

Сверхпроводники XXI века

**(сверхпроводимость, сверхпроводящие материалы, их
получение и применение)**

А.Р.Кауль

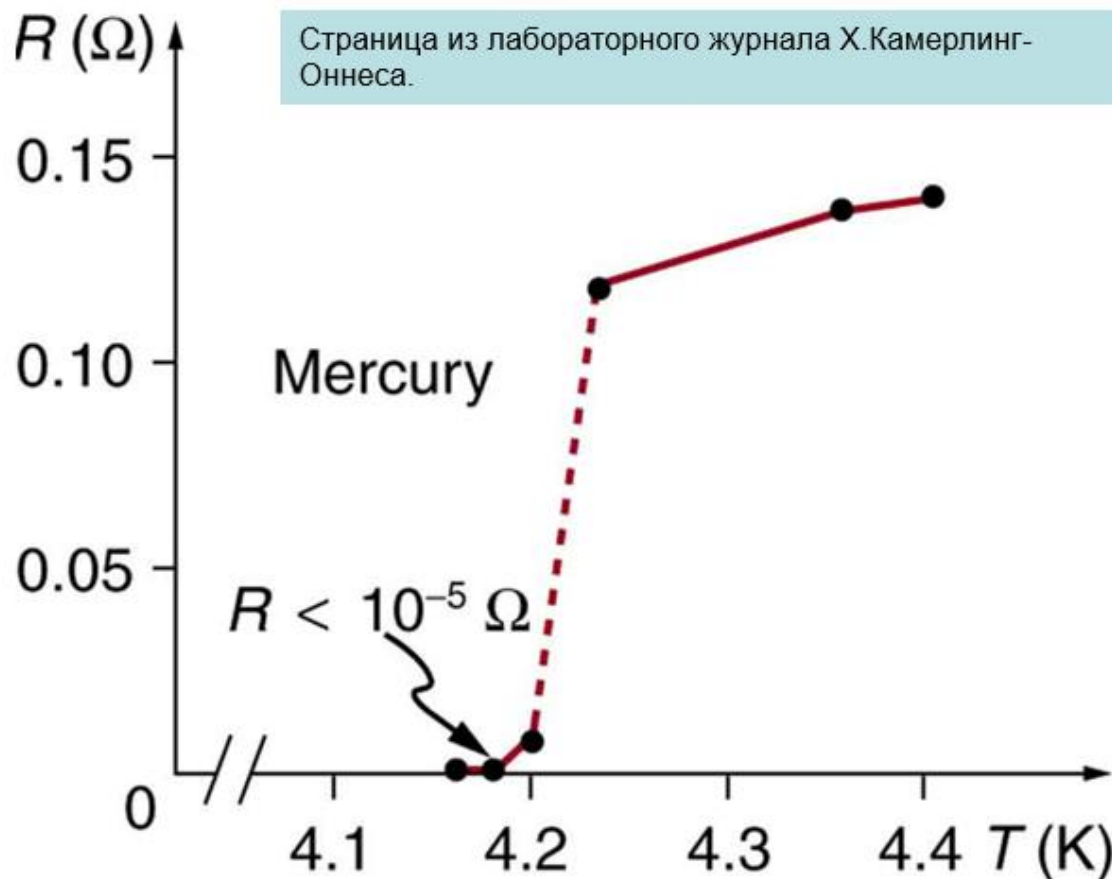
**профессор кафедры неорганической химии
Химического факультета МГУ им. Ломоносова**

Явление сверхпроводимости открыто в 1911 г. в Университете Лейдена голландским ученым **Х.Камерлинг-Оннесом**

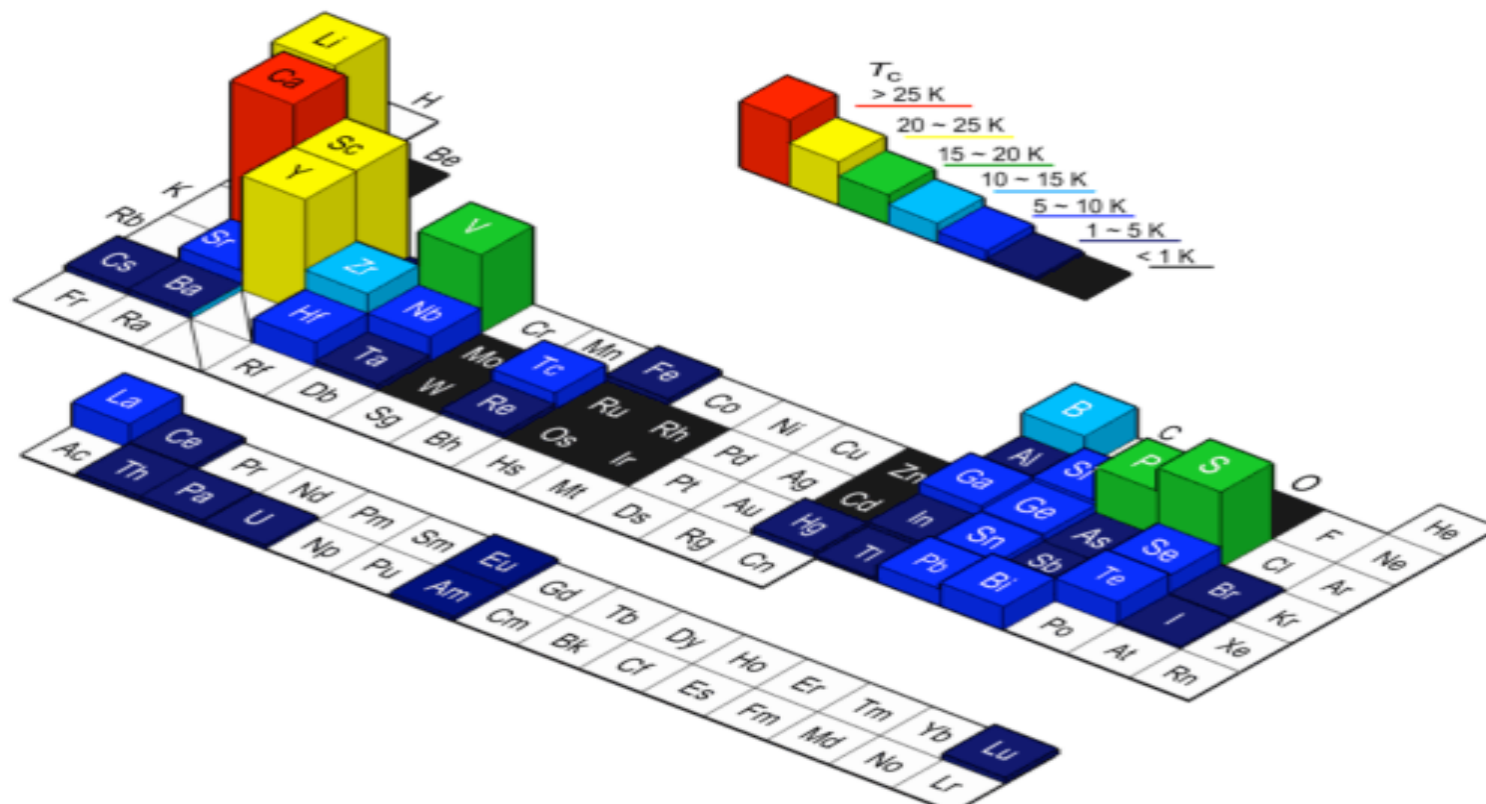
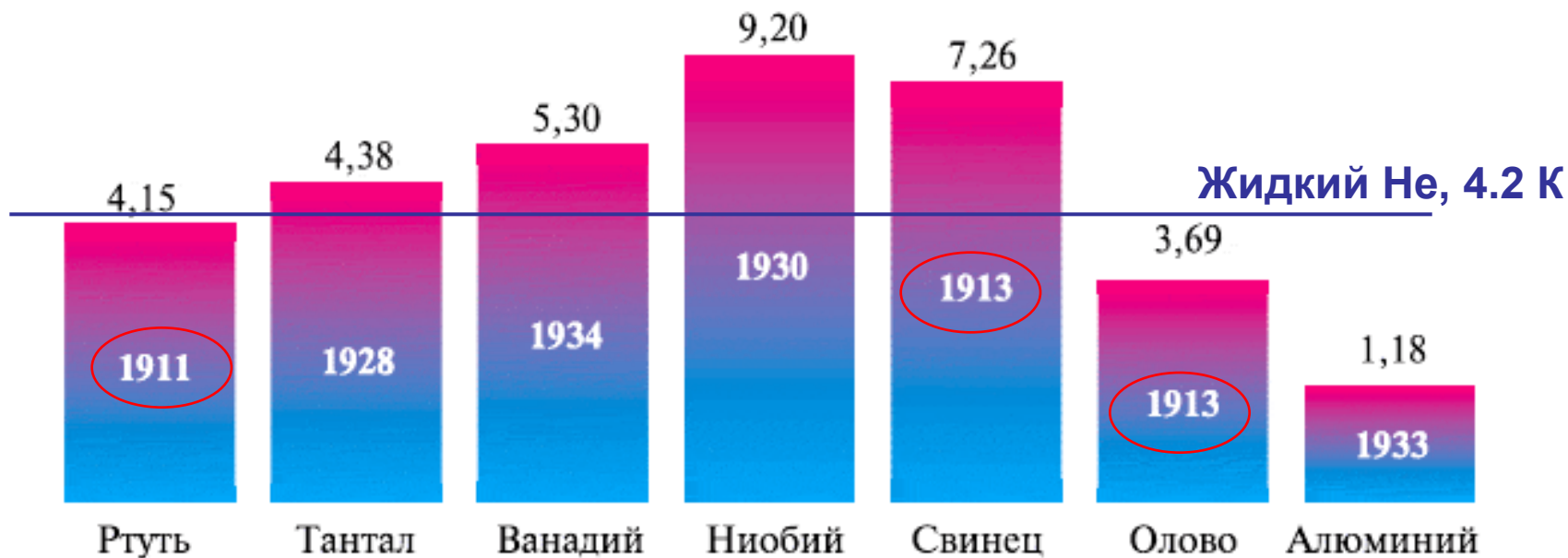


Heike Kamerlingh Onnes
1853 -1926

Нобелевская премия по
физике в 1913 г.



Соппротивление высокочистой ртути становится равным нулю при $T < 4,2$ К ($T_{\text{кип}}$ жидкого He)



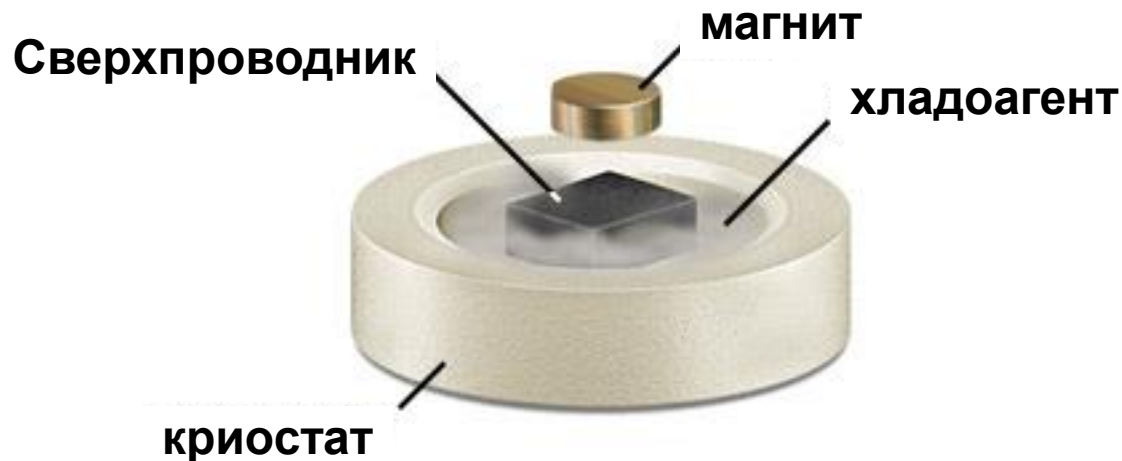
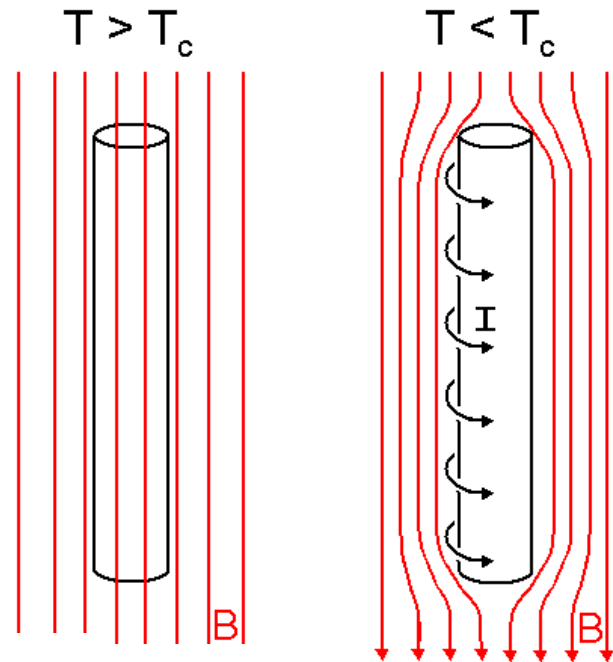
Эффект Мейснера (1933 г.)

