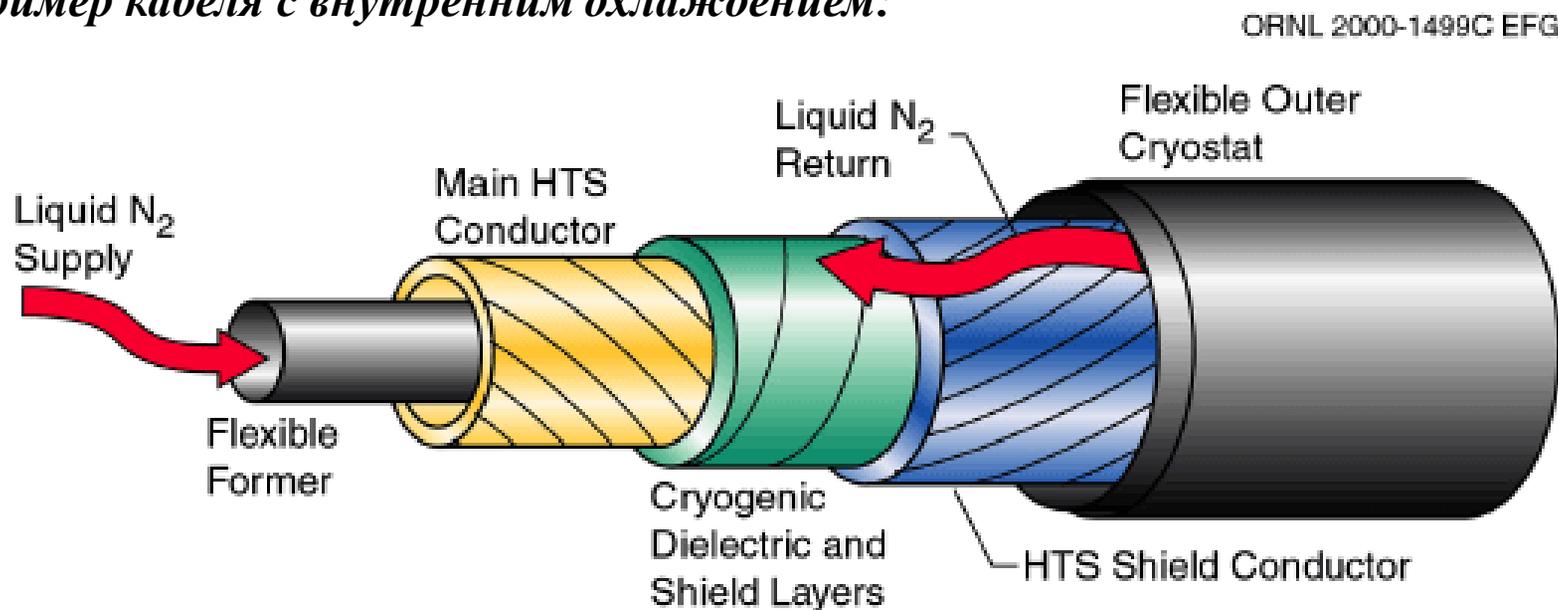


Применение сверхпроводимости

✓ Нулевое сопротивление в сверхпроводящем состоянии – передача энергии без потерь, сверхмощные магниты, накопители энергии, электромагнитные экраны, резонаторы и т.д.

Наиболее очевидное применение – линии электропередач (отсутствие потерь + плотности тока на порядки выше, чем в меди или алюминии).

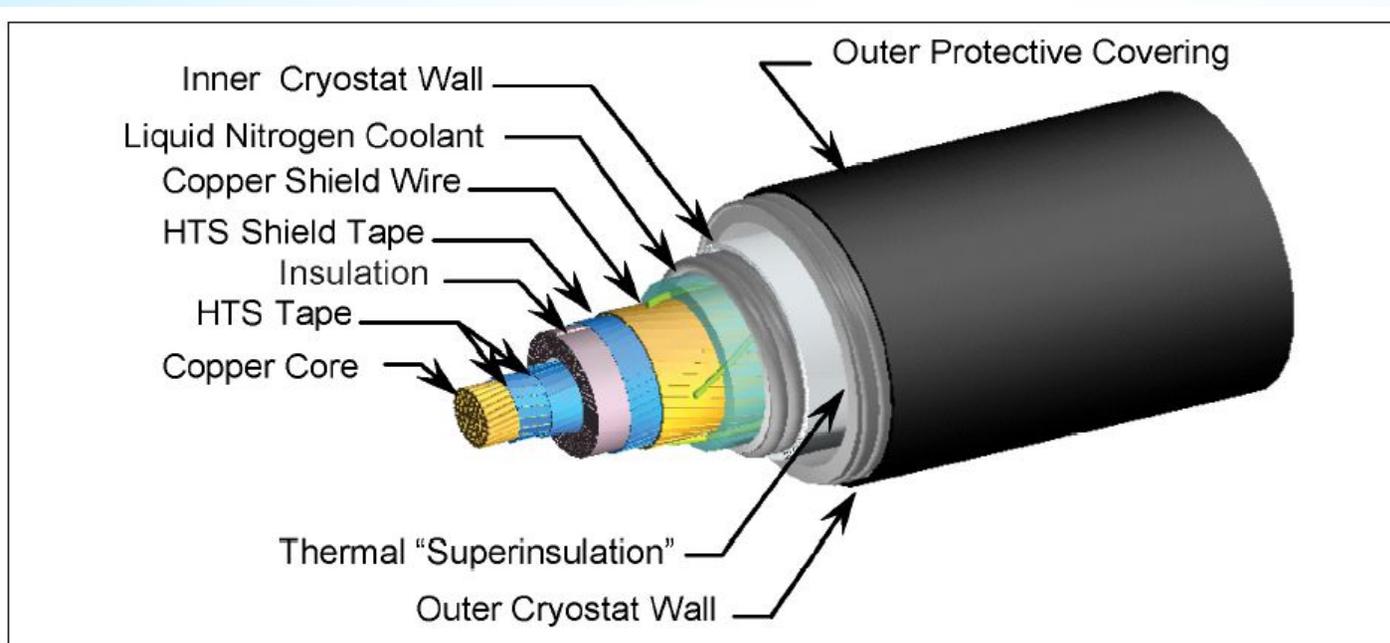
Пример кабеля с внутренним охлаждением:



Применение сверхпроводимости

Установлен кабель электроснабжения на Лонг-Айленде (2007):

- ❑ Номинальная доставляемая мощность – 600 МВт;
- ❑ Напряжение/максимальный ток – 138 кВ/69.000 А;
- ❑ Длина – три однофазных кабеля по 610 м.



Применение сверхпроводимости

*Более эффективный 3-
фазный кабель.*

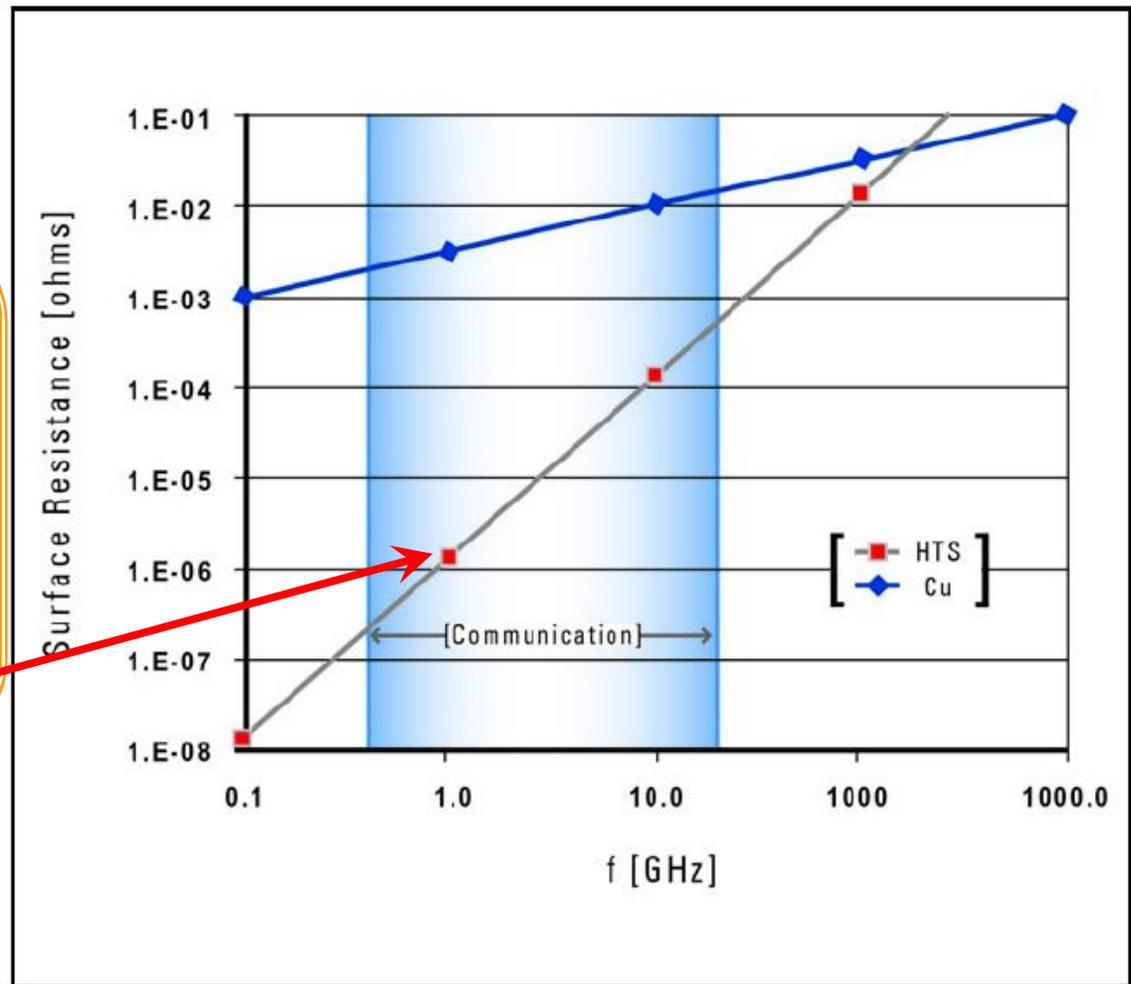


**Installation at Albany Cable site
(2007-2008)**

Применение сверхпроводимости

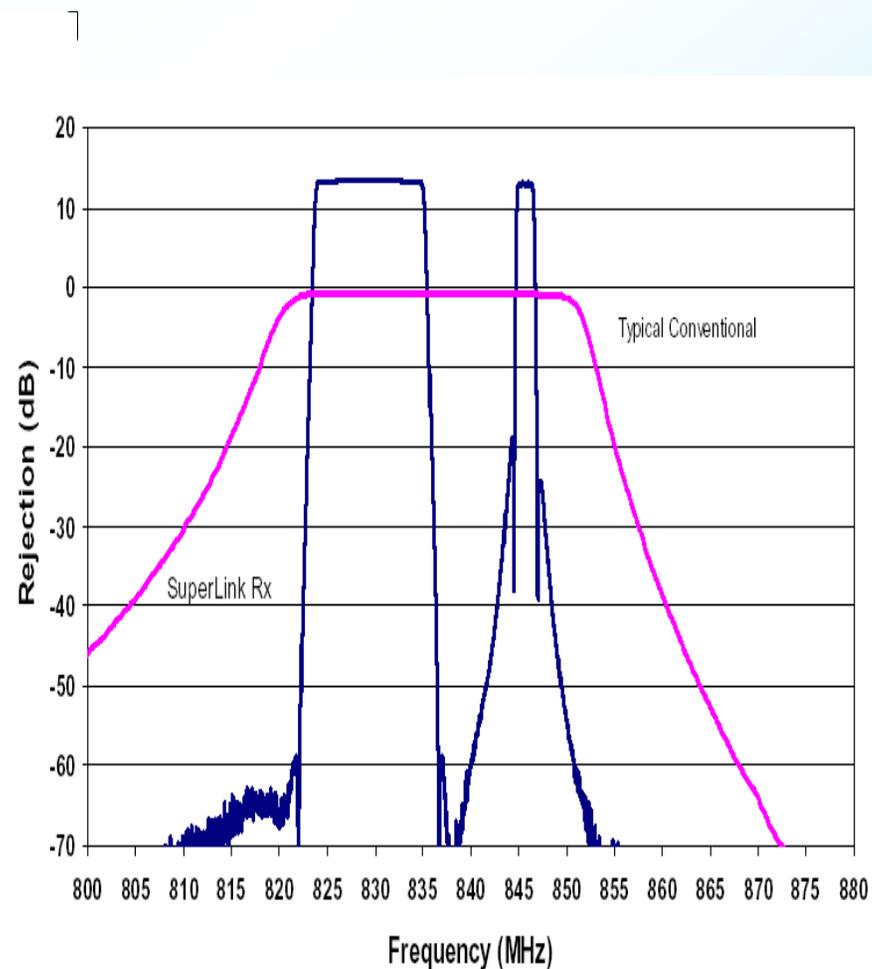
Отсутствие потерь (нулевое сопротивление) требуется не только в устройствах с большими токами, но и в слабых приложениях. Простейший пример – резонаторы, антенны и фильтры с гигантской добротностью.

Сравнение сопротивления меди и “азотного” сверхпроводника: хотя на переменном токе сопротивление сверхпроводника не нулевое, оно тем не менее значительно меньше, чем у меди до частот в несколько десятков ГГц.



Применение сверхпроводимости

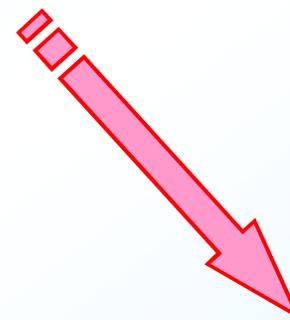
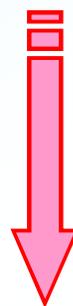
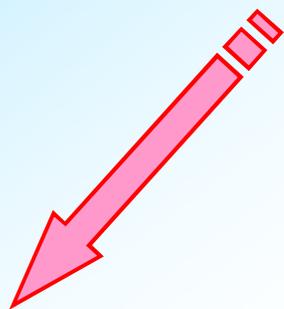
Сверхпроводящие фильтры с высокой добротностью позволяют, например, повысить качество и увеличить дальность приема сотовой связи в разы.



Применение сверхпроводимости

Следующее очевидное применение – мощные магниты (опять, отсутствие потерь + плотности тока недостижимые в меди + высочайшая стабильность поля). Во многих случаях, использование сверхпроводящих магнитов безальтернативно.

Потребители:



Наиболее амбициозные применения – термоядерная энергетика; ускорители; транспорт на магнитной подвеске; корабельные двигатели и т.п.

Наиболее платежеспособные применения – медицинские томографы, оснащенные сверхпроводящими магнитами

Прочее – магниты для научных исследований; накопители энергии; компактные моторы и генераторы, и т.д.