Постоянное магнитное поле выталкивается из объема сверхпроводника.

Встречный магнитный момент сверхпроводящего образца создается током, текущим по его поверхности.

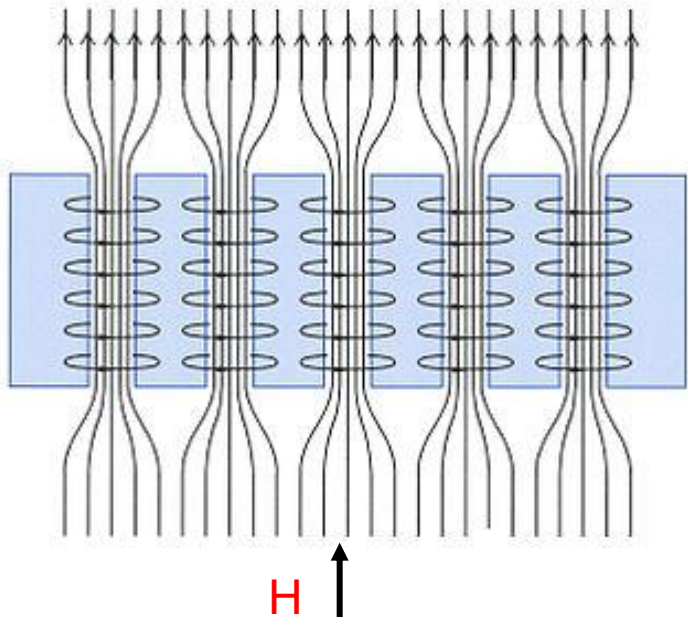
Сверхпроводник обладает диамагнетизмом.

Диамагнетизм – неременное свойство сверхпроводника.

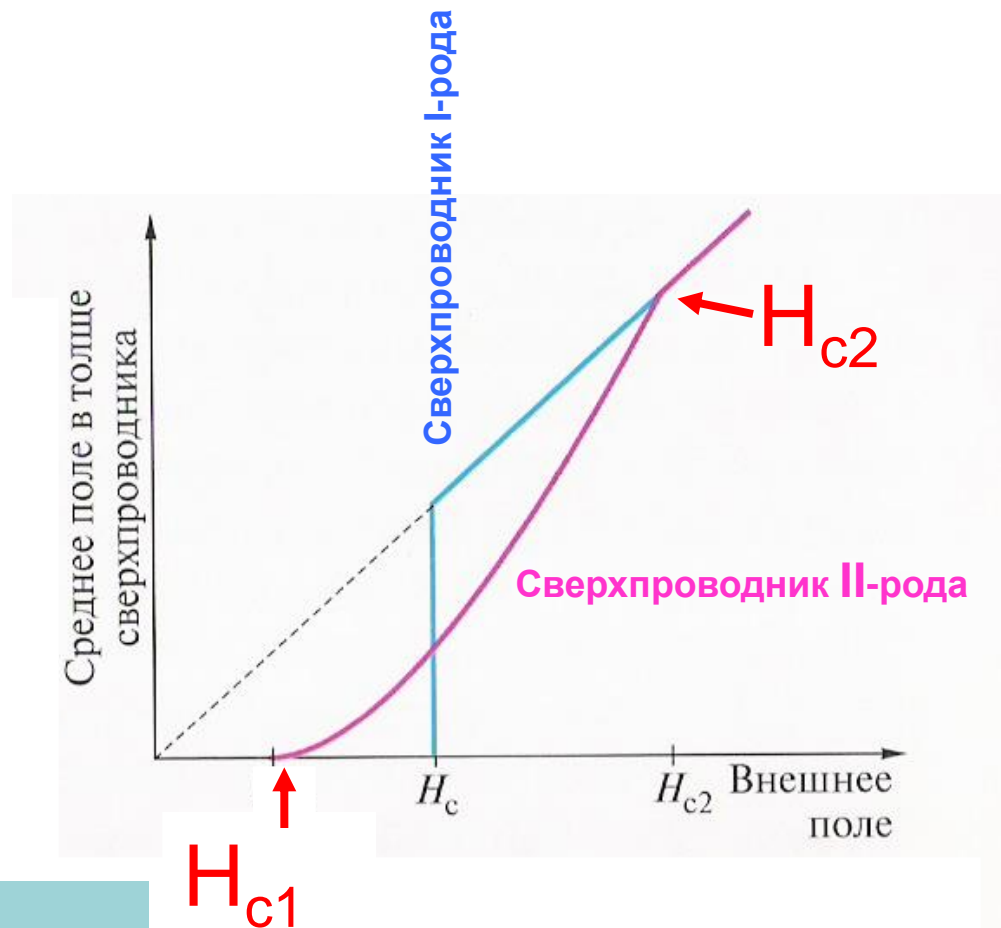


Сверхпроводники I-го и II-го рода.

Магнитные вихри (вихри Абрикосова).

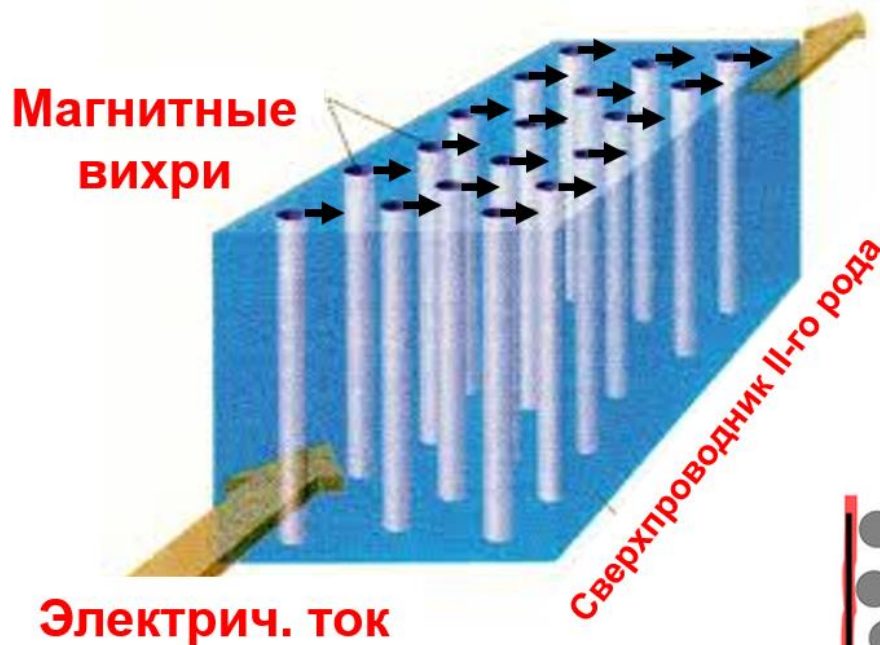


Проникновение магнитного поля в сверхпроводник II-го рода.

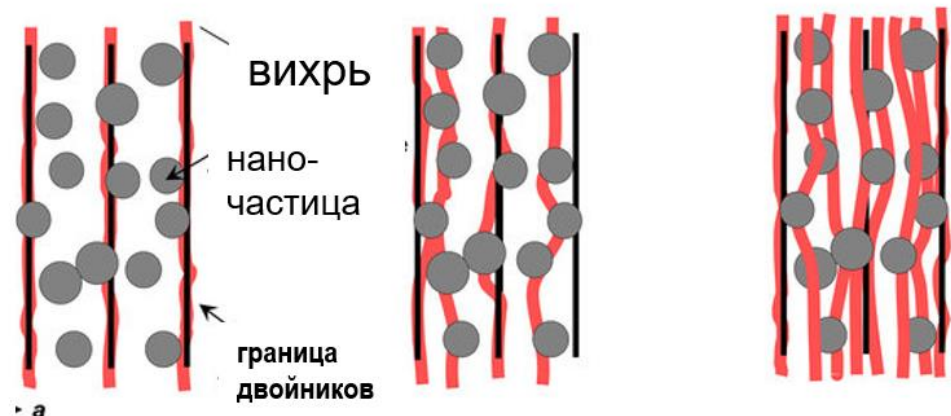


1930-е. Работы ФТИНТ (Харьков)
1950-е. Абрикосов А.А.

Коллективное движение магнитных вихрей. Крип магнитного потока. Пиннинг.

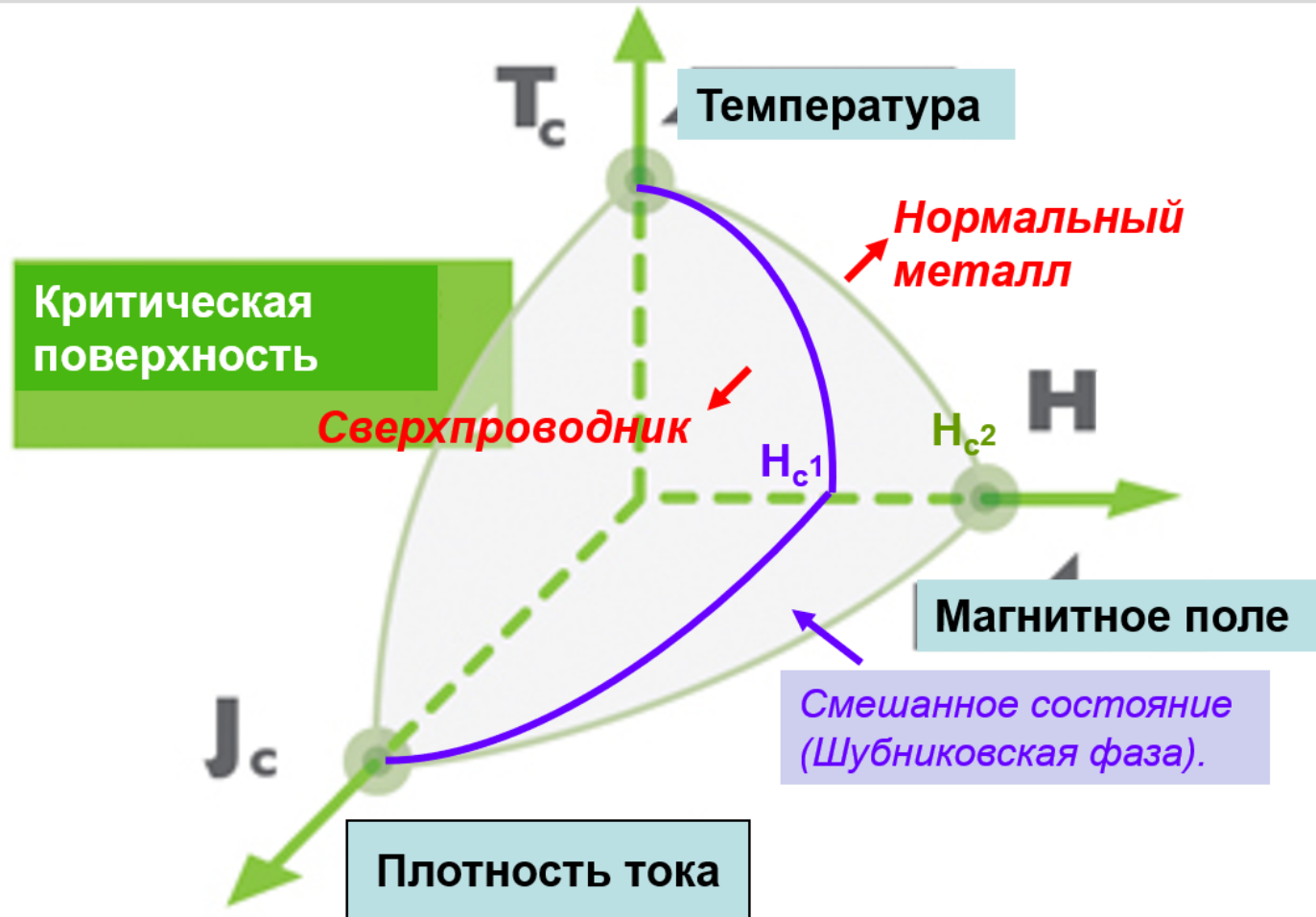


Для повышения устойчивости токонесущей способности сверхпроводников в магнитном поле необходимо закрепление магнитных вихрей - **ПИННИНГ**



Центрами пиннинга магнитных вихрей могут быть различные дефекты структуры сверхпроводника (точечные дефекты, дислокации, антифазные границы, границы двойников, границы зерен), а также инородные включения случайного происхождения или целенаправленно созданные.

Фазовая диаграмма сверхпроводника 2-го рода в координатах
Температура – Магнитное поле – Плотность тока



Критическое магнитное поле и критическая плотность тока сверхпроводника возрастают при уменьшении температуры ниже T_c .