Сверхпроводящие магниты

Линия ускорителя со сверхпроводящими магнитами в Брукхэйвене



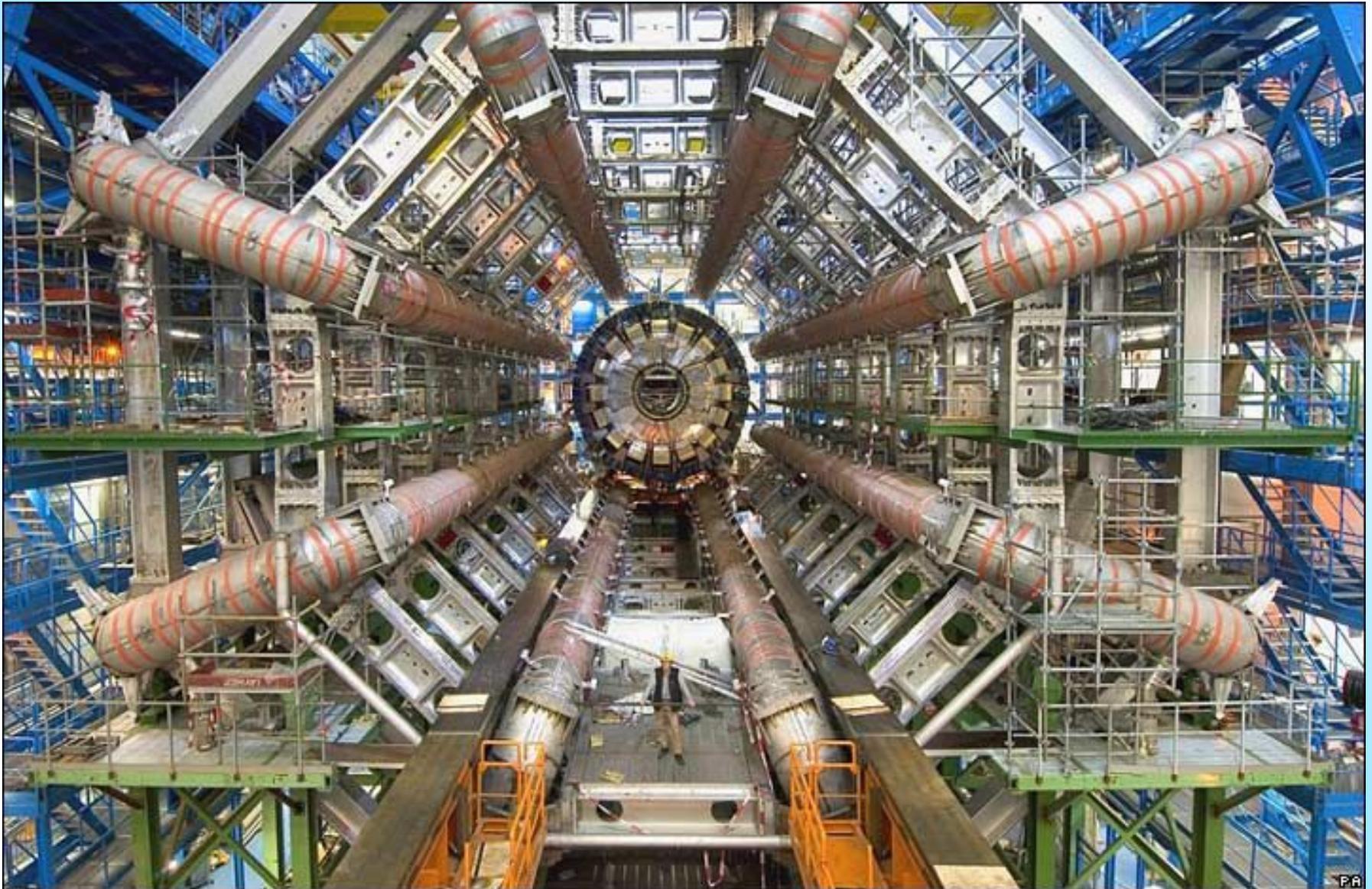
Сверхпроводящие магниты

*Теватрон (1000 ГэВ) – 6.3 км и 1000
сверхпроводящих магнитов.*



Сверхпроводящие магниты

*Гигантский тороидальный магнит для детектора частиц
в проекте LHC (Large Hadron Collider).*

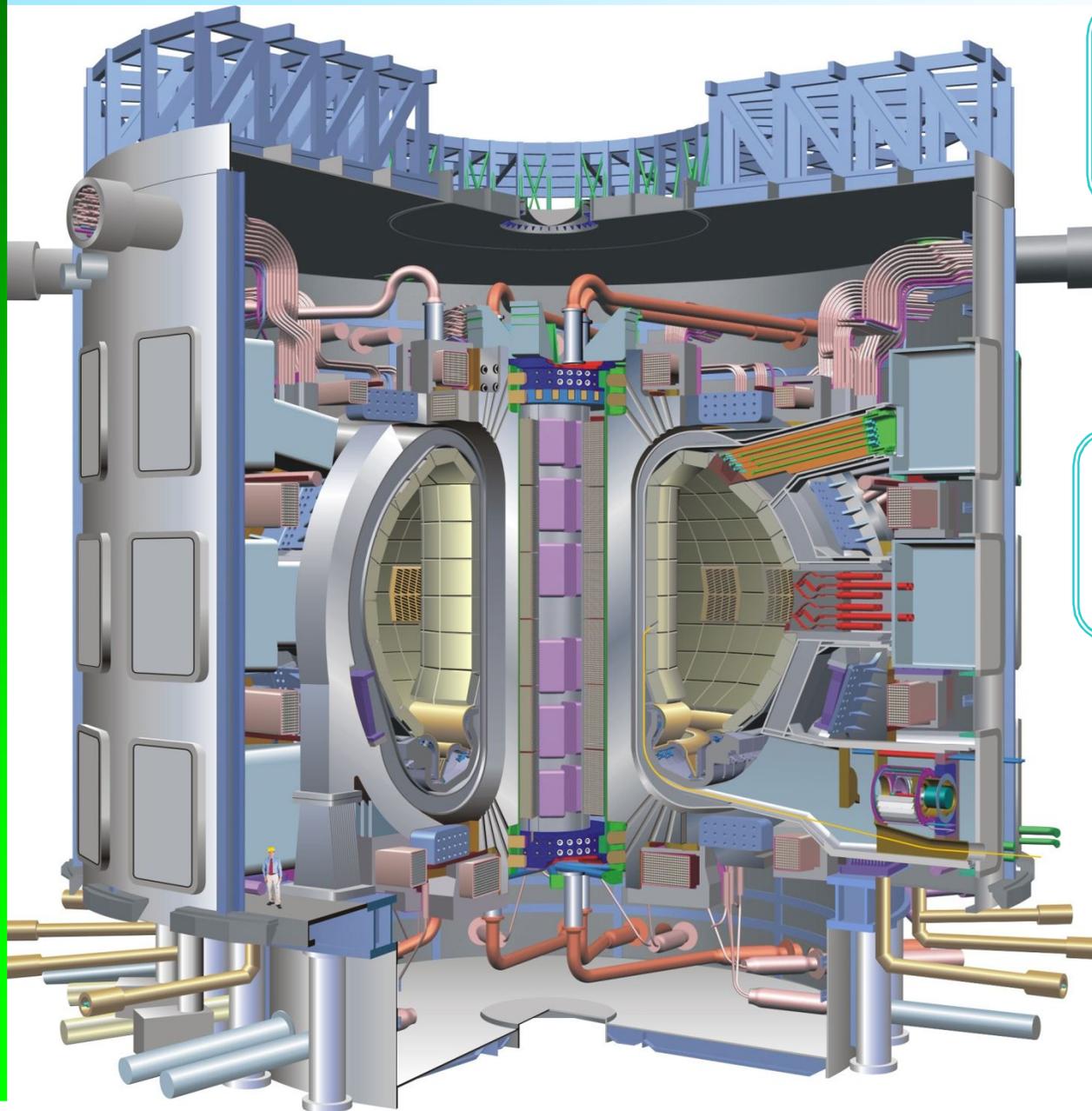


Сверхпроводящие магниты

Гигантский соленоид для проекта LHC (Large Hadron Collider).



Сверхпроводящие магниты

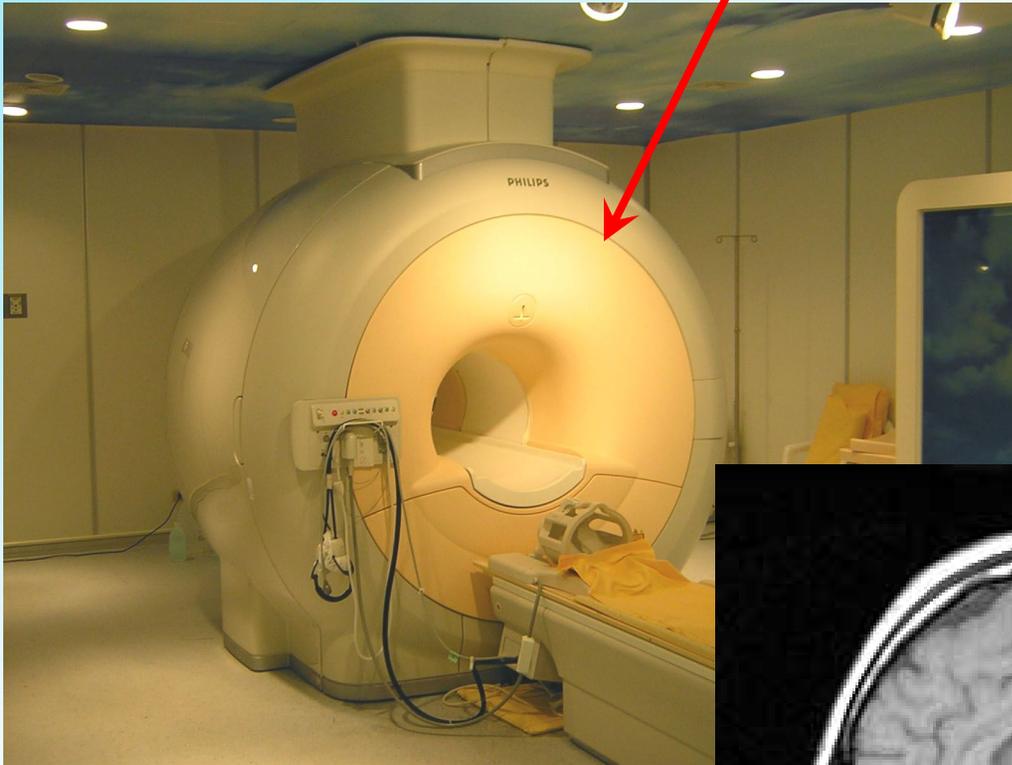


*Сверхпроводящие
магниты в реакторе
ITER.*

*Сверхпроводящие
двигатели и генераторы
для морских судов.*

Сверхпроводящие магниты

Сверхпроводящий магнит медицинского томографа.



Крайне важна стабильность магнитного поля для получения массива спектров магнитного резонанса.



Сверхпроводящие магниты

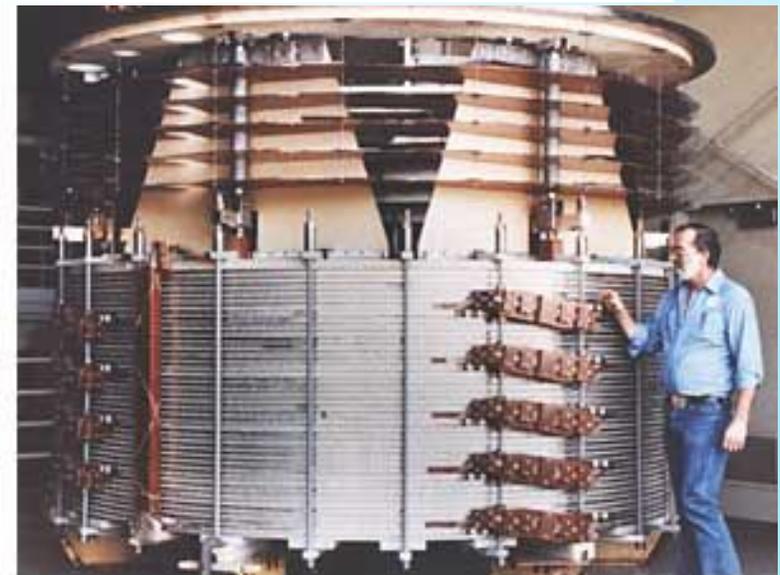
*Большие поля – большая энергия ($H^2/8\pi$).
Энергию в сверхпроводящий магнит легко
помещать и удобно извлекать.*



*Лабораторный экземпляр СП
магнитного накопителя энергии
(2 МДж) – бесперебойное
питание нагрузки 800 кВт.*

3-6 МВт

Масштабируемо



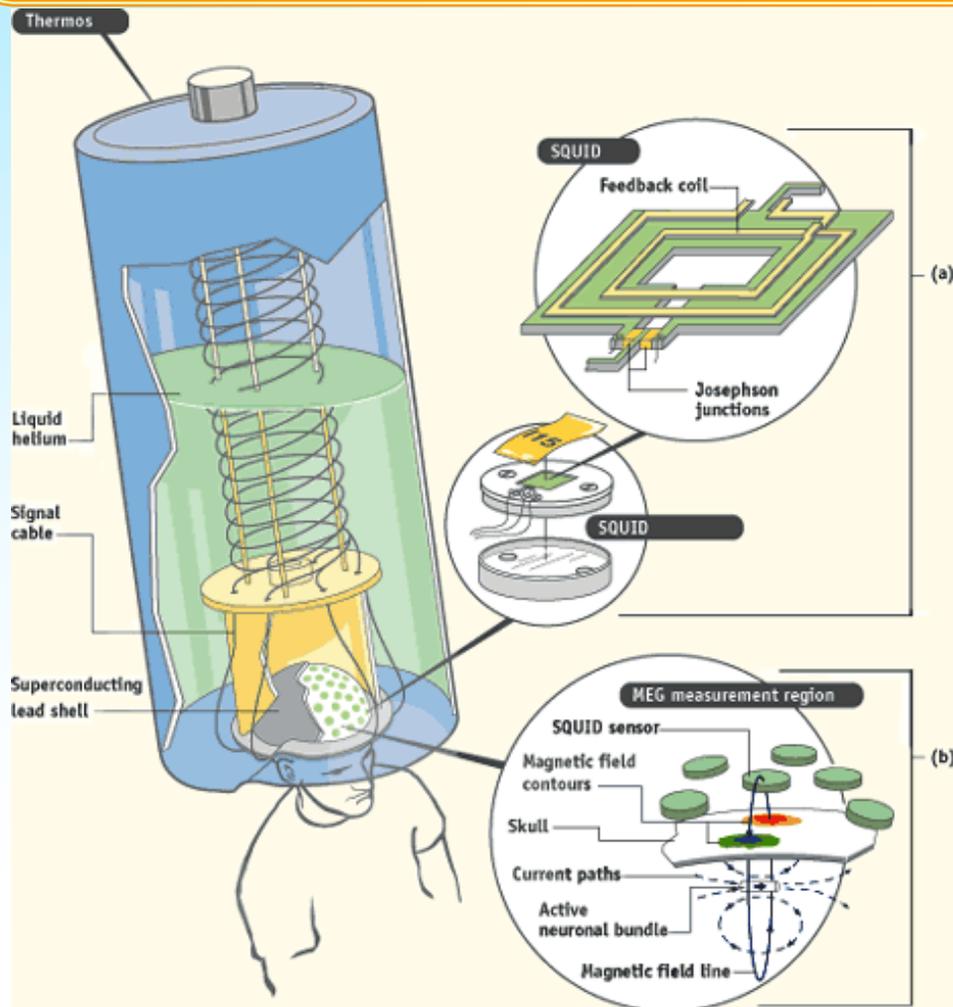
Применение сверхпроводимости



Drew W. Hazelton, SuperPower Inc. (Barcelona-2011 meeting)