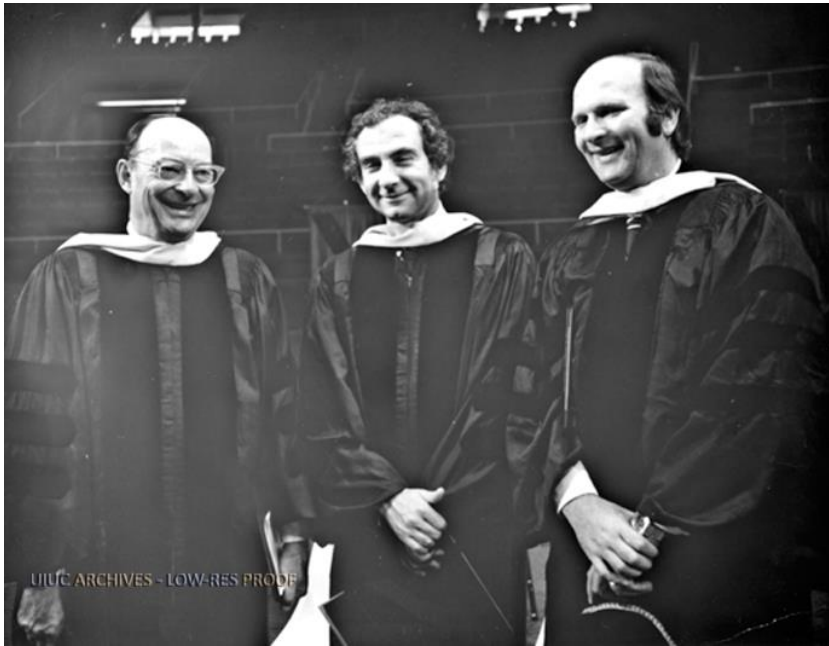
«Сверхпроводимость укрепляется при понижении температуры $< T_c$ »

J.Bardeen, L.Cooper, R.Schrieffer

«БКШ-теория», 1957 г.

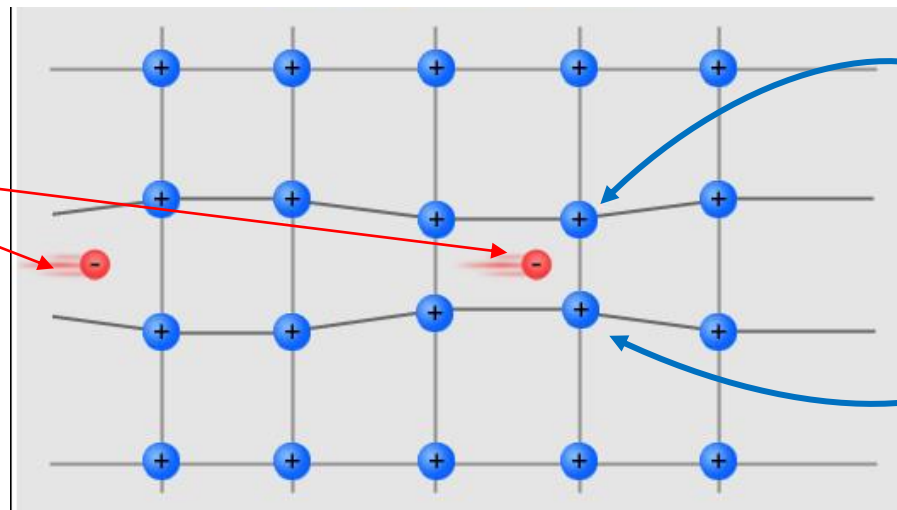
Нобелевская премия по физике 1972 г

«За создание теории сверхпроводимости»



Электроны образуют Куперовские пары. Куперовские пары с участием фононов образуют квантовый «бозе-конденсат».

Куперовская
пара
электронов



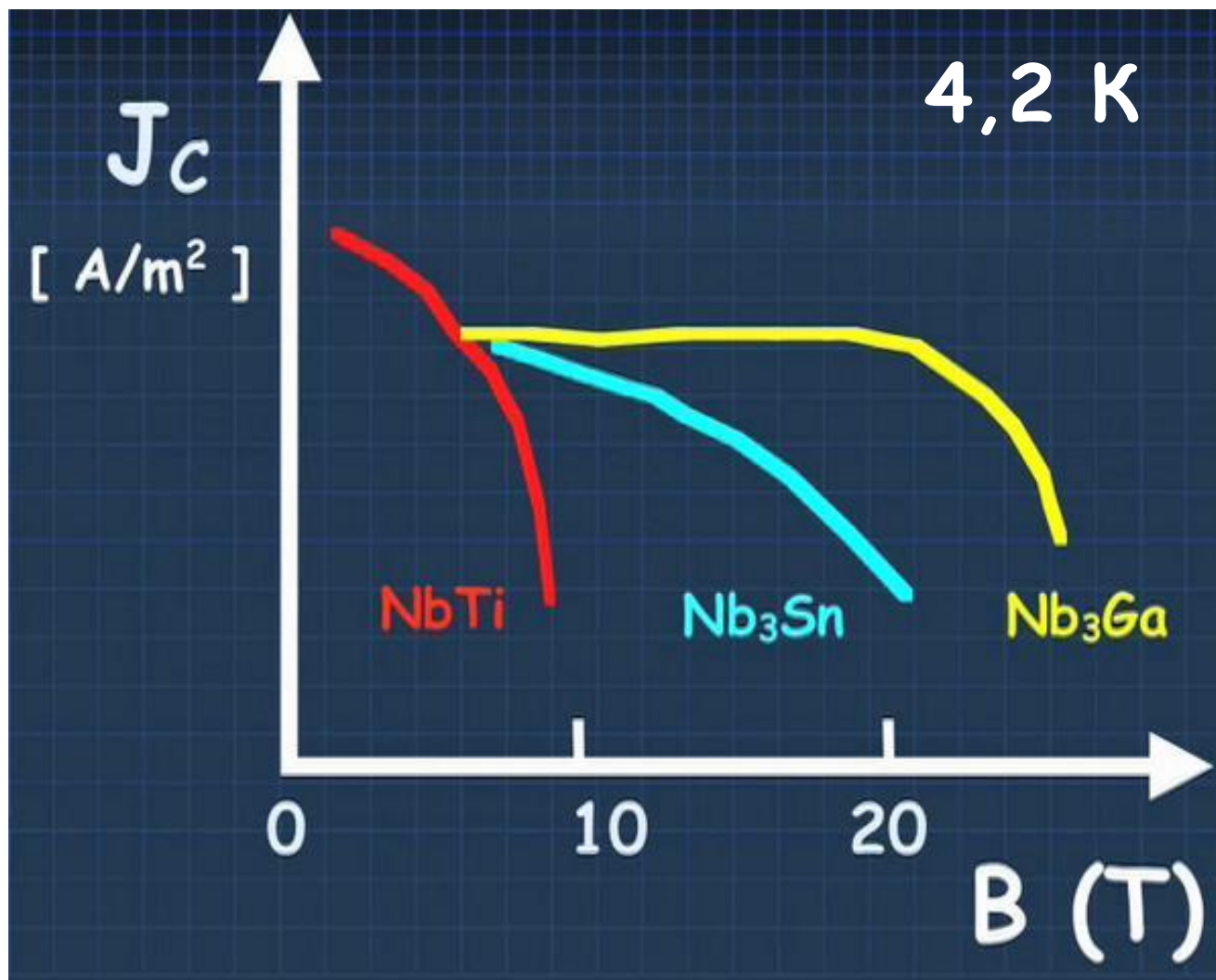
Колебания
кристаллической
решетки – фононы

Низкотемпературные сверхпроводники

Интерметаллид	T_c , К	H_{c2} , Тл, при 4,2 К
Nb_xTi_{1-x} ($x \approx 0,5$)	8–10	9-13 ●
V_3Ga	14,5	22
Nb_3Sn	18	23 ●
V_3Si	17	23
Nb_3Ga	20,3	34
$Nb_3Al_{0,7}Ge_{0,3}$	20,7	37
Nb_3Ge	24	40 ●!?

NbTi - основной низкотемпературный сверхпроводник для немагнитных применений.

Nb₃Sn - основной низкотемпературный сверхпроводник для магнитных применений.



Низкотемпературные сверхпроводники NbTi

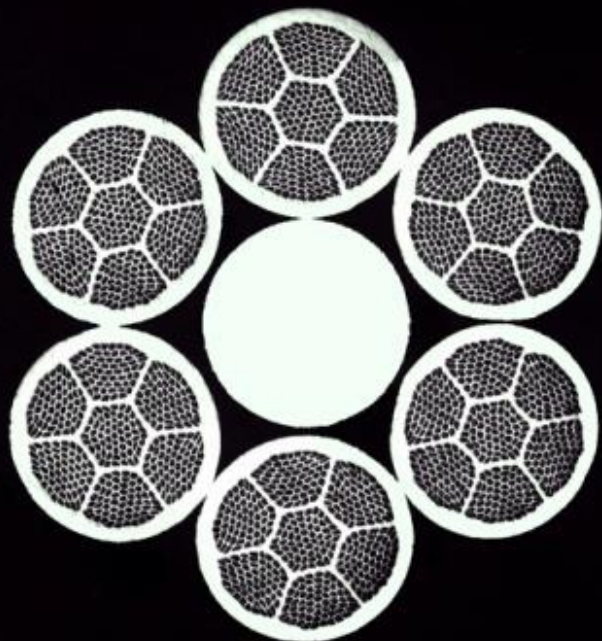


- Металл => можно получить длинный и гибкий круглый (!) провод;
- Следствие большой длины когерентности => критический ток не чувствителен к качеству межзеренных границ;
- Высокий уровень развития технологии => низкая цена, большой объем производства, стабильное качество.



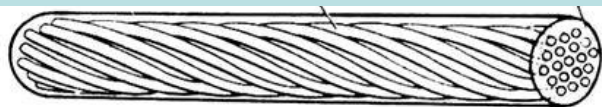
Вид цеха производства металлических сверхпроводников Чепецкого металлургического завода. Производительность 60 т/год. Крупнейшее и самое современное производство в Европе.

Минатом, г.Глазов



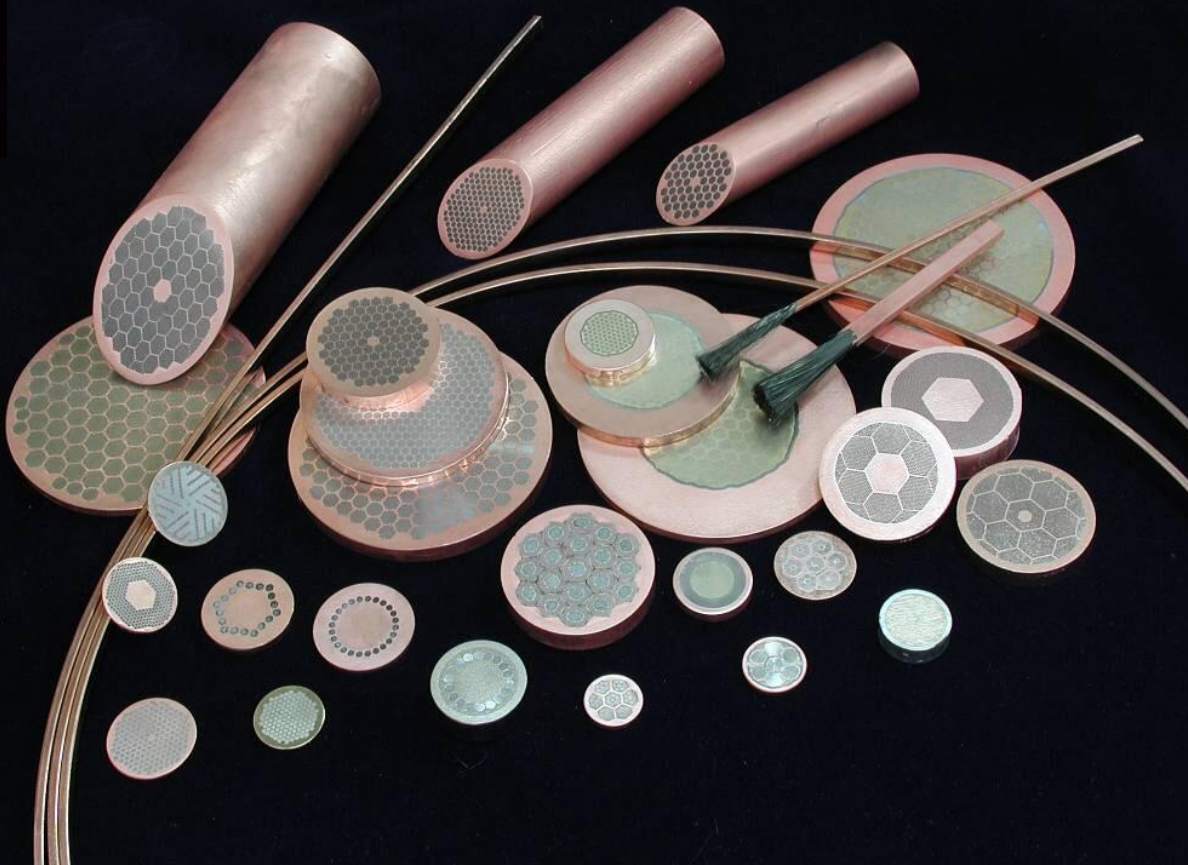
Сечение сверхпроводящего
кабеля

Твистированный
сверхпроводящий кабель



Разновидности промышленно производимых
сверхпроводящих кабелей на основе

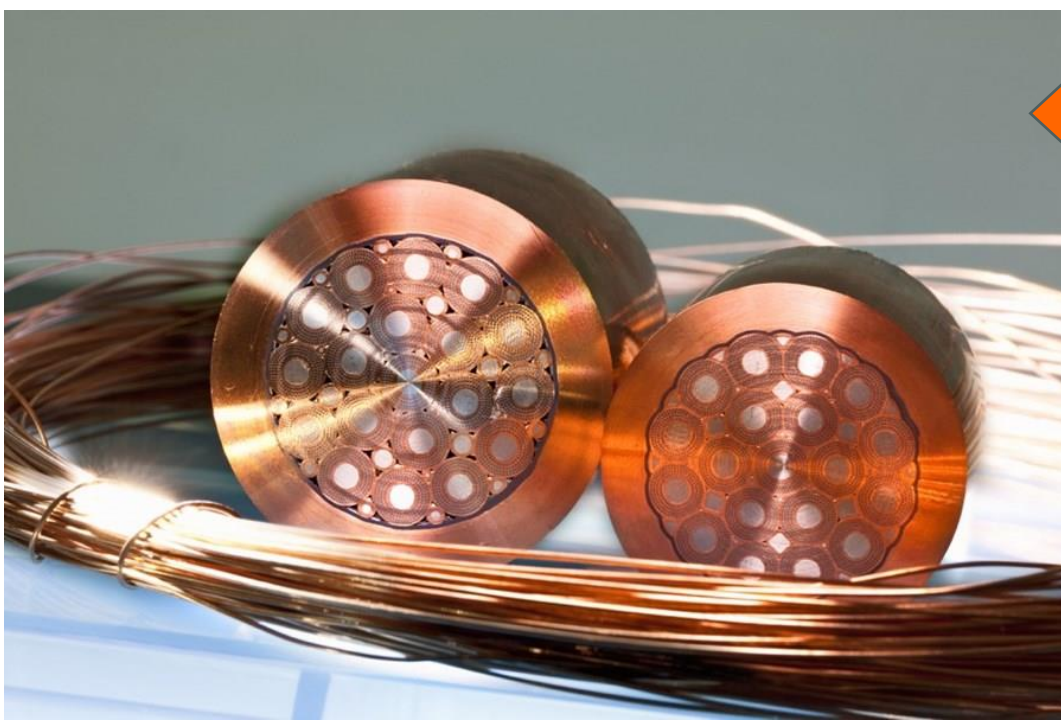
NbTi и Nb_3Sn



Международный термоядерный реактор ITER (Cadarach, France)



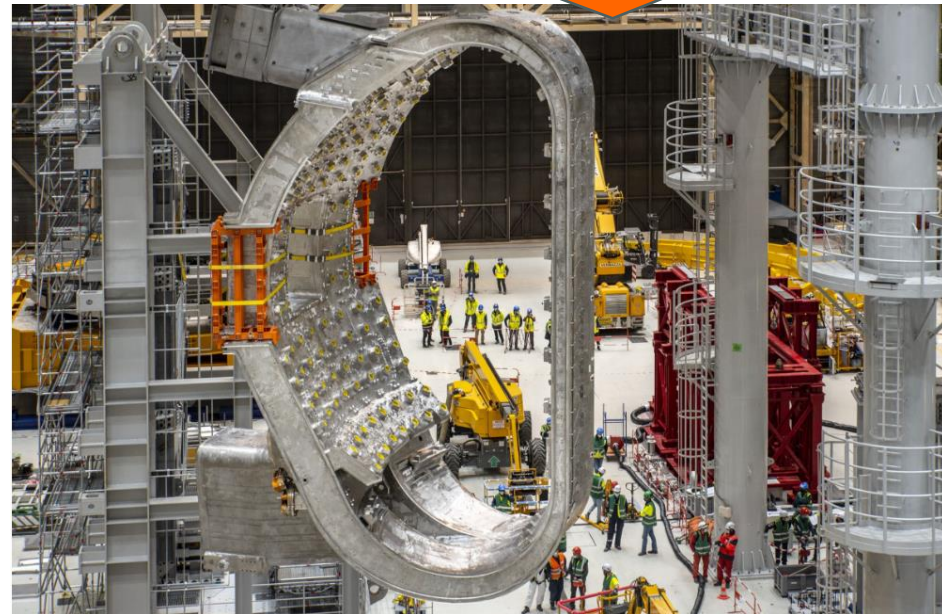
Совместный проект 35 стран. 15 лет строительства. 44 млрд Евро. Эксперименты начнутся ~ в 2035 г. 50 МВт- входной мощности, на выходе 500 МВт (??)



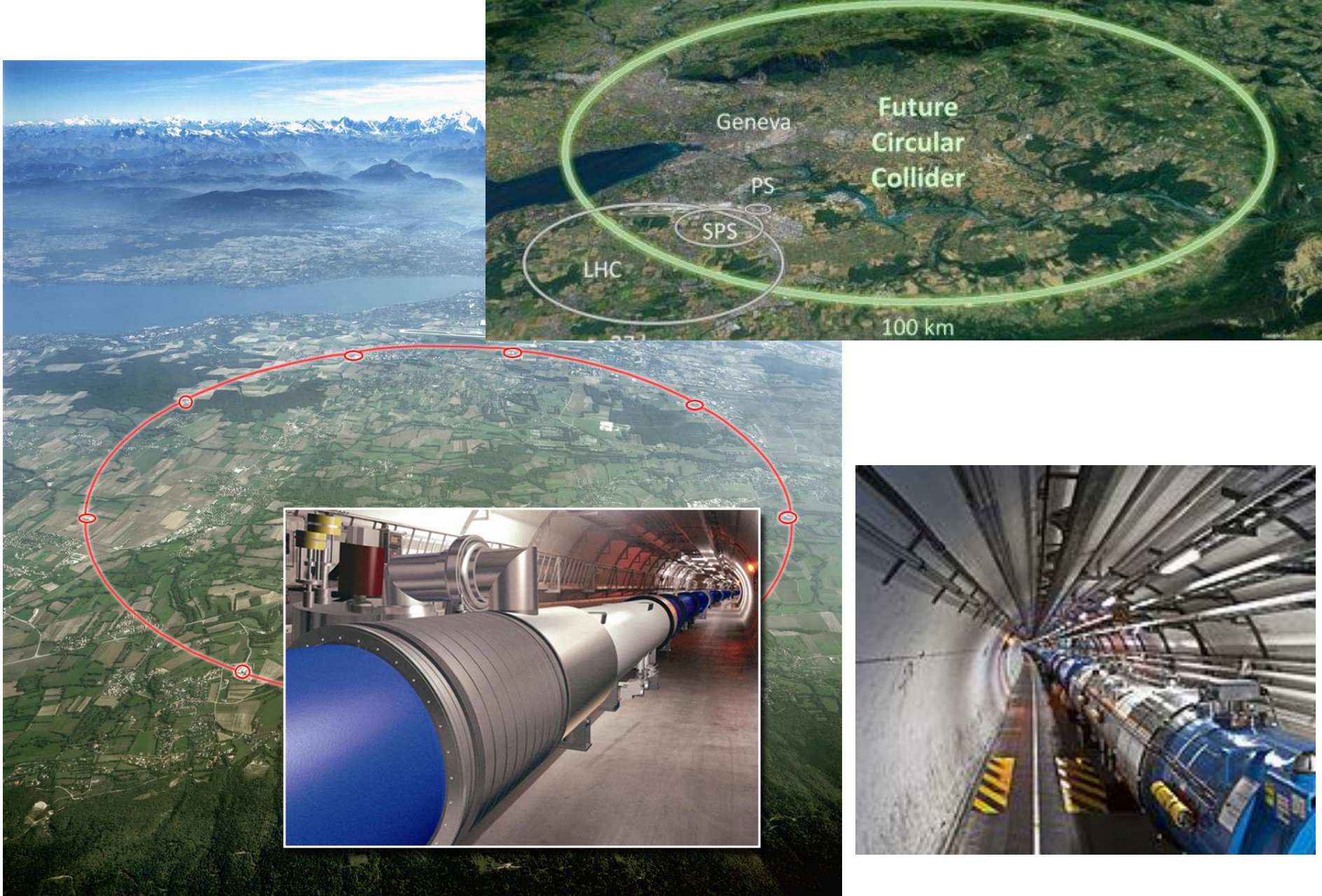
Сверхпроводящий кабель,
изготовленный из Nb_3Sn для
магнитных катушек ITER.

На изготовление магнитных
катушек израсходовано **500**
тонн Nb_3Sn .

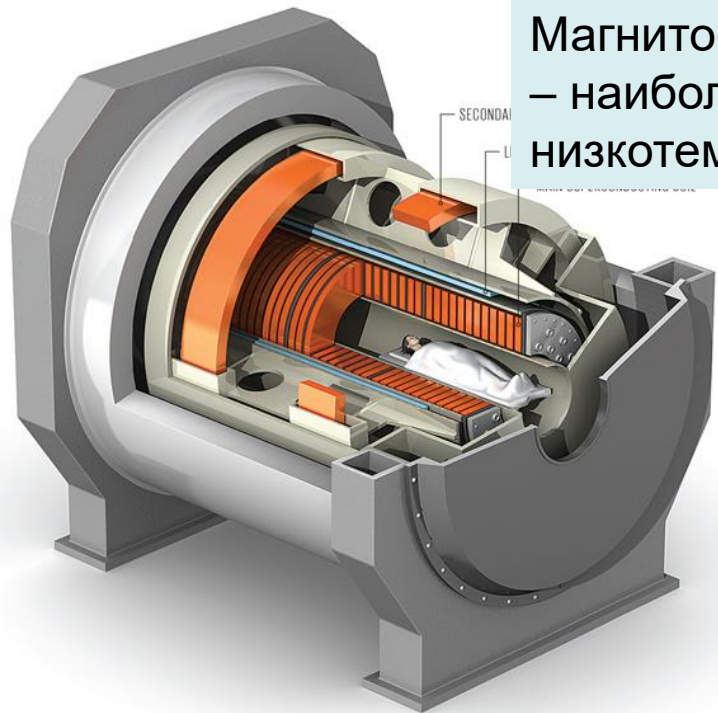
Одна из секций
сверхпроводящего магнита
для ITER.



Сверхпроводящие магниты Большого Адронного Коллайдера (LHC)



Магнито-резонансная томография высокого разрешения – наиболее масштабная сфера применения низкотемпературных сверхпроводников в будущем.

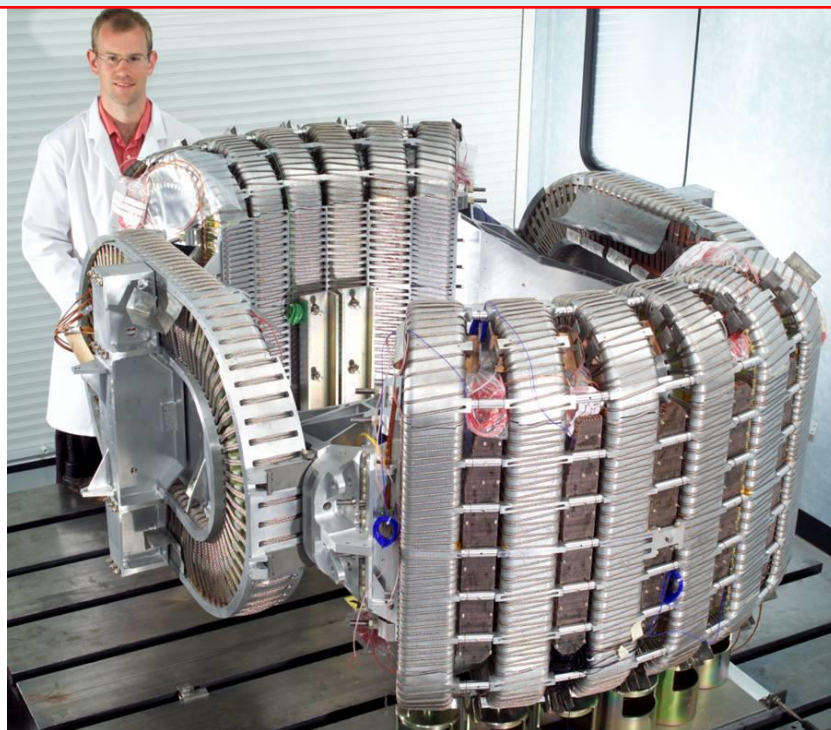
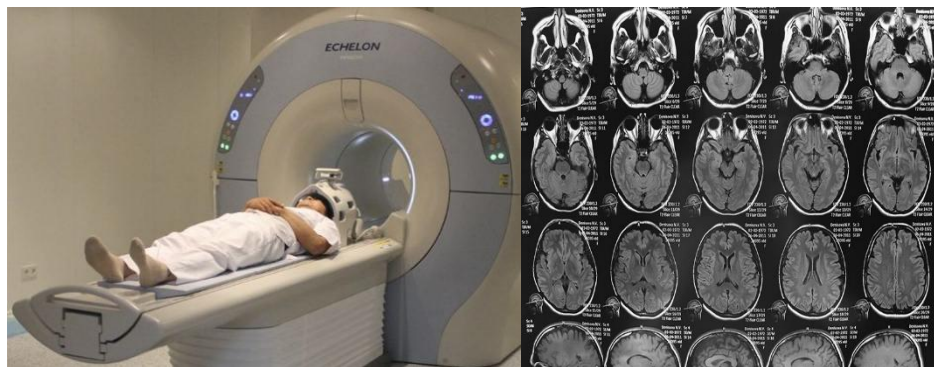


Проектируемый магнит с полем 11,5 Тл !