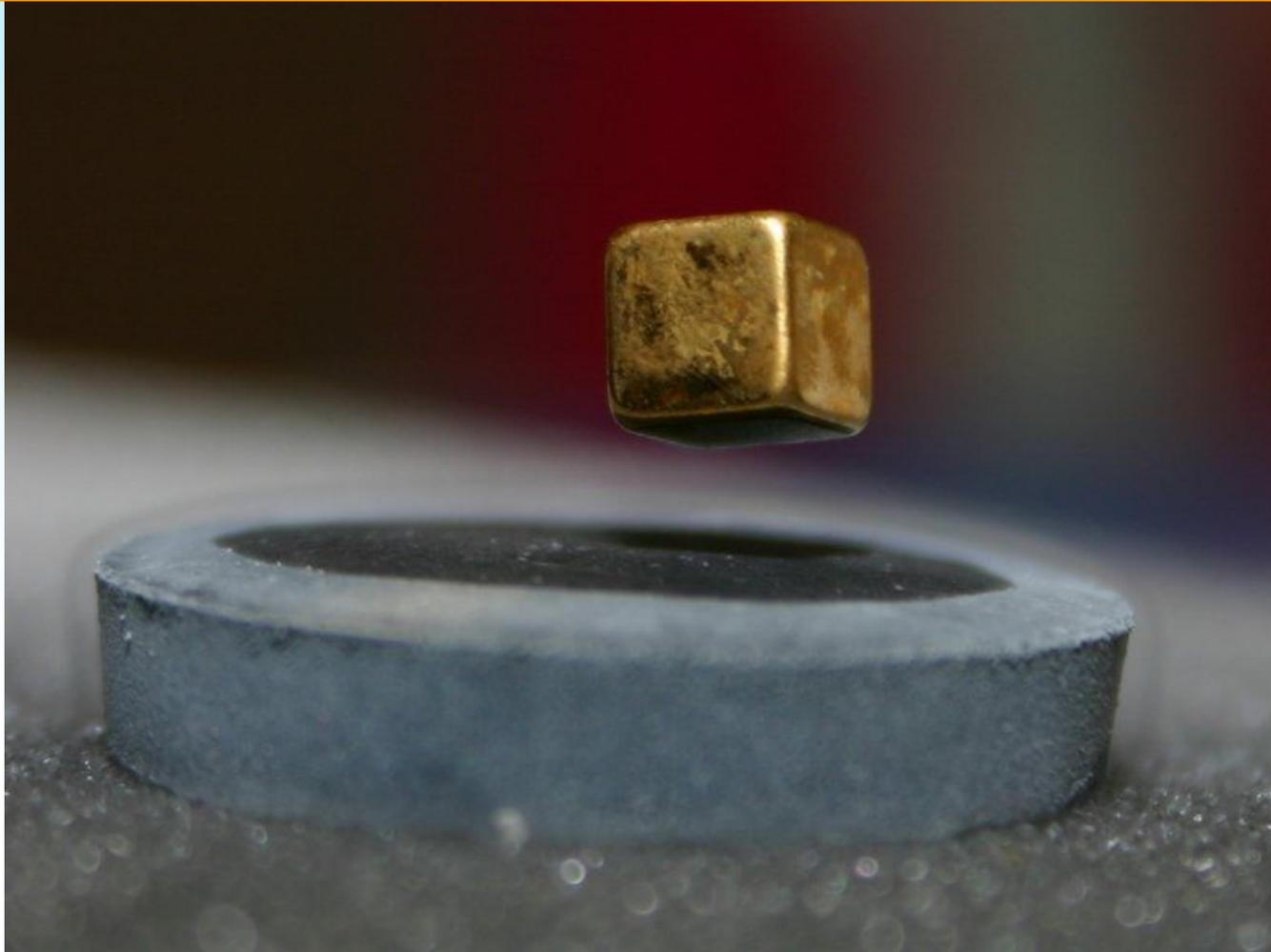
СКВИД-магнитометры

✓ Сверхчувствительные магнитометры, основанные на эффекте Джозефсона, используются в областях от научных исследований до медицины и геологоразведки, и вплоть до слежения за подводными лодками...



Магнитная подвеска

✓ Выталкивание и захват магнитного потока в сверхпроводящем состоянии – левитация, магнитная подвеска ...



Один взгляд вызывает мысли о бесчисленных технических приложениях ...

Магнитная подвеска

*Почему не использовать для подвески обычные постоянные магниты?
Ответ прост: есть строгая теорема, что никакая статическая система из постоянных магнитов и зарядов не может обеспечить левитацию.*

Под это ограничение не подпадают диамагнетики (диамагнетизм – сугубо квантовое явление) и, соответственно, сверхпроводники как в мейснеровском состоянии, так и в состоянии с захваченным потоком.



Магнитная подвеска

*Управляемая магнитная
подвеска в электропоездах:*

Германия

Япония

Китай (Шанхай)



Магнитная подвеска

Положение поезда (зазор подвески) непрерывно измеряется и управляется мощностью электромагнитов:



Слишком дорого,
слишком сложно и
слишком ненадежно
для массового
использования.

Магнитная подвеска

*Магнитная подвеска поезда с использованием
сверхпроводящих магнитов:*

*Пока слишком
дорого....*



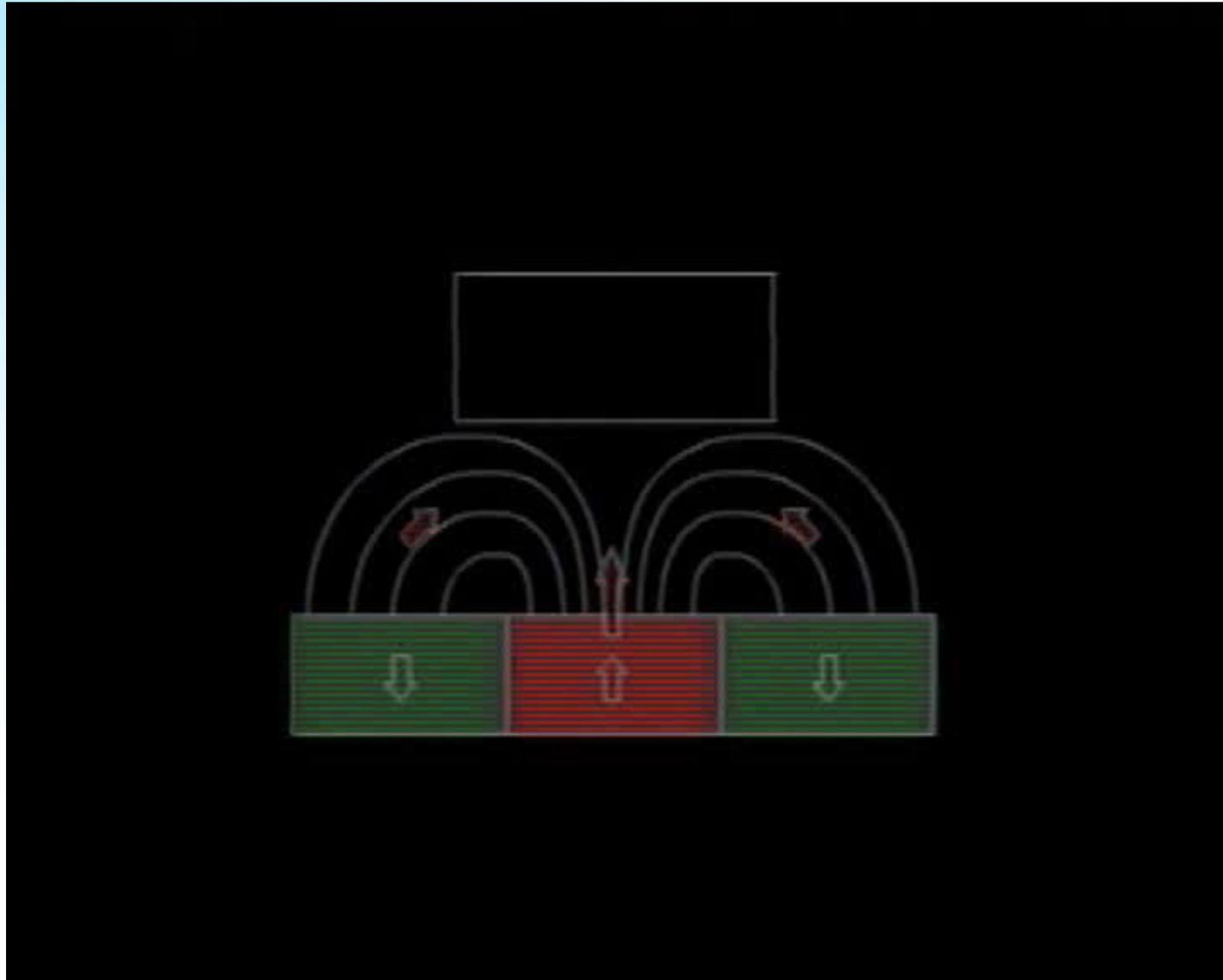
Магнитная подвеска

Особое преимущество сверхпроводника – самоуправляемость подвески!



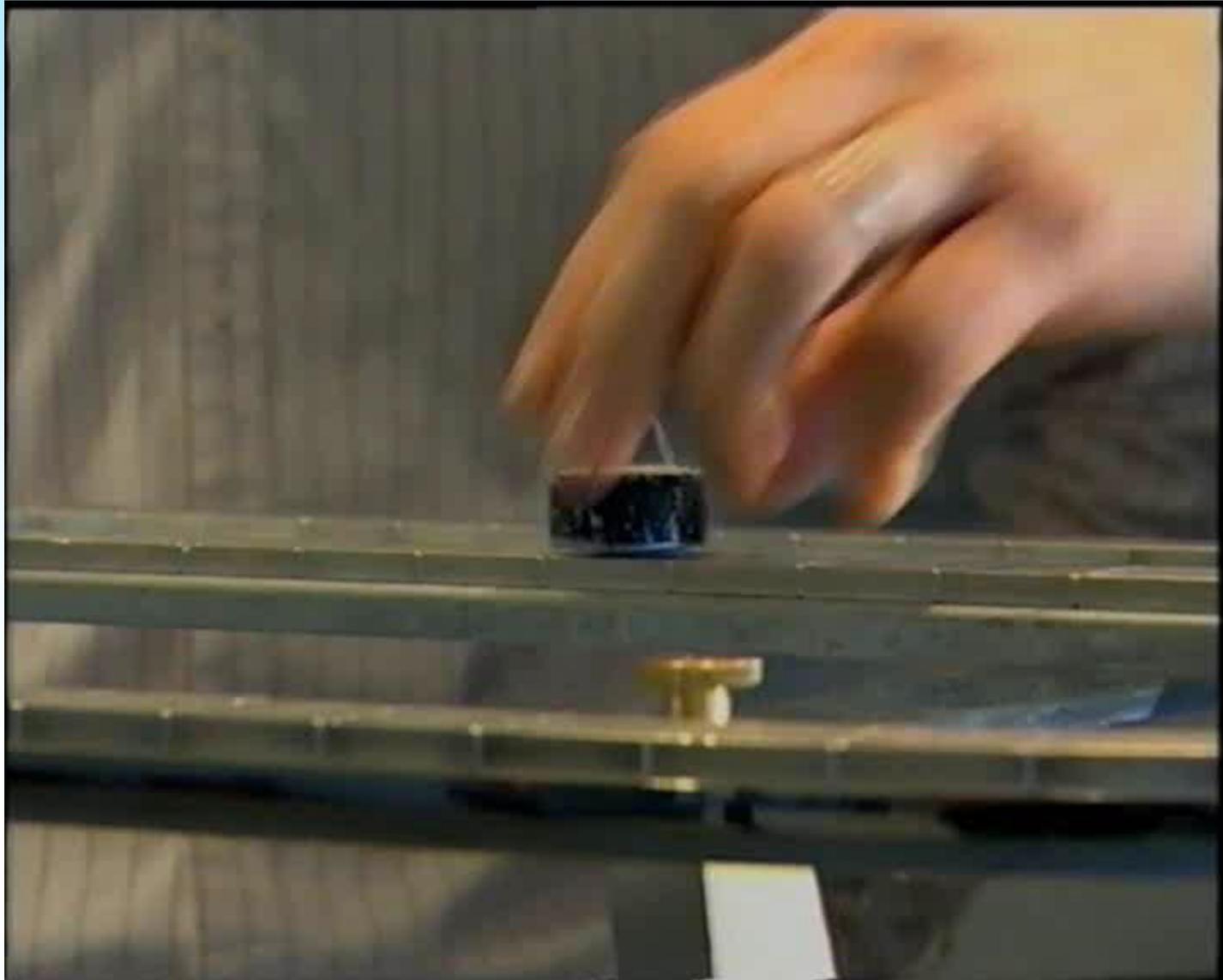
Магнитная подвеска

Особое преимущество сверхпроводника – самоуправляемость подвески!



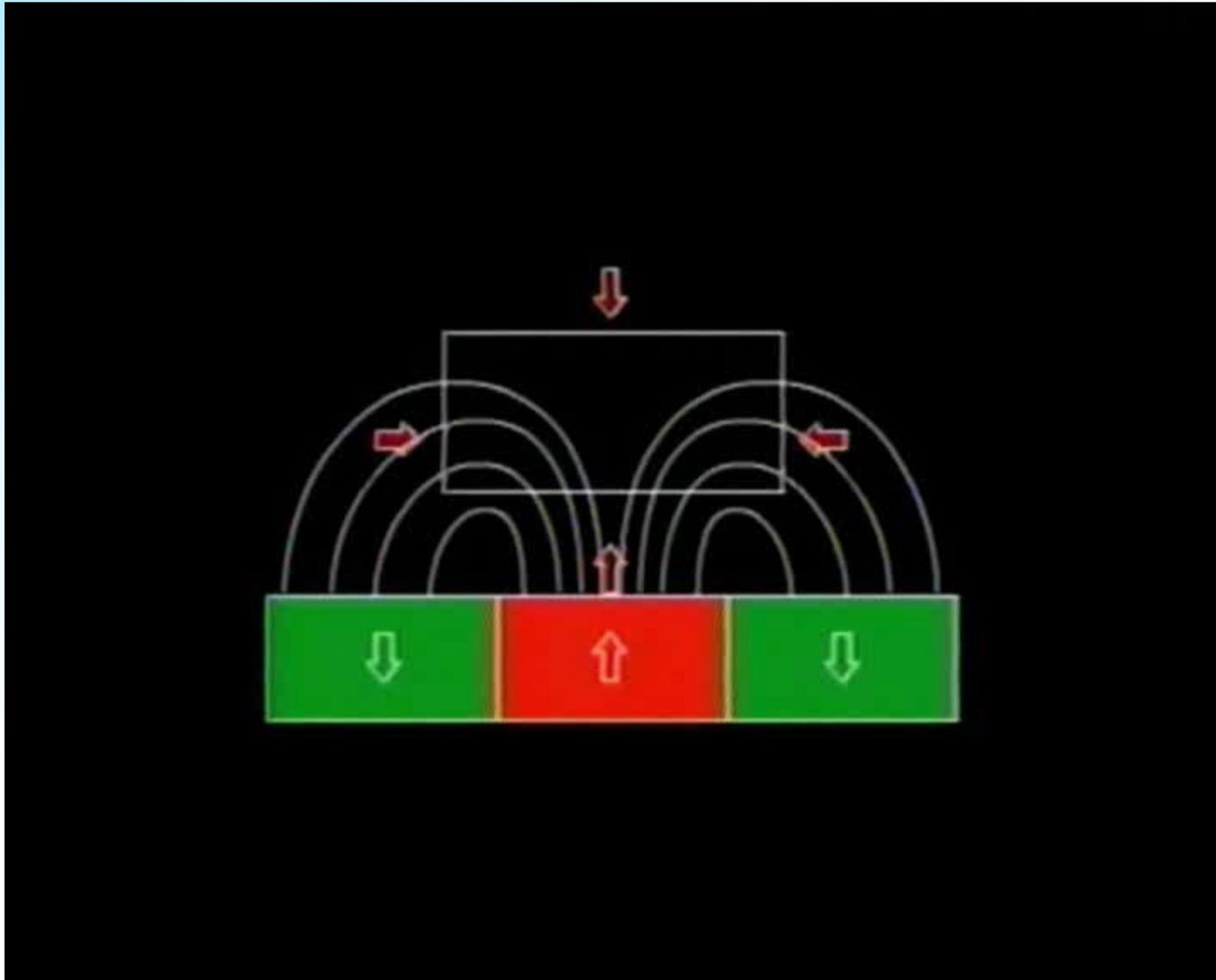
Магнитная подвеска

Особое преимущество сверхпроводника – самоуправляемость подвески!



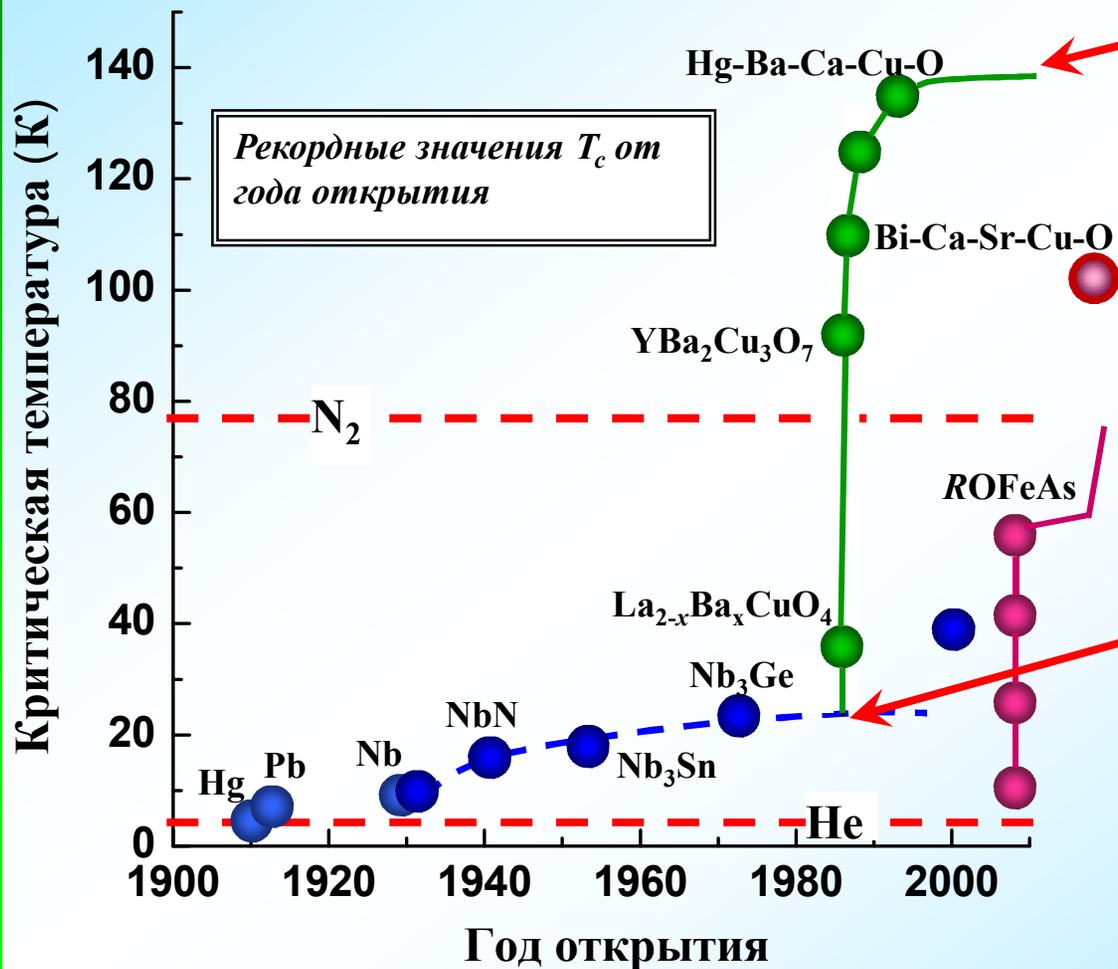
Магнитная подвеска

Сверхпроводник, захватывая поток, фиксирует расстояние до магнита!



Сверхпроводящие материалы

★ Для использования сверхпроводимости нужны материалы с максимальными критическими параметрами T_c , H_{c1} , H_{c2} , J_c , и достаточно феноменологической теории Гинзбурга-Ландау.



И опять стагнация, если не в плане использования сверхпроводимости, то в плане поиска новых сверхпроводников (не считая открытия MgB_2 с $T_c=40$ K)... до начала 2008 года.

После убедительных микроскопических теорий, “ограничивших” максимальную T_c уровнем 30 K (т.е. неизбежное использование дорогого жидкого гелия), фундаментальные исследования сверхпроводимости были обречены на стагнацию ...
... до конца 1986 года.

★ Текущие рекорды:
 $T_c \approx 140$ K (норм. условия)

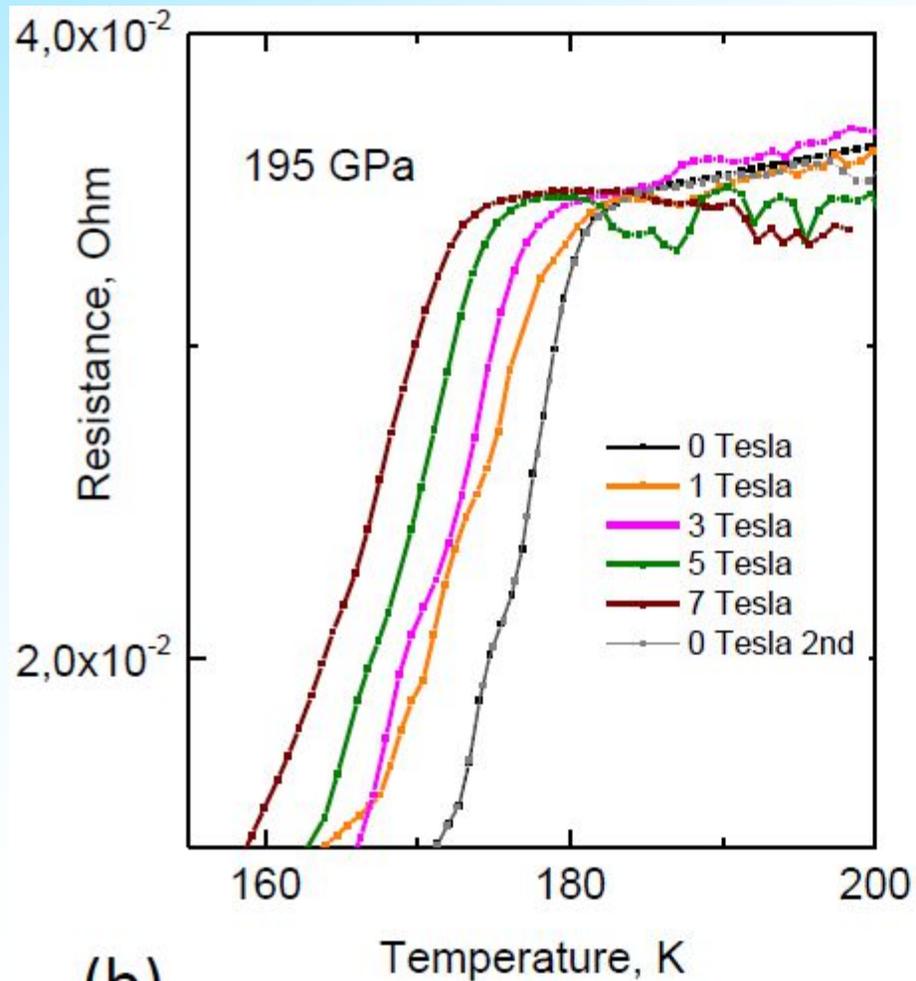
Сверхпроводящие материалы

A.P. Drozdov, M. I. Erements*, I. A. Troyan

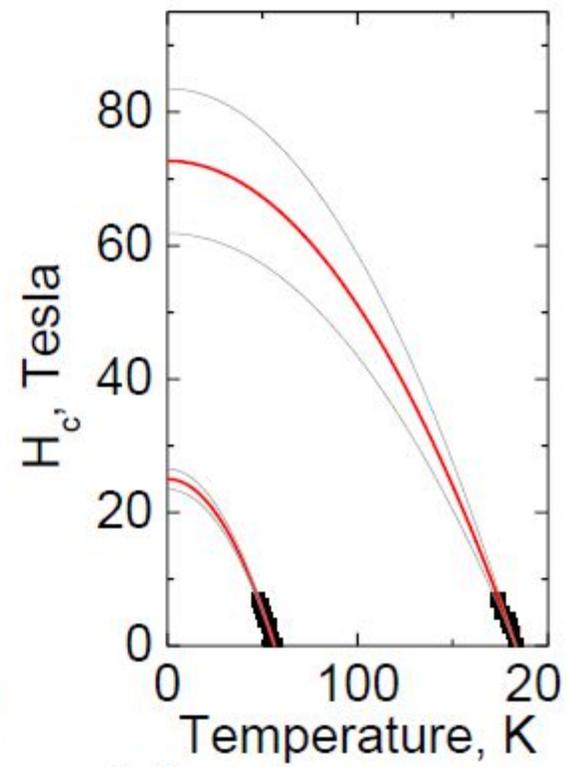
Max-Planck Institut für Chemie, Chemistry and Physics at High Pressures Group

Сверхпроводимость с T_c
до 190 К....

..... в гидридах серы

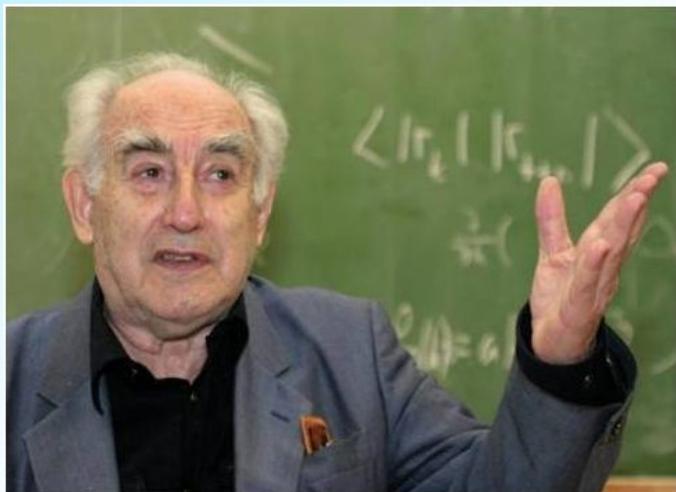


(b)



(c)

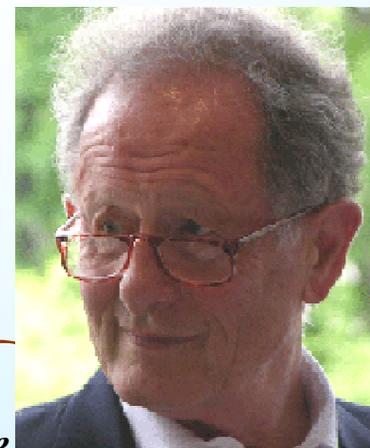
Металлический водород – исторически первый кандидат на комнатную сверхпроводимость



В. Л. Гинзбург



*N.W. Ashcroft, "Metallic Hydrogen: A High-Temperature Superconductor?"
Phys. Rev. Letts. 21, 1748
(1968).*

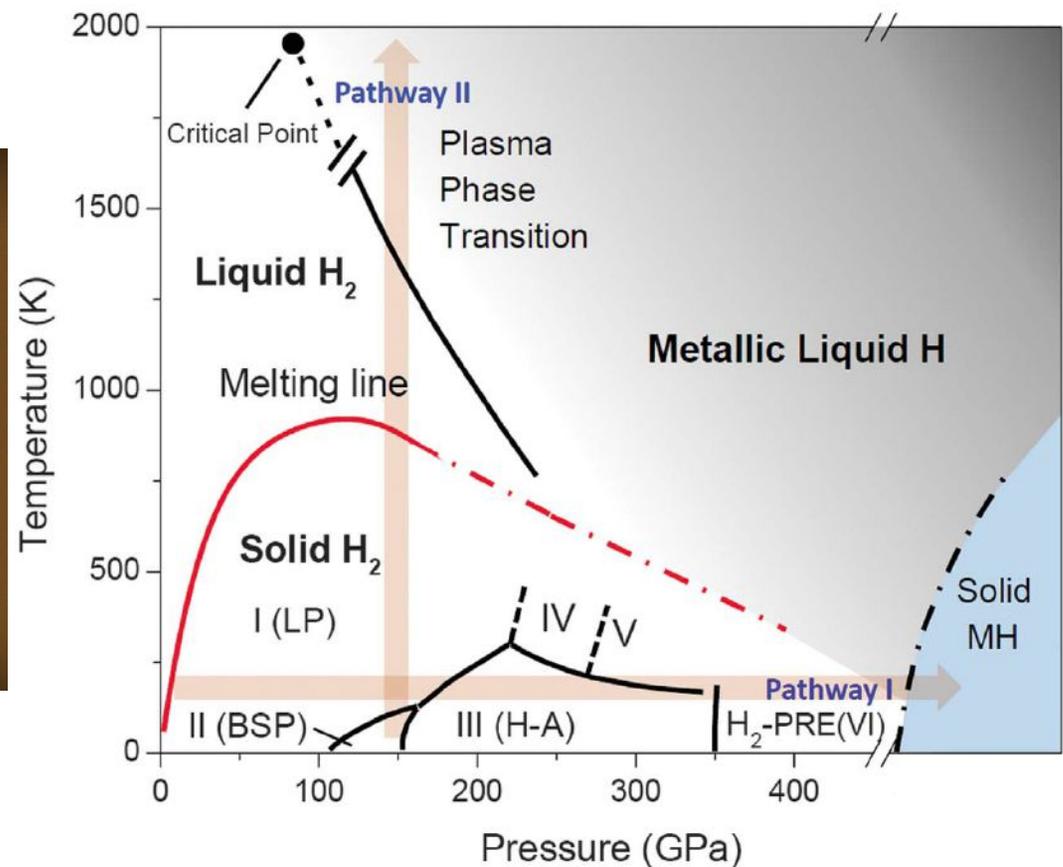
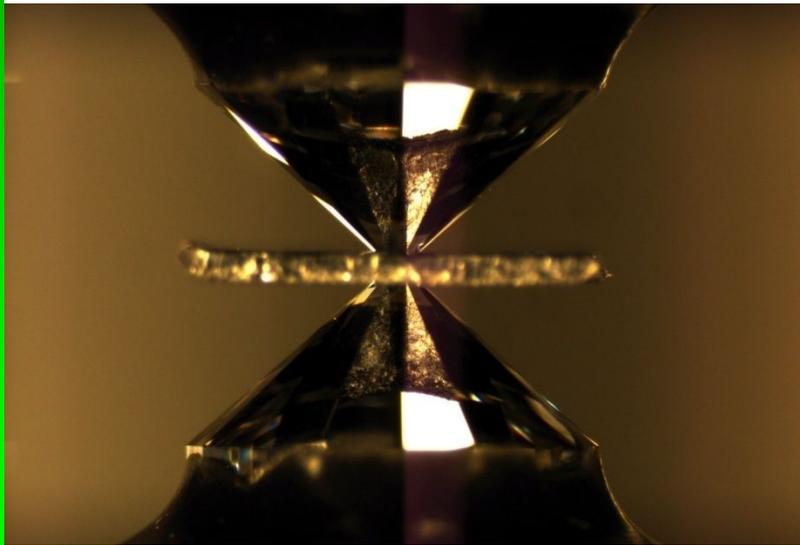


Металлический водород – исторически первый кандидат на комнатную сверхпроводимость (КТСП)