> 200 км сверхпроводящего кабеля с критическим током 1500 А

Разрешение томографа 0,1мм.

Магнитное поле в современных томографах 1,3 – 3 Тл.





Alex Müller

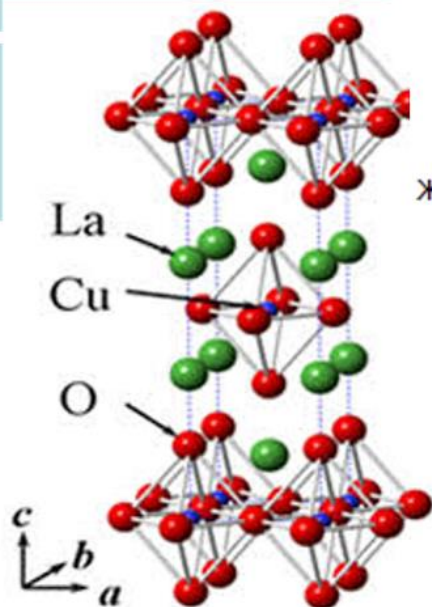
Georg Bednorz

Июнь 1986

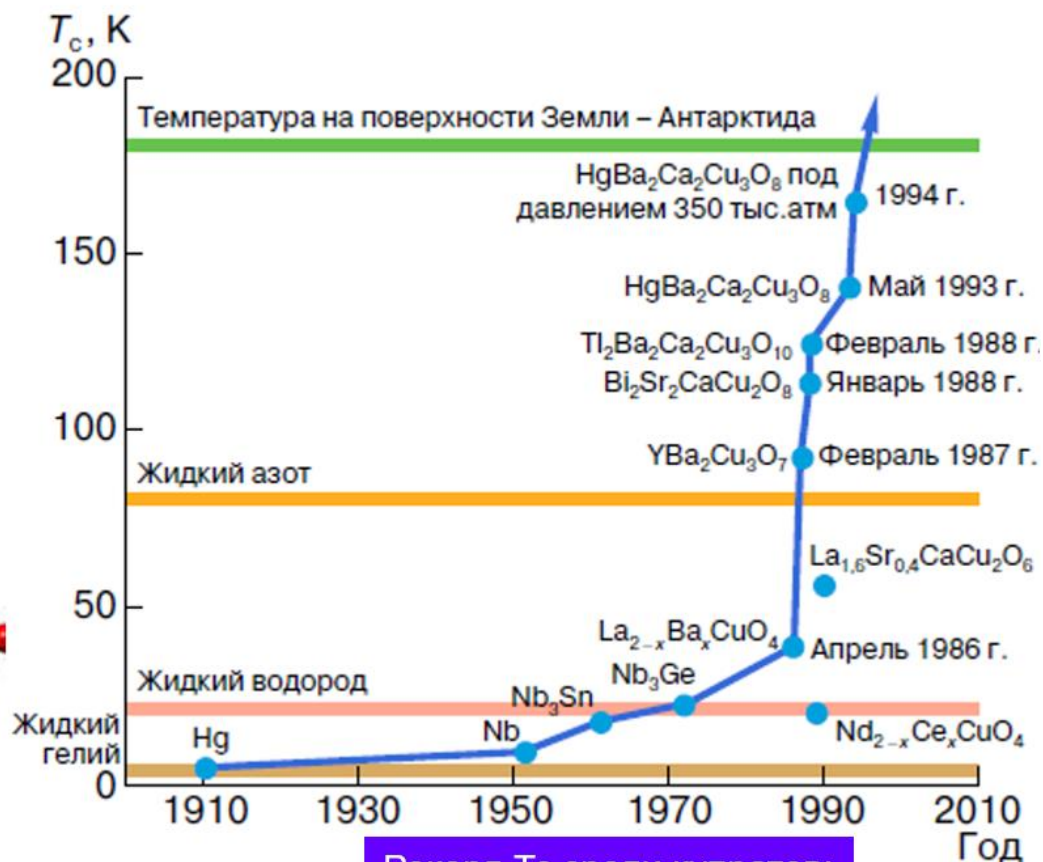
Нобелевская премия по физике 1987 г « За важный прорыв в открытии сверхпроводимости в керамических материалах»



$$T_c \approx 30 \text{ K}$$



Открытие высокотемпературных сверхпроводников



Рекорд T_c среди купратов:

При $P = 1$ бар

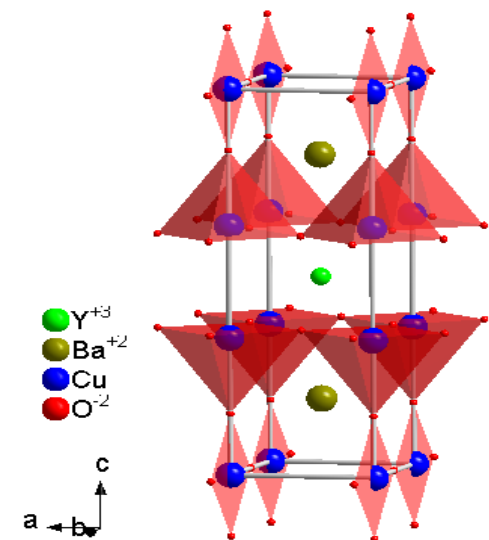
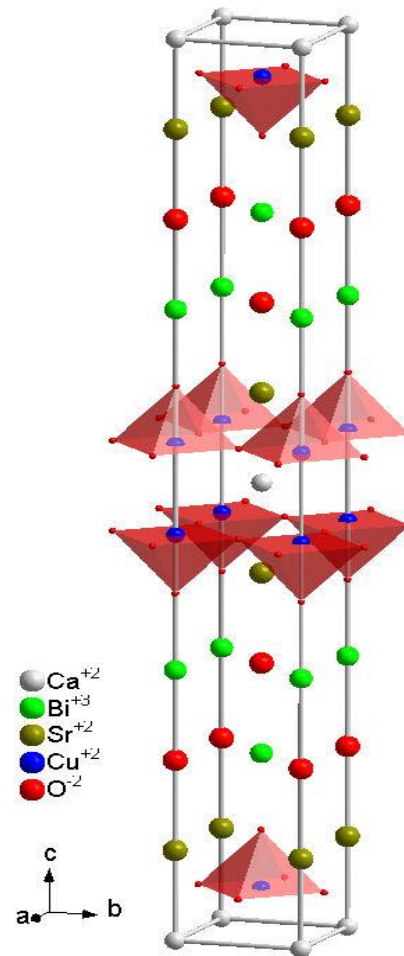
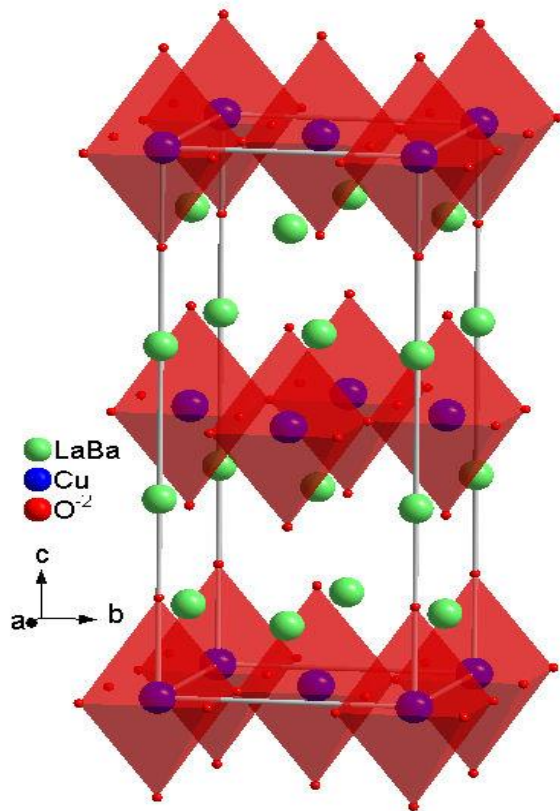
$T_c = 135 \text{ K}$

При $P = 300 \text{ Кбар}$

$T_c = 164 \text{ K}$

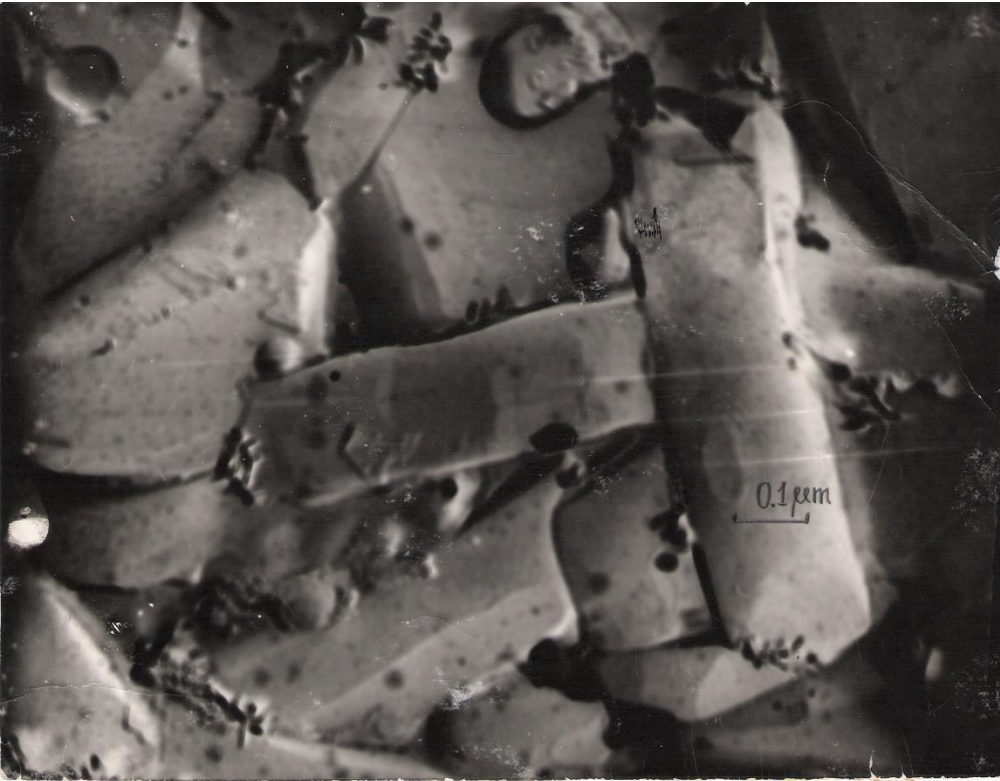


Кристаллические структуры ВТСП на основе купратов



Сверхпроводимость в купратах осуществляется по плоскостям CuO_2 и имеет анизотропный характер.

Микроструктура керамики сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$



— 100 нм

$T_c \sim 92 \text{ K}$

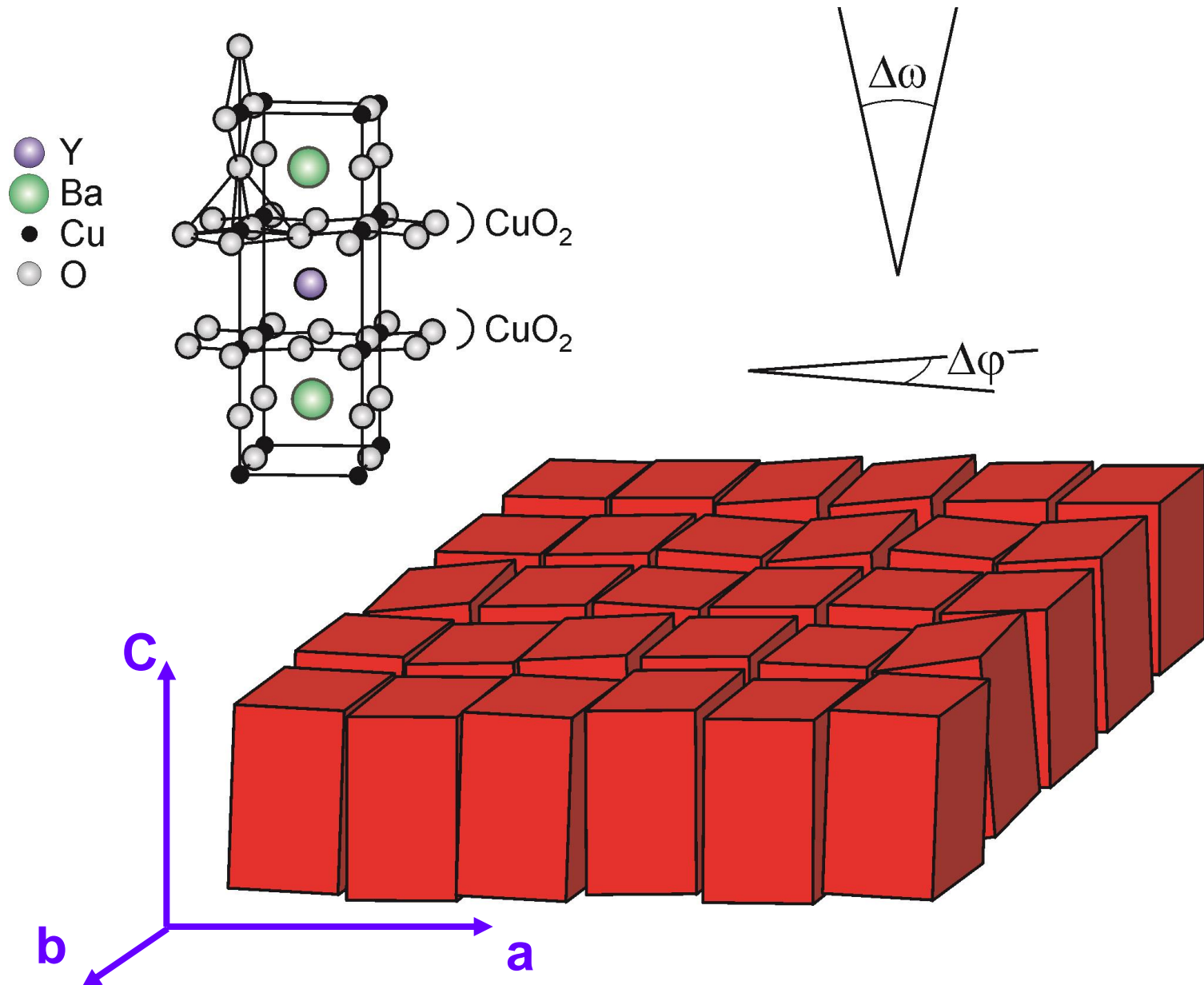
Плотность критического тока,
 J_c :