Dias *et al.*, *Science* **355**, 715–718 (2017) 17 February 2017

Observation of the Wigner-Huntington transition to metallic hydrogen

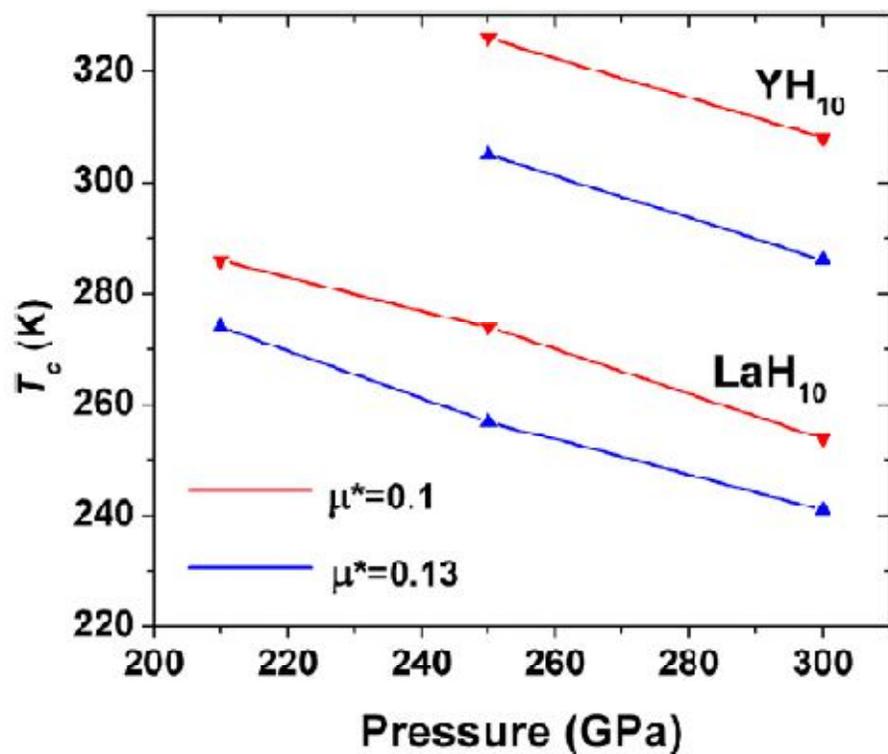
Ranga P. Dias and Isaac F. Silvera*



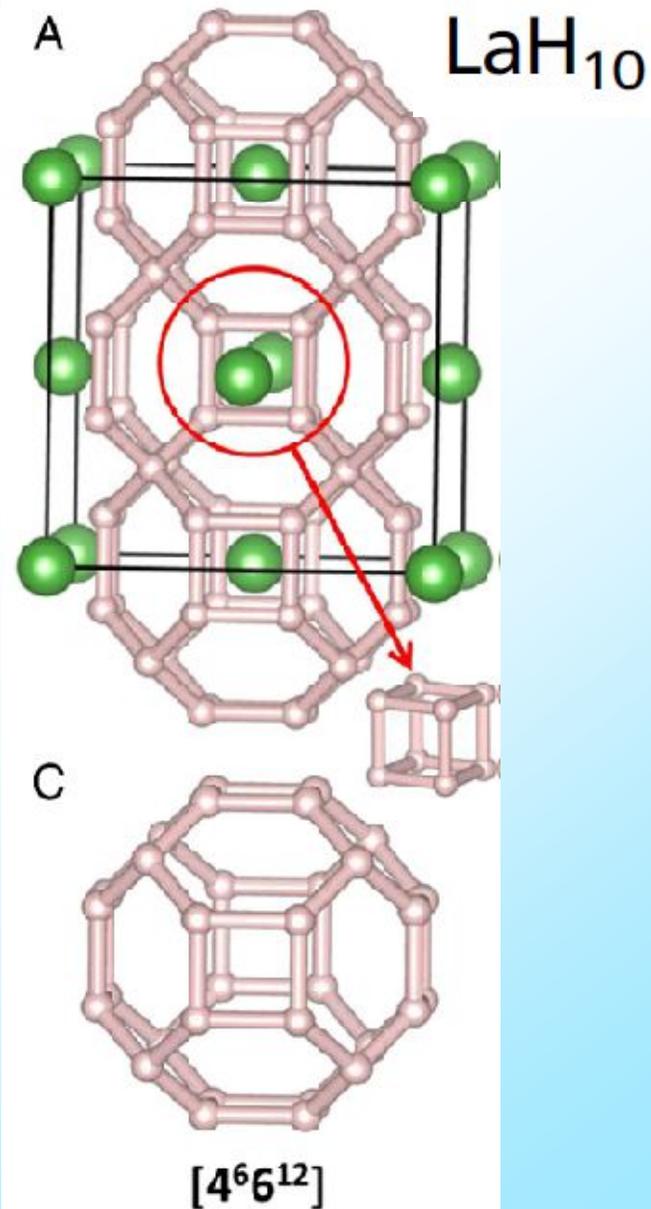
Гидриды металлов как путь к металлическому водороду и КТСП

Potential high- T_c superconducting lanthanum and yttrium hydrides at high pressure

Hanyu Liu^a, Ivan I. Naumov^a, Roald Hoffmann^b, N. W. Ashcroft^c, and Russell J. Hemley^{d,e,1}



Плотность атомов водорода в гидридах металлов может быть существенно выше, чем в жидком водороде

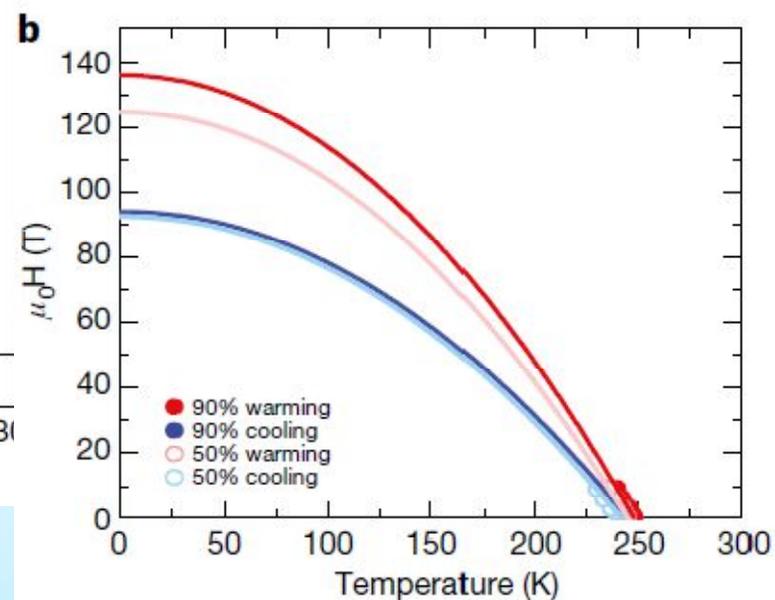
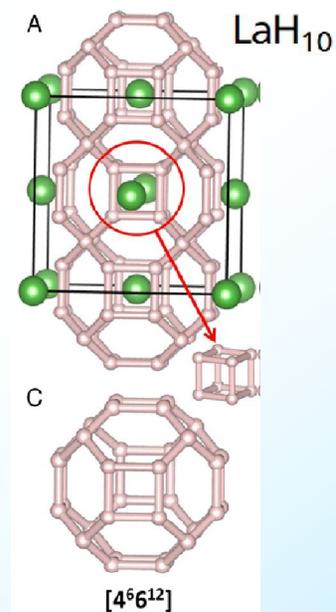
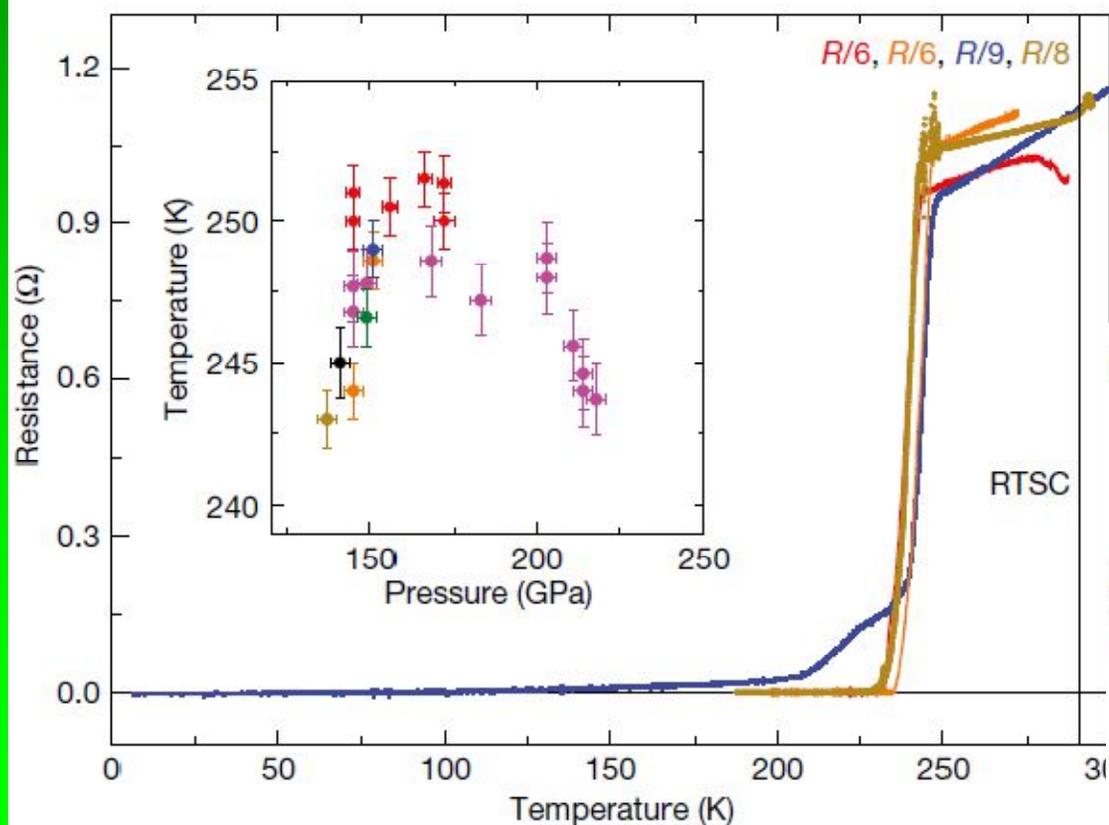


Сверхпроводимость в гидридах

528 | NATURE | VOL 569 | 23 MAY 2019

Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures

A. P. Drozdov^{1,7}, P. P. Kong^{1,7}, V. S. Minkov^{1,7}, S. P. Besedin^{1,7}, M. A. Kuzovnikov^{1,6,7}, S. Mozaffari², L. Balicas², F. F. Balakirev³, D. E. Graf², V. B. Prakapenka⁴, E. Greenberg⁴, D. A. Knyazev¹, M. Tkacz⁵ & M. I. Eremets^{1*}

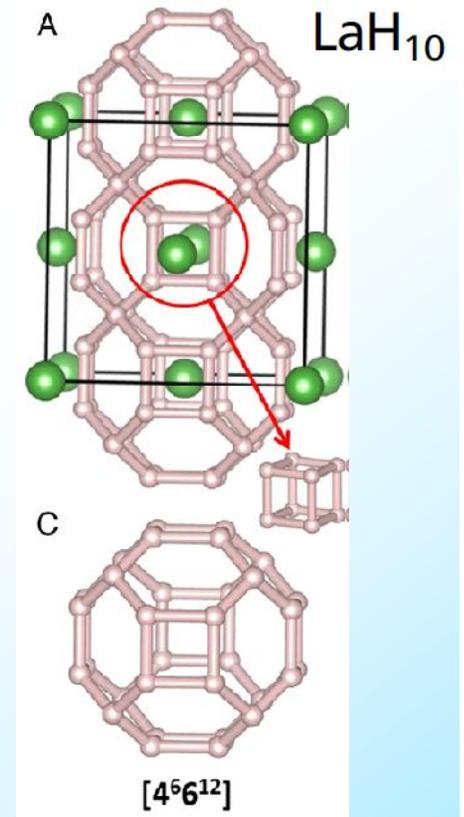
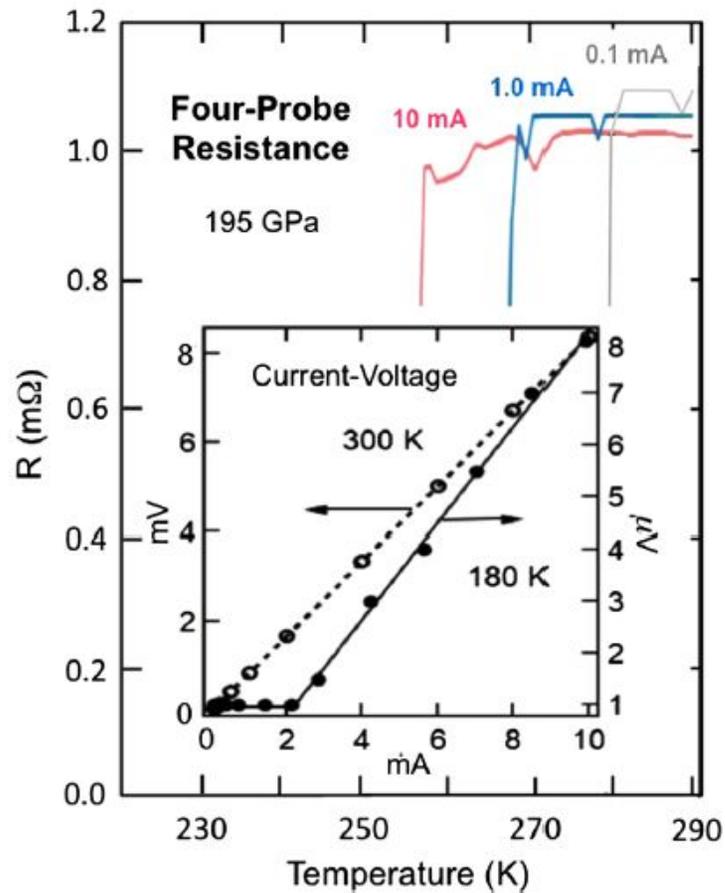
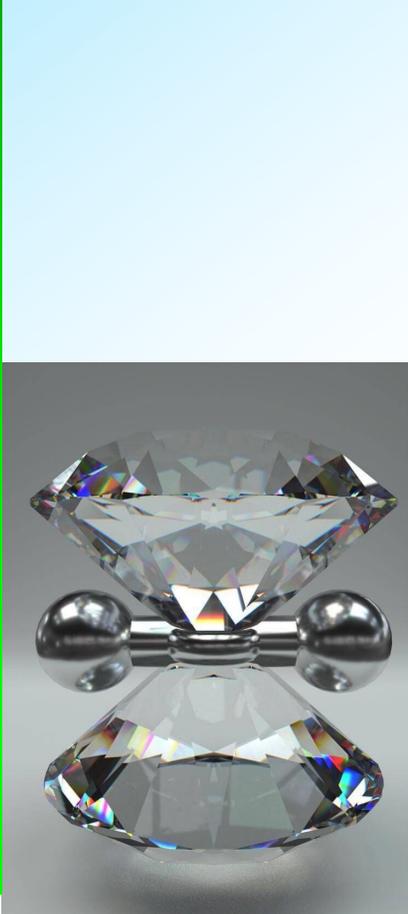


Сверхпроводимость в гидридах

PHYSICAL REVIEW LETTERS **122**, 027001 (2019)

Evidence for Superconductivity above 260 K in Lanthanum Superhydride at Megabar Pressures

Maddury Somayazulu,^{1,*} Muhtar Ahart,¹ Ajay K. Mishra,^{2,‡} Zachary M. Geballe,² Maria Baldini,^{2,§} Yue Meng,³ Viktor V. Struzhkin,² and Russell J. Hemley^{1,†}