в керамике $\sim 10^1\text{-}10^3 \text{ A/cm}^2$

в монокристалле $\sim 10^4 \text{ A/cm}^2$

в эпитаксиальных тонких
пленках $> 10^6 \text{ A/cm}^2$

Для получения больших значений критической плотности тока пленки $\text{RBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ должны иметь биаксиальную текстуру.

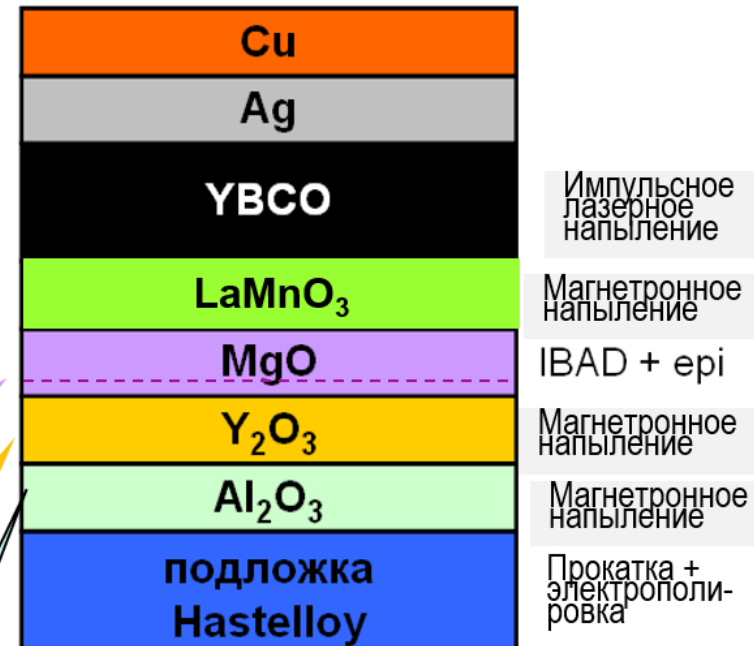


Строение ВТСП-лент 2-го поколения на основе $\text{LnBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ и основные технологические процессы их получения

Технология IBAD

IBAD,
затем
магнетронное
напыление
эпитаксиального
слоя

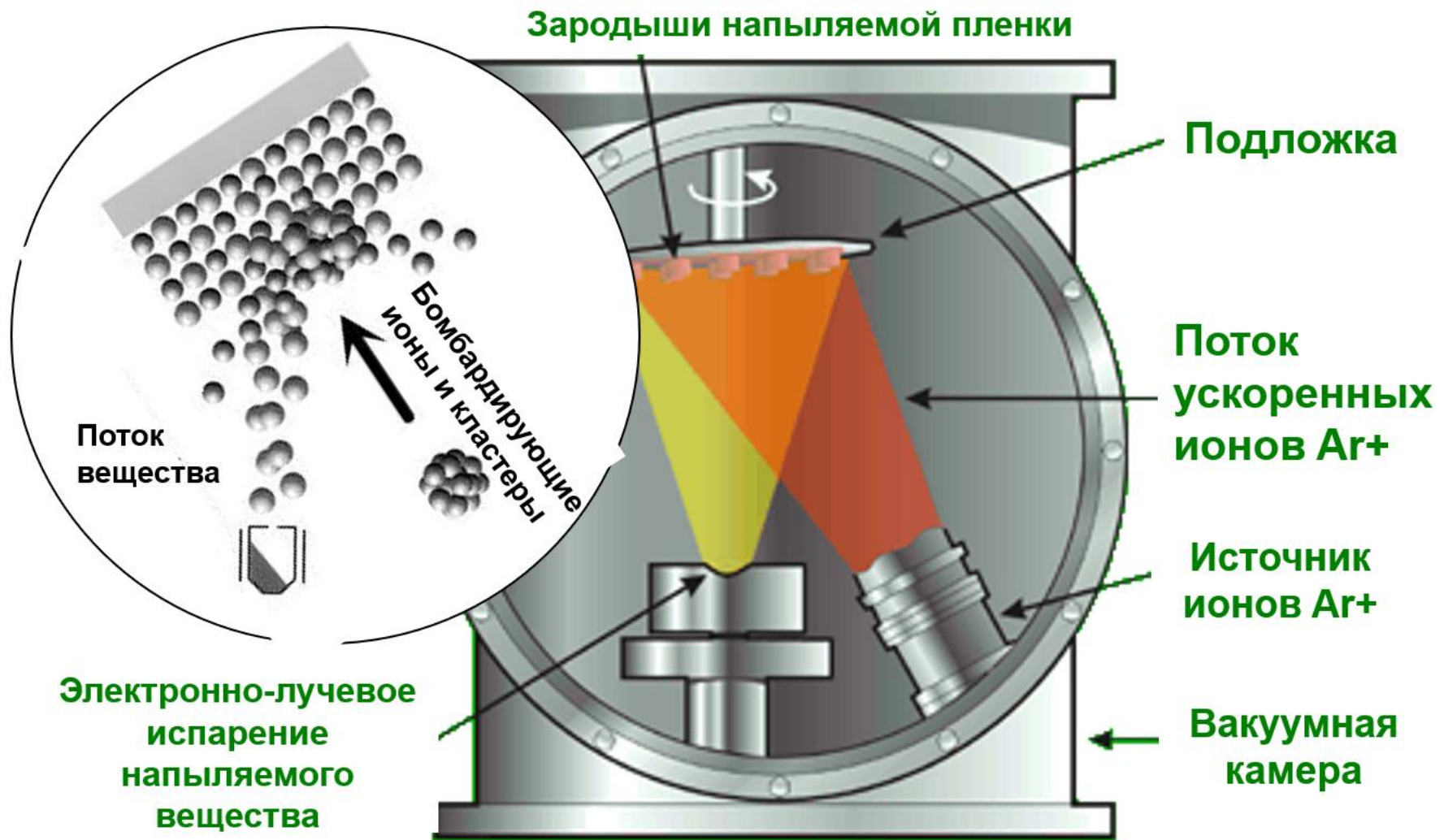
текстура



Слой Y_2O_3 предотвращает взаимодействие MgO с Al_2O_3 и сглаживает поверхность роста.

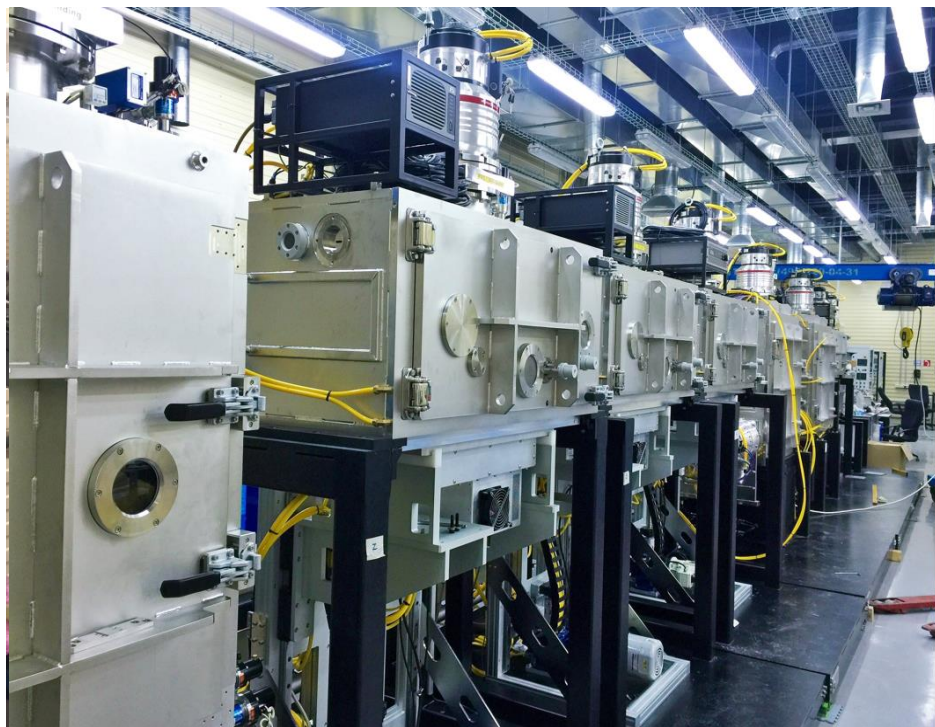
Слой Al_2O_3 тормозит диффузию атомов металлов из ленты-подложки в слой ВТСП, а также окисление подложки.

Принцип IBAD (Ion Beam Assisted Deposition)



На нетекстурированную (поликристаллическую) ленту из нержавеющей стали или никелевого сплава методом IBAD наносят оксидные слои **MgO**, $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ или TiN с острой биаксиальной текстурой.

IBAD и PLD оборудование в компании SuperOx



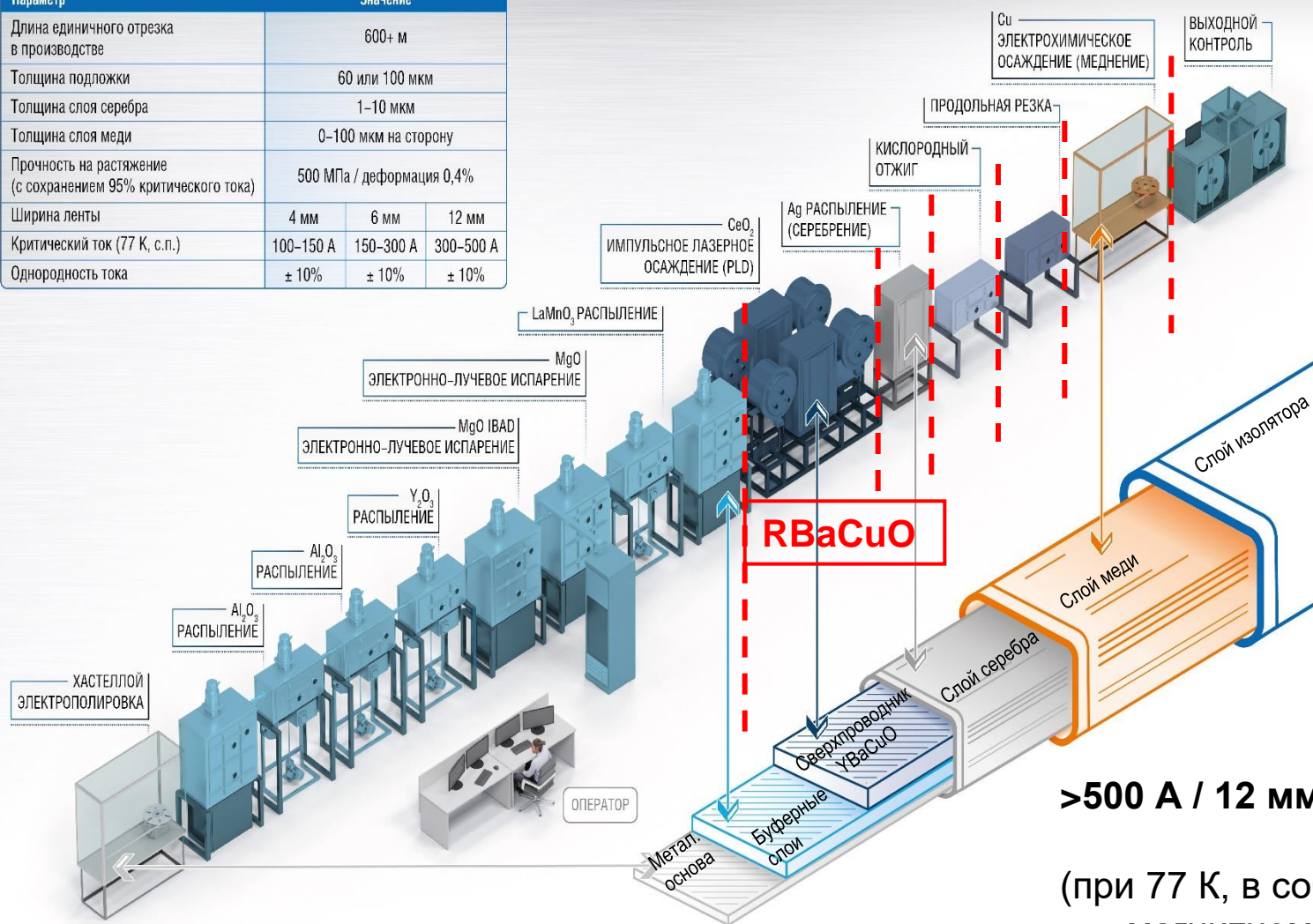
Линия нанесения буферных слоев. Текстура достигается при нанесении MgO методом IBAD.



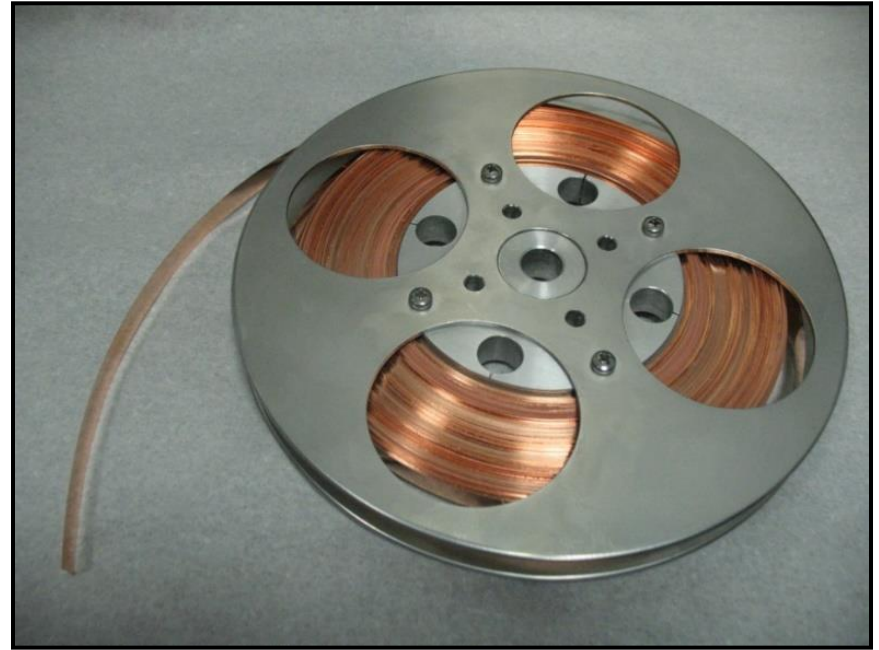
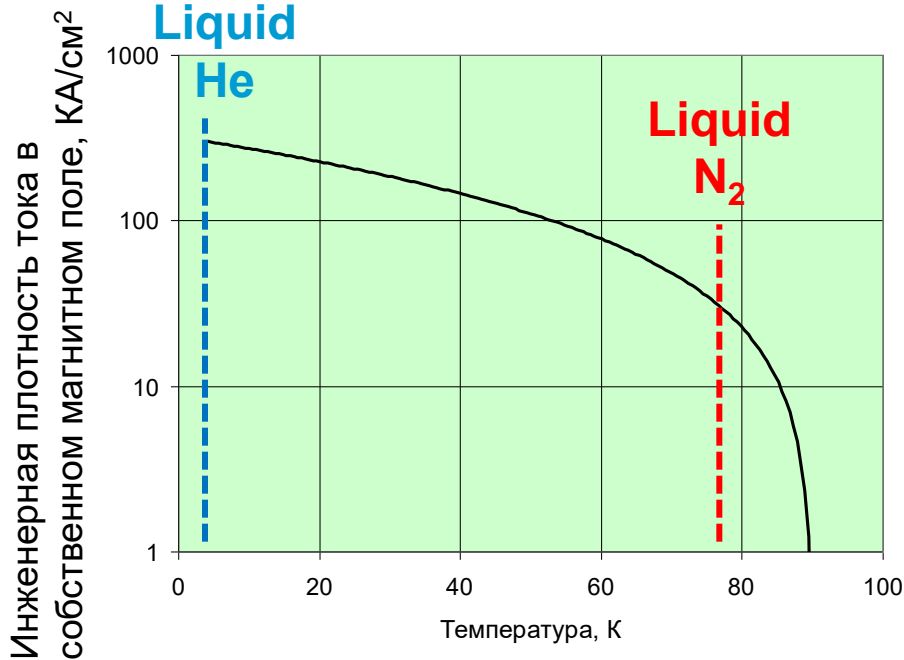
Установка импульсного лазерного нанесения слоев сверхпроводника REBCO. Используется Xe-Cl эксимерный лазер (700 мВт/импульс, 200 Гц).

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

Параметр	Значение		
Длина единичного отрезка в производстве	600+ м		
Толщина подложки	60 или 100 мкм		
Толщина слоя серебра	1–10 мкм		
Толщина слоя меди	0–100 мкм на сторону		
Прочность на растяжение (с сохранением 95% критического тока)	500 МПа / деформация 0,4%		
Ширина ленты	4 мм	6 мм	12 мм
Критический ток (77 К, с.п.)	100–150 А	150–300 А	300–500 А
Однородность тока	± 10%	± 10%	± 10%



СуперОкс: ВТСП-провод российского производства



Стандартная продукция :

Ширина, мм

12

4

Толщина, мм

0.1

0.1

Толщина слоя ВТСП, мкм

1.5

1.5

Защитный слой

Cu,Ag

Cu,Ag

Критический ток при 77K, A

~ 600

130-160

Критический ток при 4.2K, A

~ 3000

~ 1000

Применения сверхпроводников: ВТСП-кабели, охлаждаемые жидким азотом.

Pirelli/EPRI 1997
115кВ/400МВА/50м

Southwire 1998
12,4кВ/27МВА/30м

AMSC/Nexans 2003
138кВ/600МВА/610м

AMSC/ConEd 2007
20кВ/50МВА/30м

Ultera 2003
13,8кВ/69МВА/200м

SuperF
345кВ/

НКТ Дания 1998
30кВ/104МВА/30м

Super 3C 2004
10кВ/17МВА/30м

ВНИИКТ Россия 2005
20кВ/50МВА/30м

ВНИИКТ Россия 2007
20кВ/50МВА/200м

Furukawa Япония 2002

США

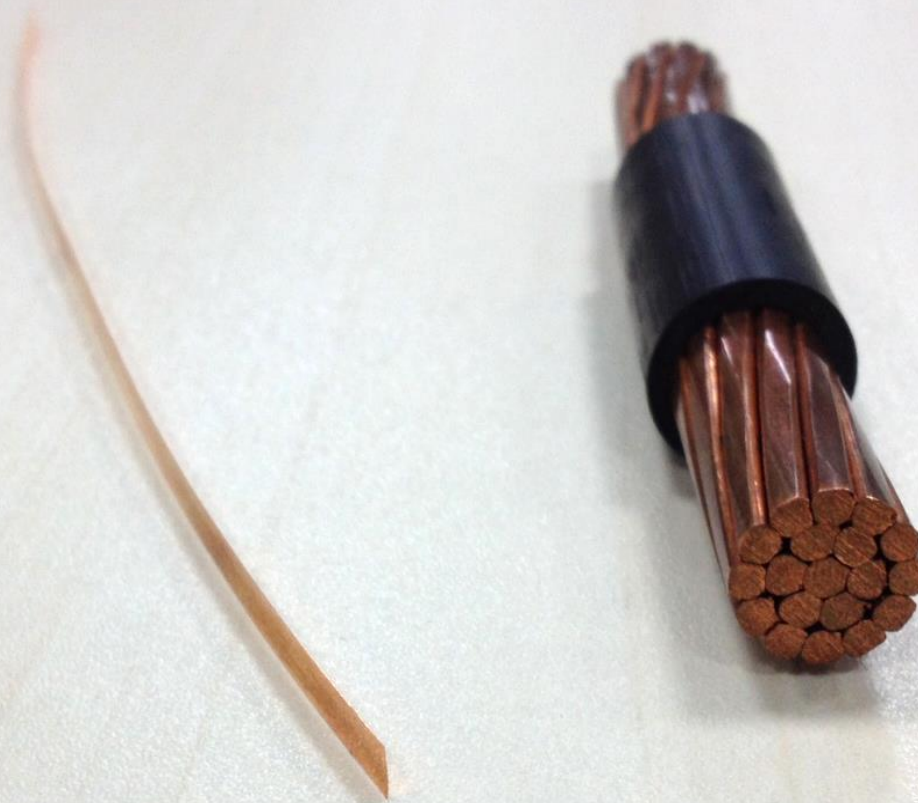
Япония

Россия



Пилотные проекты показывают возможность успешного использования ВТСП-линий для передачи переменного тока большой мощности.

ВТСП-кабели позволяют передавать высокую мощность при относительно малом сечении, что особенно важно в условиях современных мегаполисов. Подземный высоковольтный ВТСП-кабель способен заменить воздушные ЛЭП.



ВТСП-лента второго поколения (YBCO) и медный кабель с
равной токонесущей способностью, 200 А

Перспектива 2050 г: Проект полностью электрического пассажирского самолета VoltAir (Airbus), использующего литий-воздушные батареи, генератор, моторы и кабельную разводку на ВТСП – материалах 2-го поколения.



Полностью электрический
самолет Airbus E-fan.
Первый полет состоялся в
июле 2014 года.

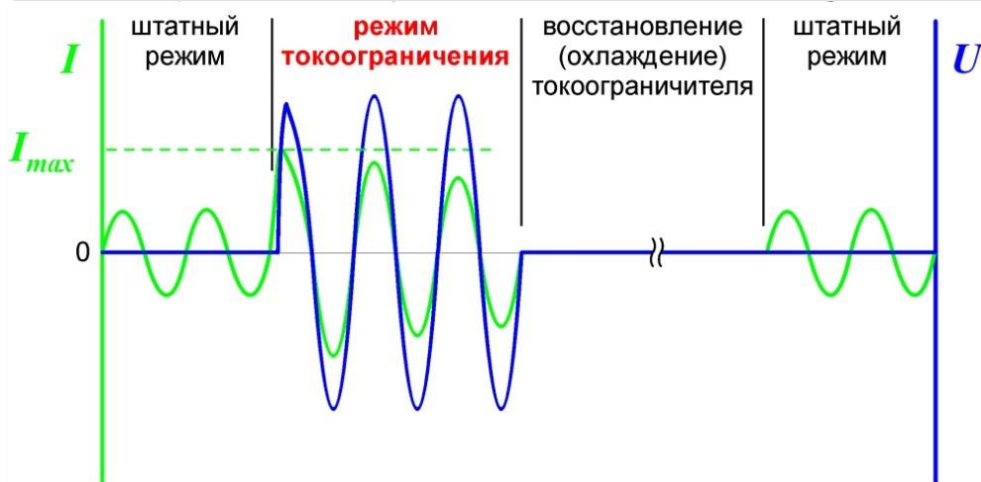




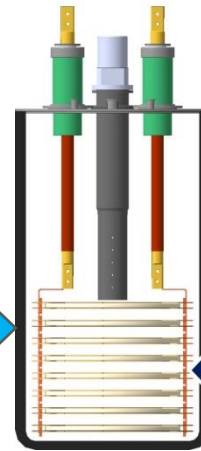
Гондола с ВТСП-ветрогенератором мощностью 3,6 МВт (EcoSwing, Дания, 2018). Применение сверхпроводящего ротора позволило на 40% снизить массу по сравнению с традиционным исполнением генератора равной мощности.

Сверхпроводниковый ограничитель тока

- При стандартной нагрузке СОТ никак не влияет на работу сети
- При превышении критического значения тока у СОТ практически мгновенно (~ 0.001 с) появляется собственный импеданс и происходит ограничение тока на проектном значении.
- После размыкания сети происходит автоматическое восстановление ограничителя (время восстановления < 1 с)



Охлаждение
жидким азотом



Сборка
ВТСП-модулей

Характеристики сверхпроводникового ограничителя тока

Изготовитель «СуперОкс». Установлен в Москве на подстанции «Мневники» в июне 2019 г.