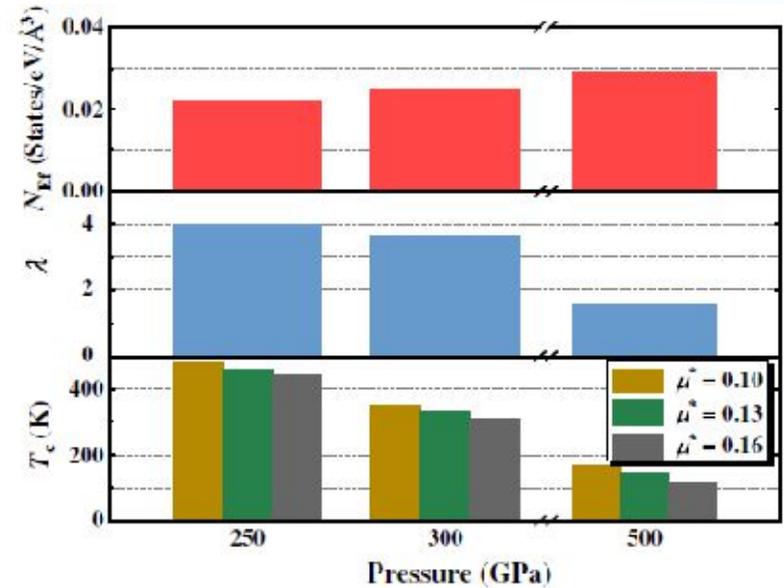
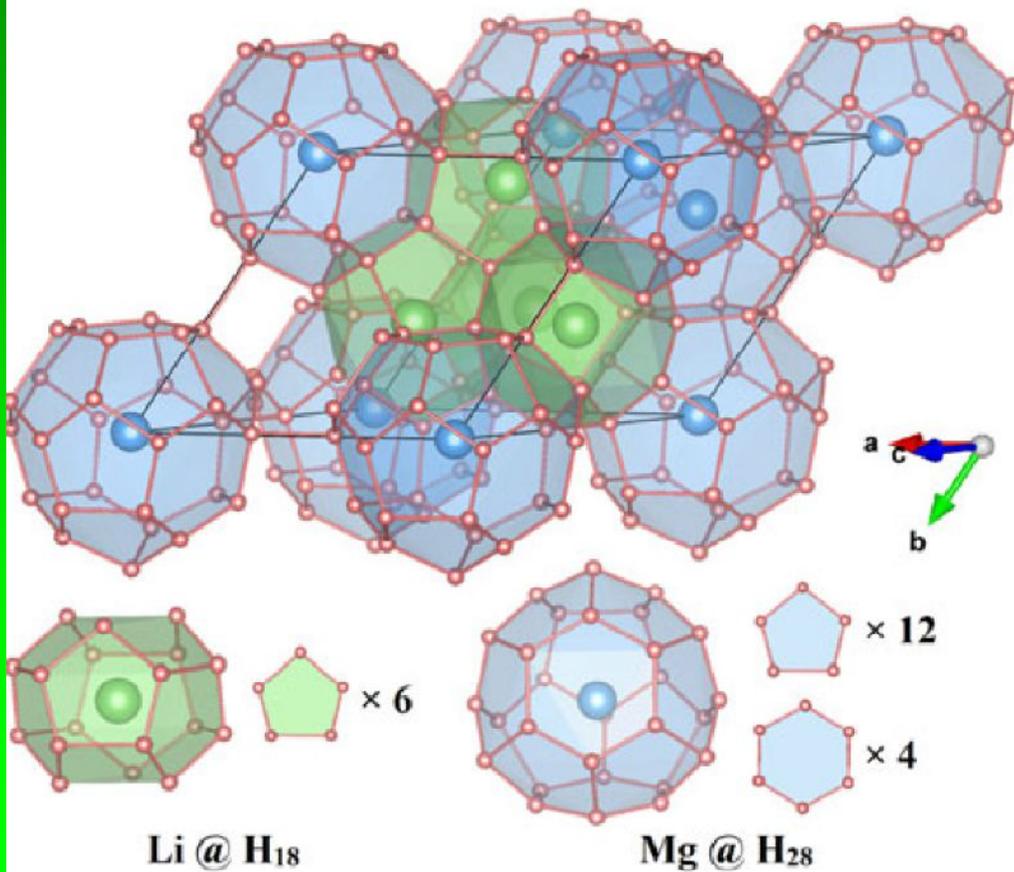


Перспективы высокотемпературной сверхпроводимости

PHYSICAL REVIEW LETTERS 123, 097001 (2019)

Route to a Superconducting Phase above Room Temperature in Electron-Doped Hydride Compounds under High Pressure

Ying Sun,¹ Jian Lv,¹ Yu Xie,¹ Hanyu Liu,^{1,*} and Yanming Ma^{1,2,†}

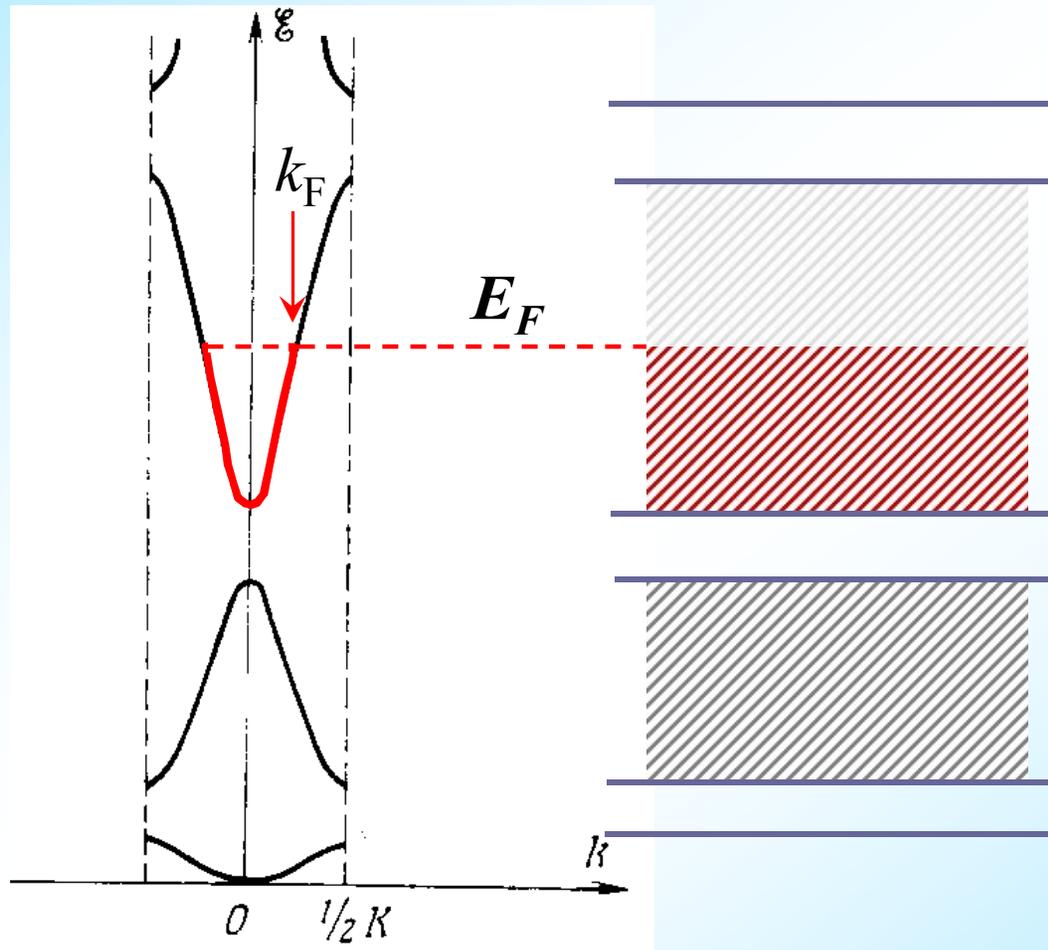


Сверхпроводящие материалы

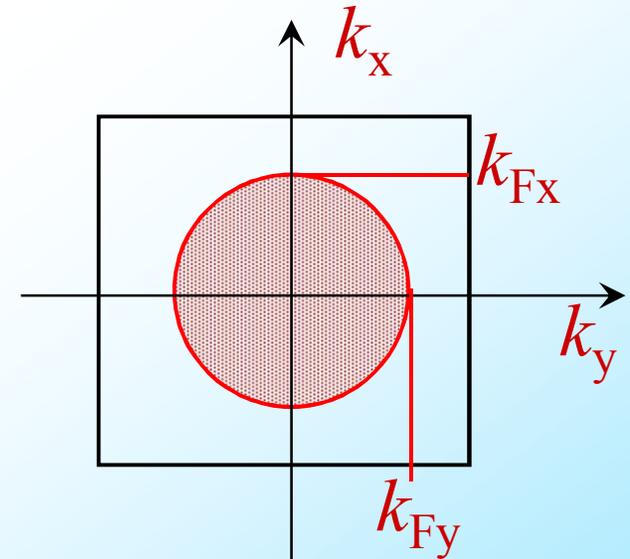
★ Микроскопические теории нужны, чтобы понять, что ограничивает критические параметры, и как обойти эти ограничения.

★ Текущие рекорды:
 $T_c \approx 140$ К (норм. условия),
 $T_c \approx$ комн. темп. (под давлением).

Заполнение энергетических зон:



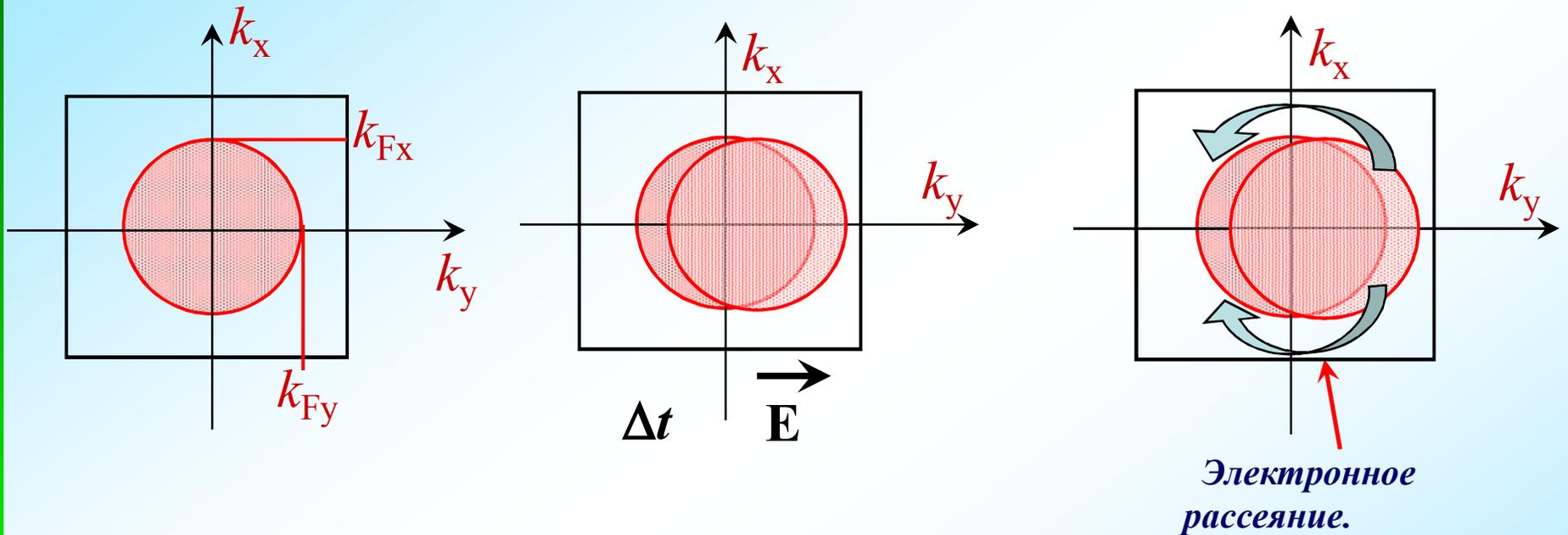
Поверхность Ферми:



В данном приближении, вещества с нечетным числом электронов на ячейку должны быть проводниками (металлами).

Куперовское спаривание

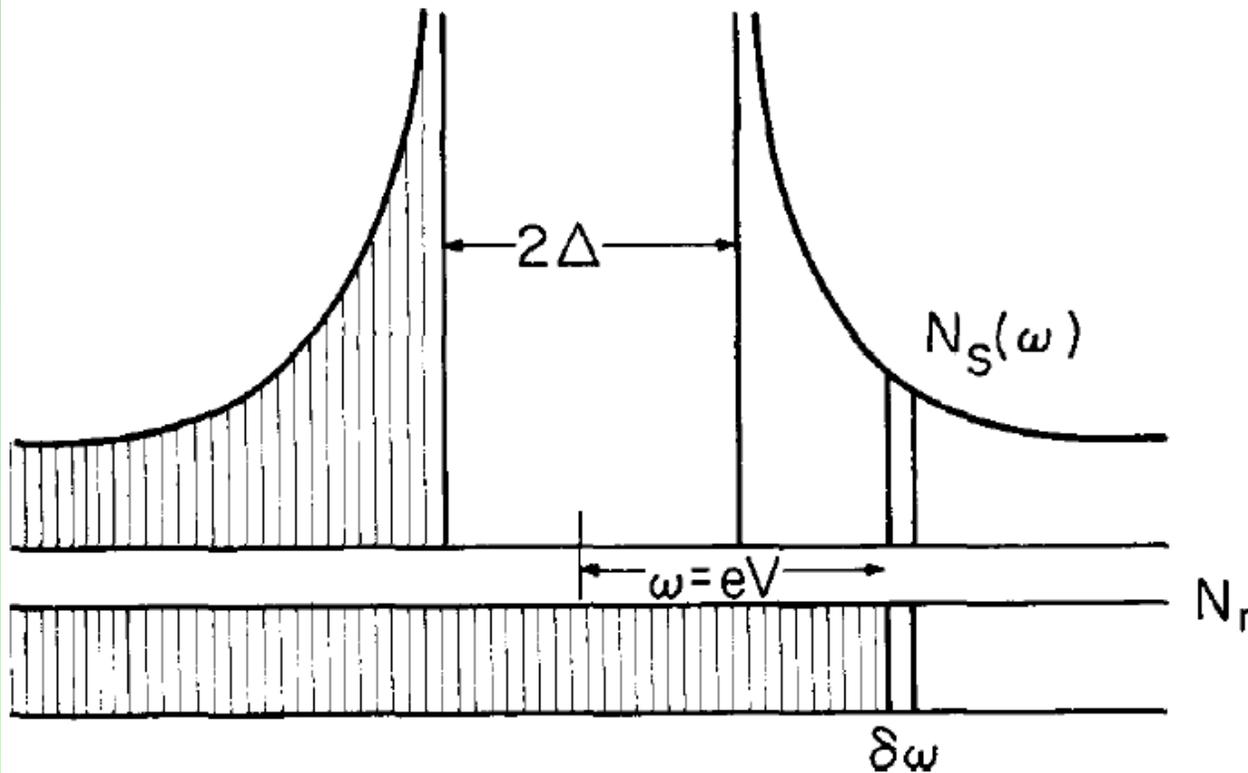
Проводимость металла:



? Сопротивление в металлах вызвано неизбежным рассеянием электронов на примесях, фононах, других электронах. В свою очередь, распределение Ферми, основанное на принципе Паули, не предполагает образования каких-либо конденсатов. Последние возможны лишь для бозонов ...

Куперовское спаривание

$$\frac{N_s(eV)}{N_n} = \frac{(dI/dV)_{ns}}{(dI/dV)_{nn}}$$

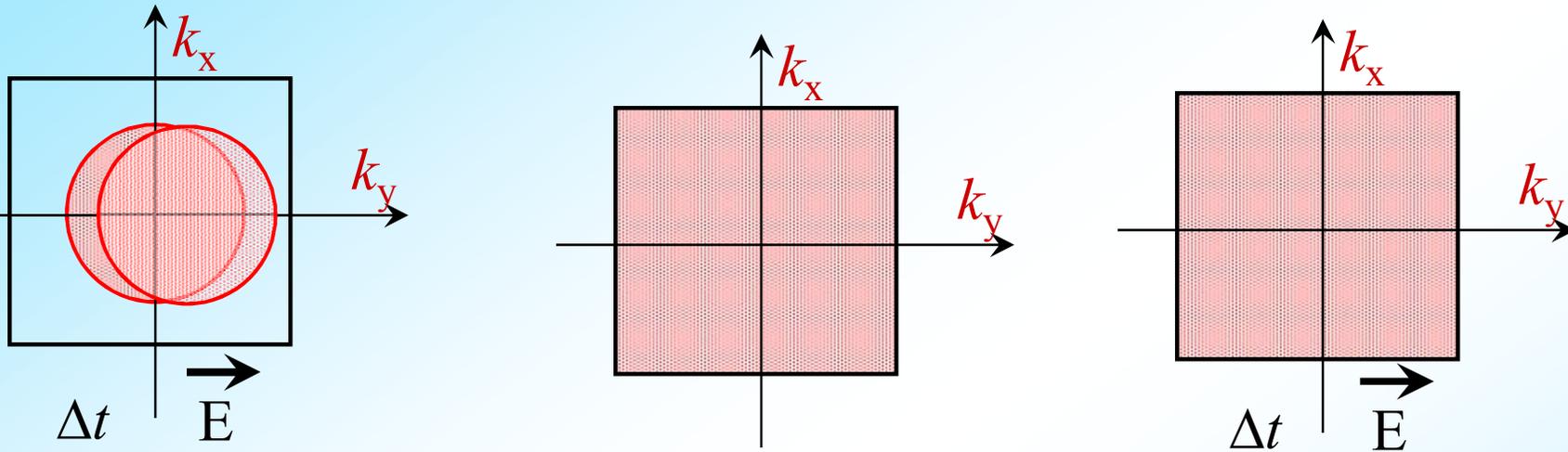


$$\left(\frac{dI}{dV}\right)_{ns} \sim N_s(\omega) \sim \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 - \Delta^2}}$$

 Бардин, Купер и Шриффер предложили (теория БКШ), что электрон-фононное взаимодействие приводит к появлению притяжения между электронами вблизи уровня Ферми и образованию электронных (куперовских) пар.

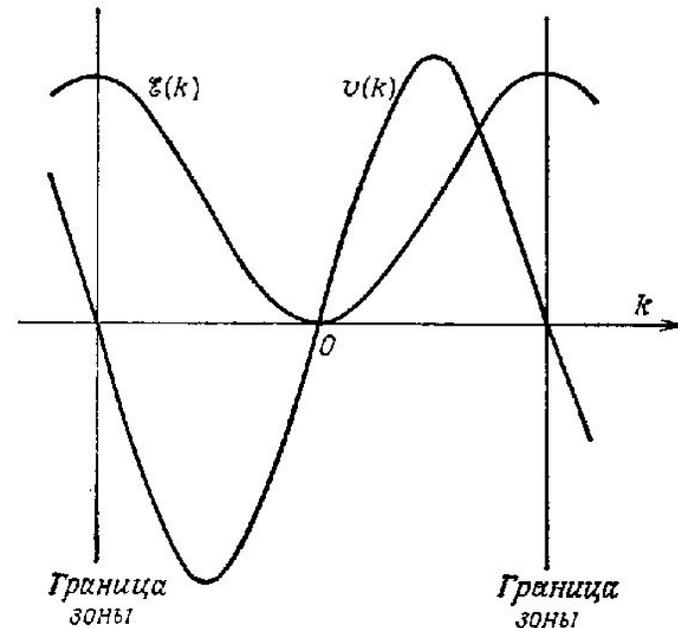
 В электронном спектре возникает щель, соответствующая разрыву пары. Возможность возбуждений с энергиями меньше ширины щели и, соответственно, возможность диссипации небольших кинетических энергий пропадают.

Приближение слабой связи

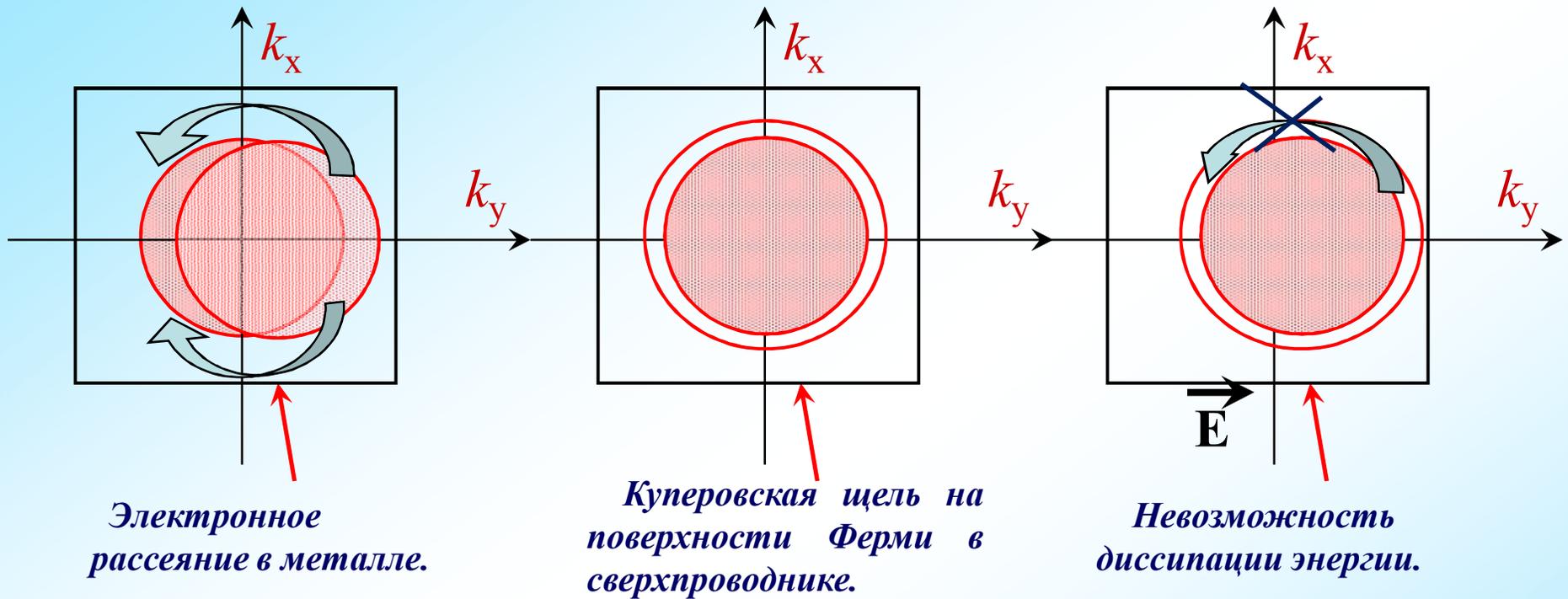


Волновые вектора всех электронов изменяются под воздействием электрического поля, но вклад заполненных зон в проводимость равен нулю. Последнее связано с периодическим изменением скорости при пересечении границ зоны Бриллюэна.

$$\mathbf{v}(\mathbf{k}) = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial \varepsilon(\mathbf{k})}{\partial \mathbf{k}}$$

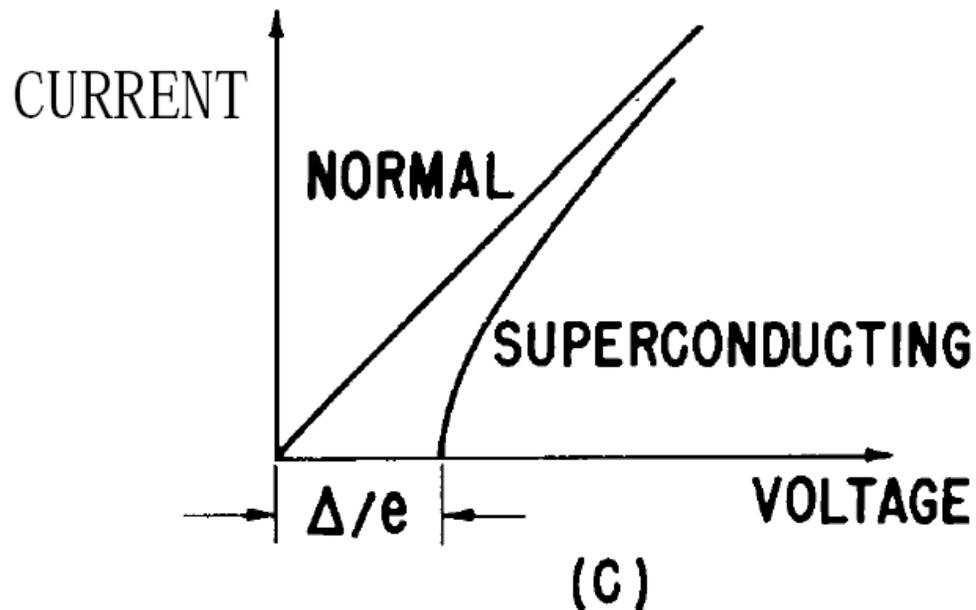
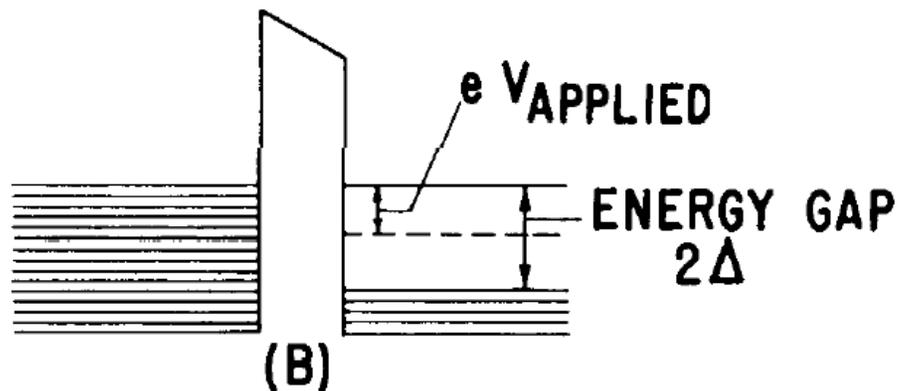
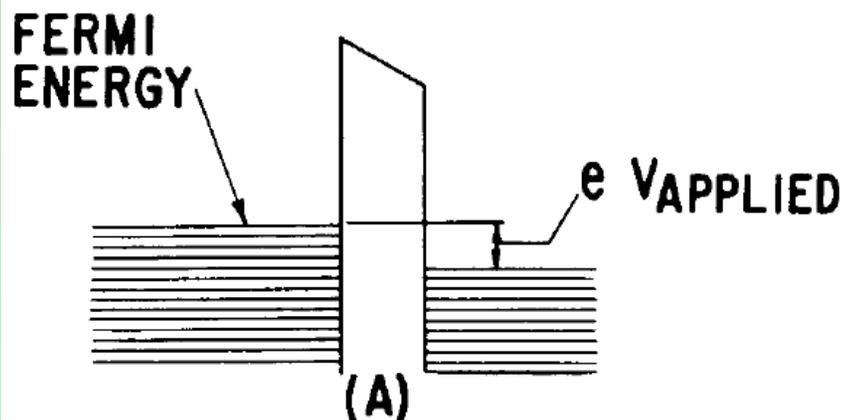


Электронный транспорт в сверхпроводниках



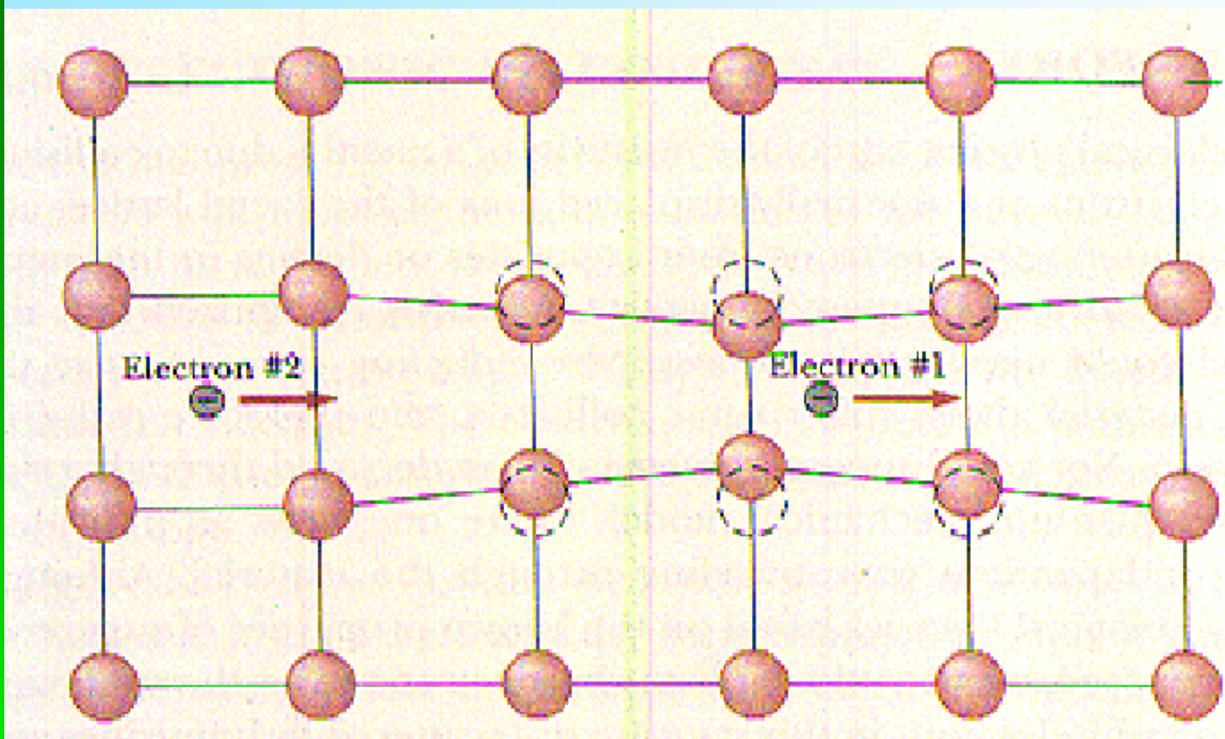
Невозможность диссипации = нулевому электросопротивлению.

Куперовское спаривание



Появление щели в электронном спектре прекрасно проявляется в туннельных спектрах (металл-изолятор-сверхпроводник), не говоря уж о современных методах фотоэмиссионной спектроскопии.

Куперовское спаривание



Простейшая картина электронного спаривания основывается на кулоновском “перезранировании”.

$T_c = \Theta_D \exp(-1/g)$, где Θ_D - температура Дебая (соответствует максимальным частотам фононов), а g - константа связи.

При температурах Дебая ~ нескольких сотен градусов и $g \ll 1$ (иначе кристаллическая решетка становится неустойчивой):

$$T_c \leq 30-40 \text{ K}$$

За исключением водорода и компании под колоссальным давлением...

Высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП)

Однако,



★ Текущие рекорды (норм. условия):

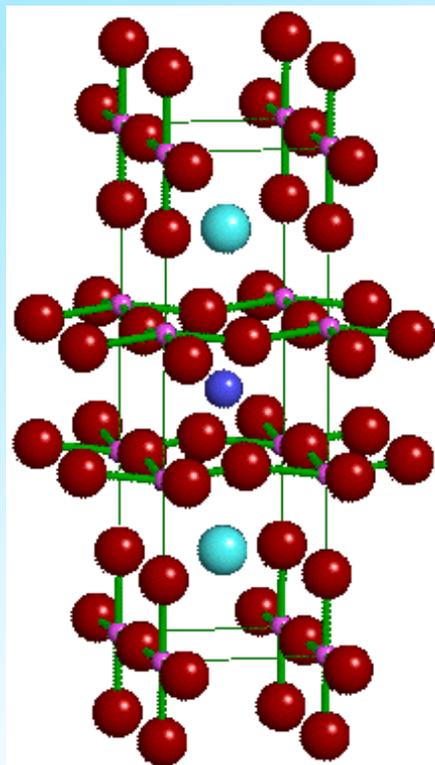
$$T_c \approx 140 \text{ K}$$



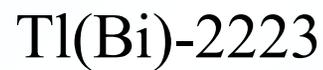
Нужны другие, нефоновые механизмы спаривания

ВТСП купраты: сходство структур

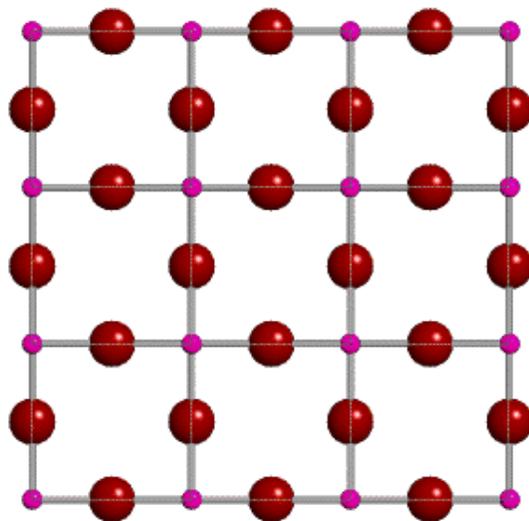
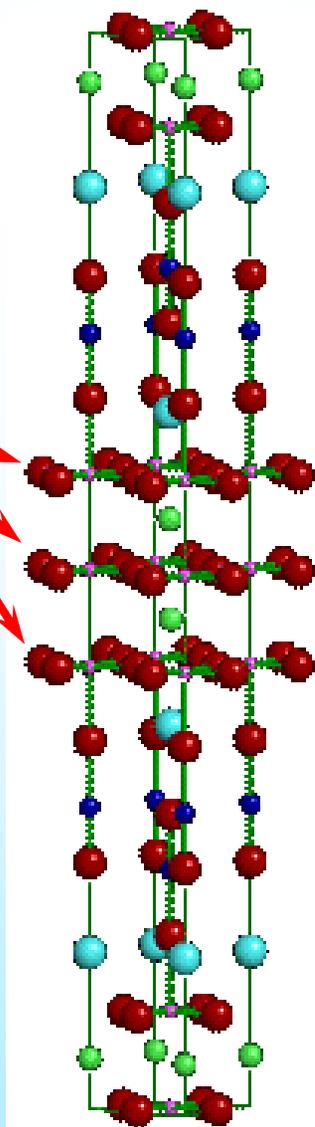
Все известные *пока* ВТСП соединения ($T_c > 90$ К, норм. усл.), - это купраты, основным элементом которых являются CuO_2 плоскости.



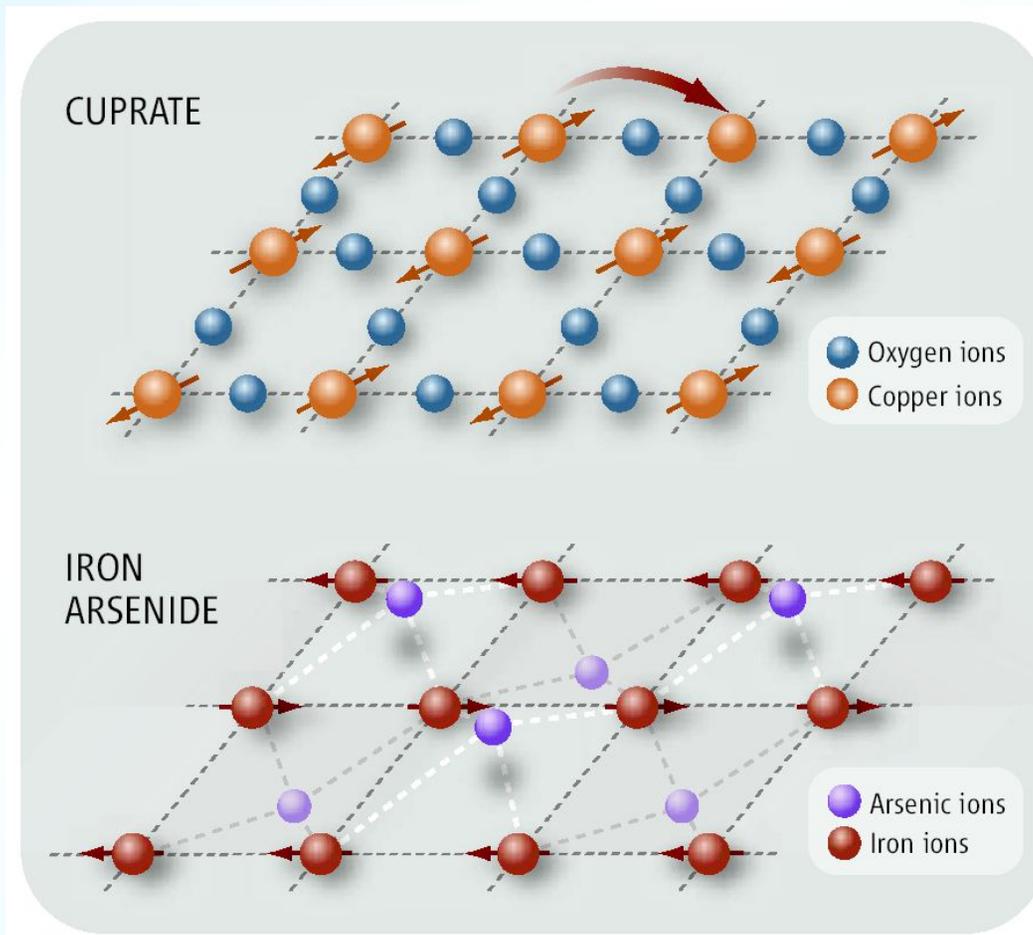
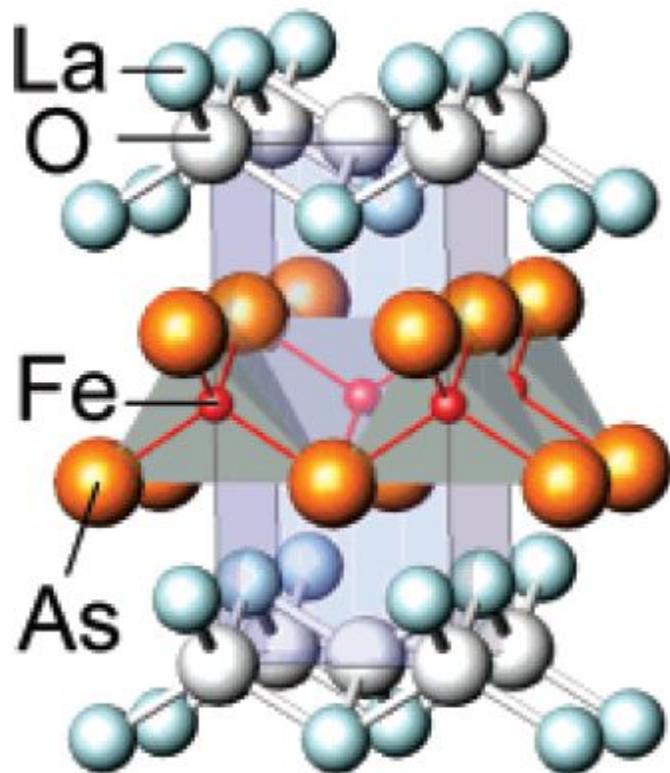
CuO_2
ПЛОСКОСТИ



CuO_2
ПЛОСКОСТИ



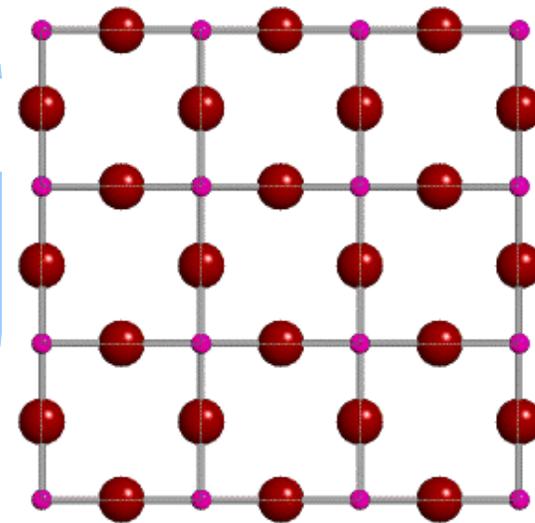
Сверхпроводники на основе $FeAs$ плоскостей



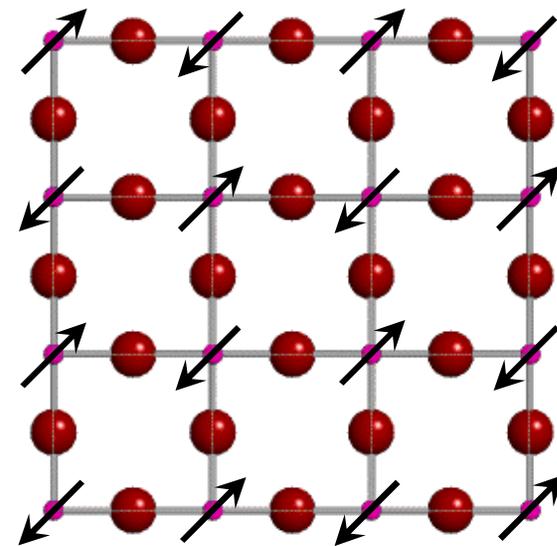
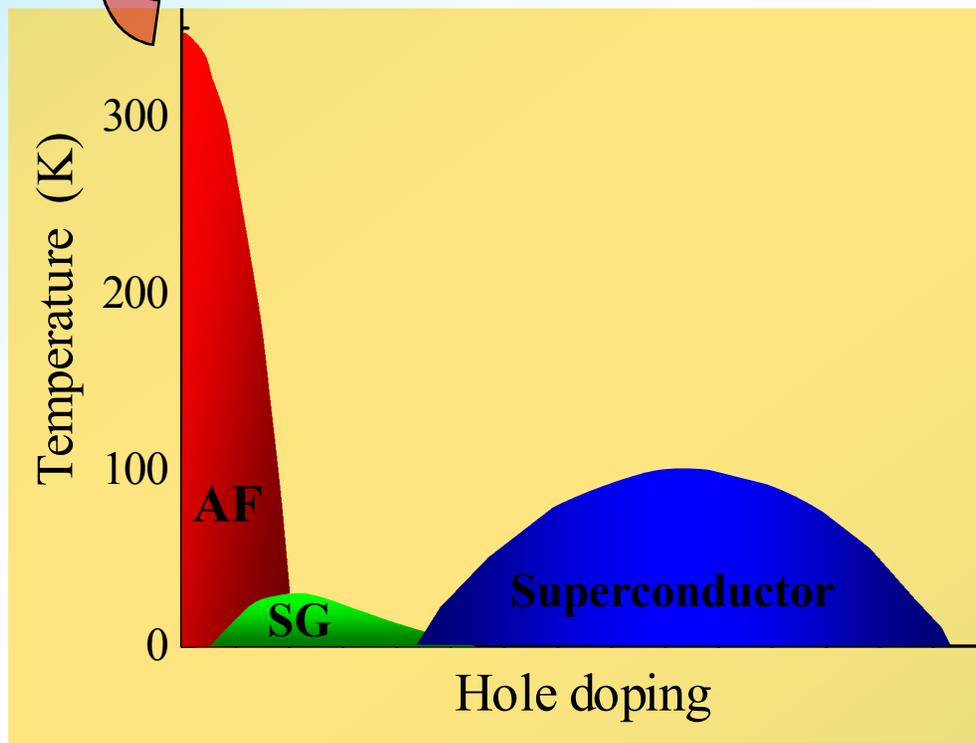
Электронные корреляции и состояние моттовского изолятора

В исходном (недопированном) состоянии купраты являются не металлом, а диэлектриком с запрещенной зоной ~ 2 эВ.

Диэлектрическое состояние вызвано сильными электронными корреляциями, запрещающими нахождение двух электронов на одном ионе.



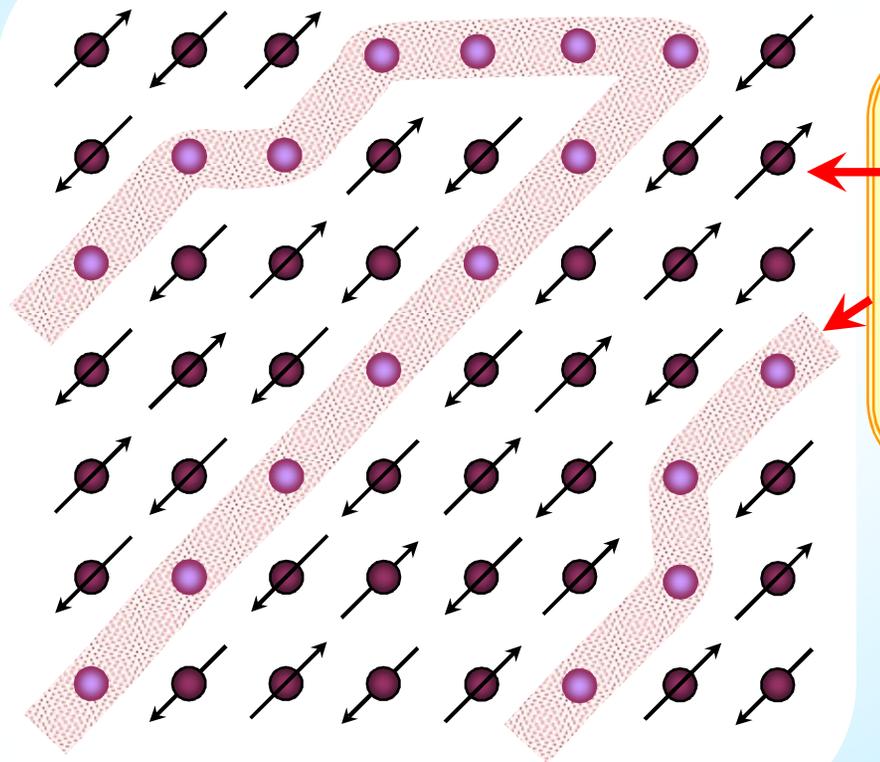
CuO_2



$T < T_N$

Антиферромагнитные корреляции, гетерофазное состояние и сверхпроводимость

✓ **Высокотемпературная сверхпроводимость реализуется в области фазовой диаграммы с сильными антиферромагнитными корреляциями.**



Возможный механизм ВТСП (утрированно-упрощенно):

-  **спаривание электронов в АФМ областях;**
-  **движение сверхпроводящих пар по границам.**

Высокотемпературная сверхпроводимость

★ Хотя за более 30 лет после открытия ВТСП не удалось ни выяснить ее природу, ни снизить стоимость сверхпроводников до массово-доступного уровня, ограничения на критические параметры ушли в прошлое....

★ Осталось сделать еще пару шагов, сравнимых с открытием Беднордца и Мюллера в 1986 году, и