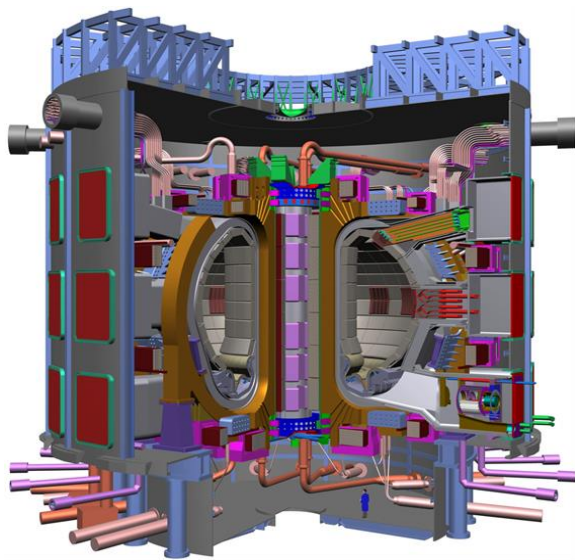
- Малое время срабатывания (миллисекунды)
- способность самовосстанавливаться за короткое время (200 мсек)
- ограничение тока на уровне 2,5 кА
- полное отключение цепи не происходит
- новейшая технология

Национальный проект Министерства энергетики РФ.
Рекордный по мощности токоограничитель в мире: 220 кВ /1200 А
Виден со спутника на картах Google: 55°45'29,4" СШ, 37°30'17,0" ВД

Сверхпроводящие магнитные системы в реакторах термоядерного синтеза

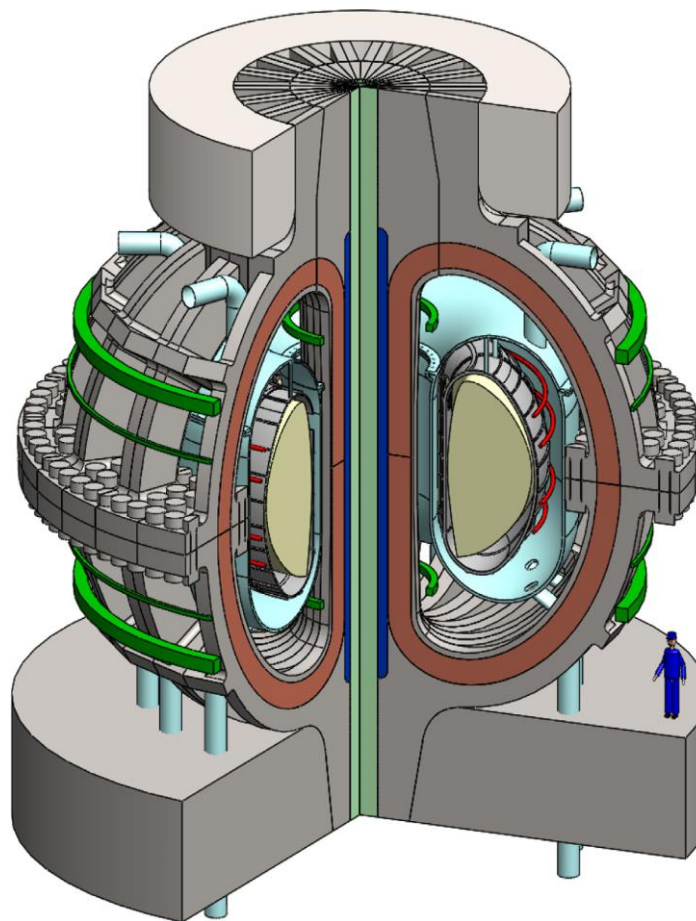
Проект **ITER**: @ 4 К, @ 8 Т

Nb₃Sn



Проект «**2020**»: @ 20 К, @ 20 Т

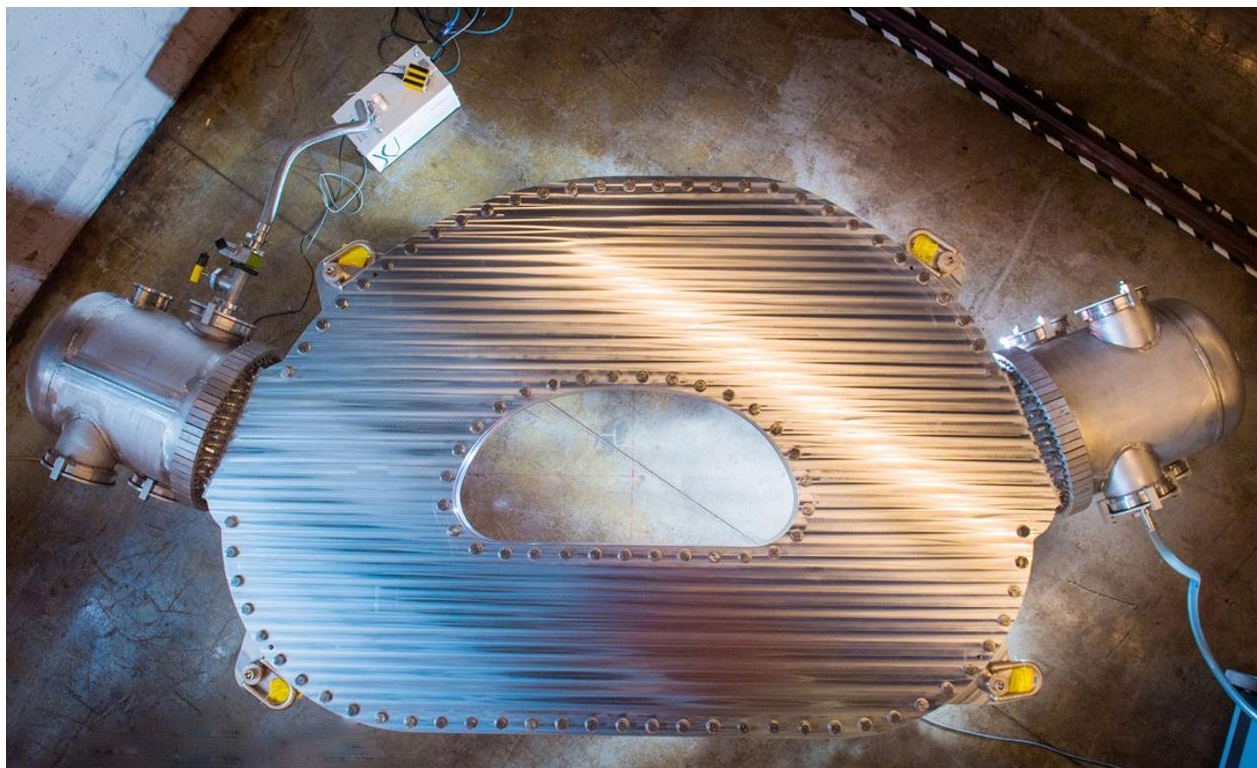
Управляемая термоядерная реакция:



Магниты из
лент 2-го
поколения на
основе
YBaCuO.

Доступность, надежность, компактность.

2022 г: Сверхпроводящий магнит для термоядерного реактора: 21,5 Тл при 20 К.



Рекордный магнит изготовлен из ВТСП-ленты на основе сверхпроводника
 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

МАГЛЕВ: ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ НА МАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ



Япония: левитирующий поезд с использованием сверхпроводящих магнитов;
максимальная скорость 581 км/ч.

Супергидриды РЗЭ, образующиеся при высоких давлениях – потенциальные сверхпроводники с $T_c > 25^\circ\text{C}$ (!!!)

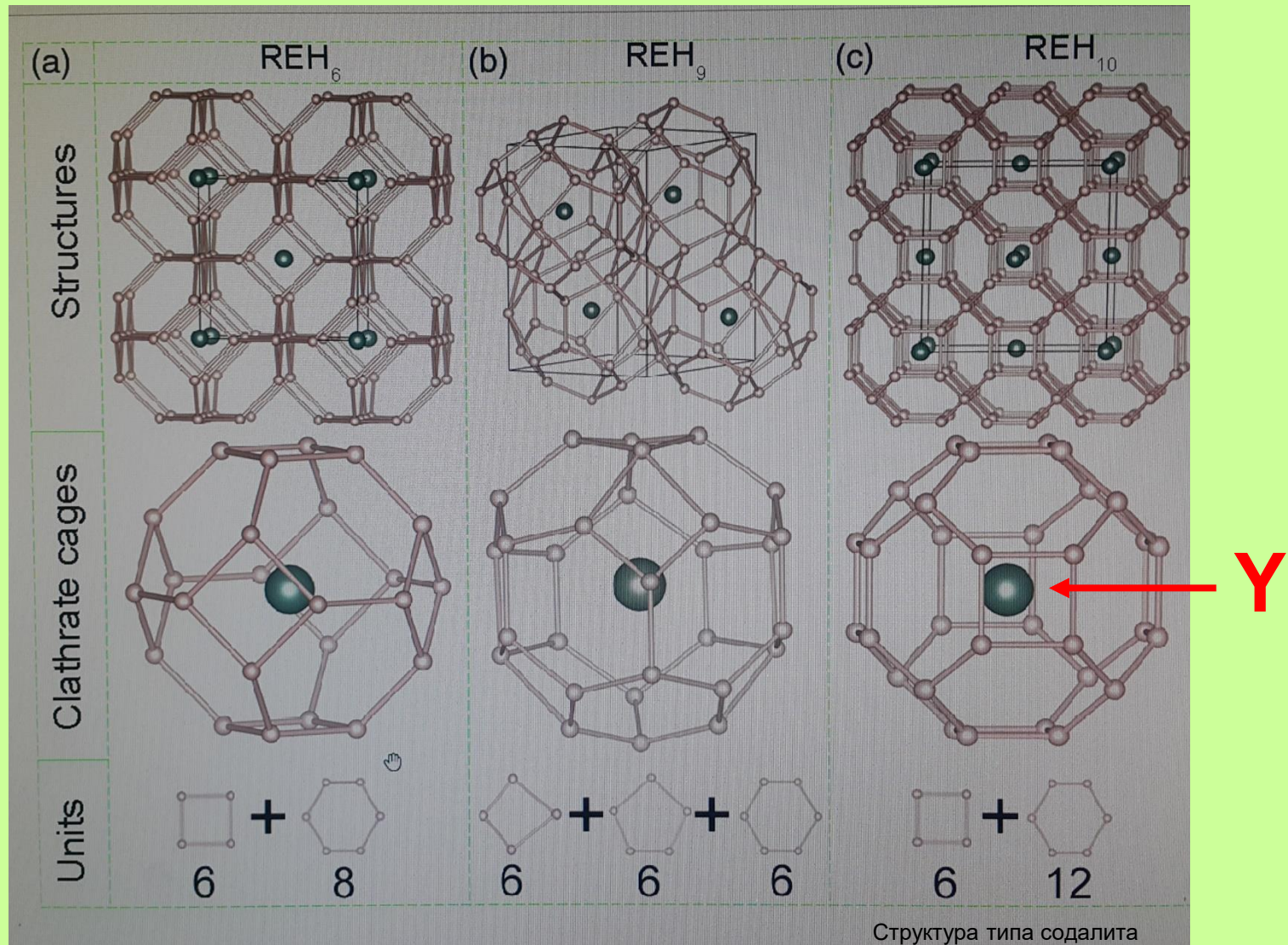
Теоретические
предсказания:

YH_{10}

$T_c = 303 \text{ K}$

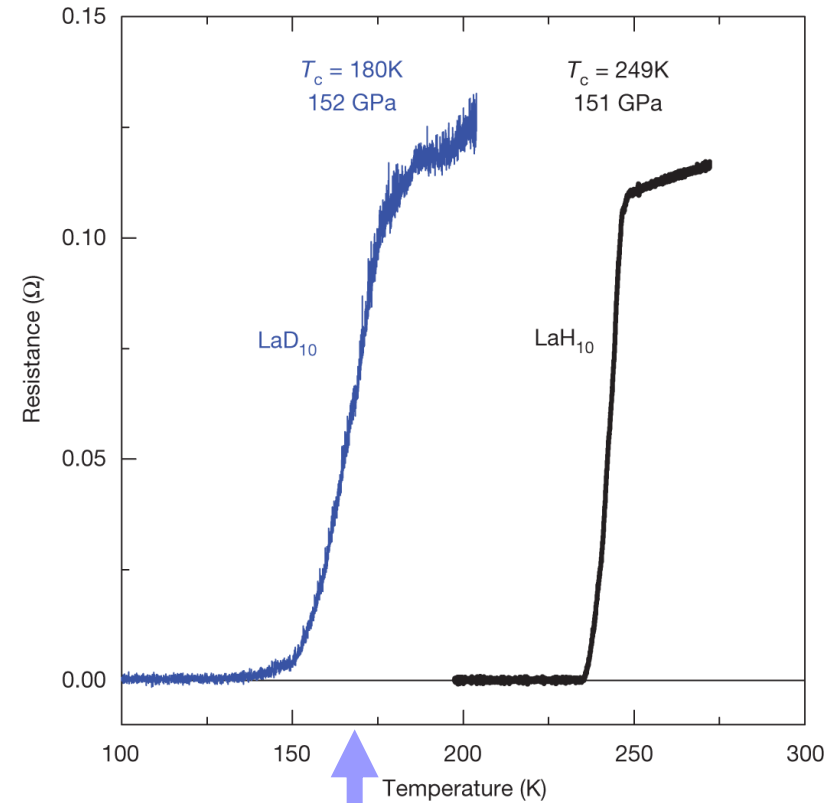
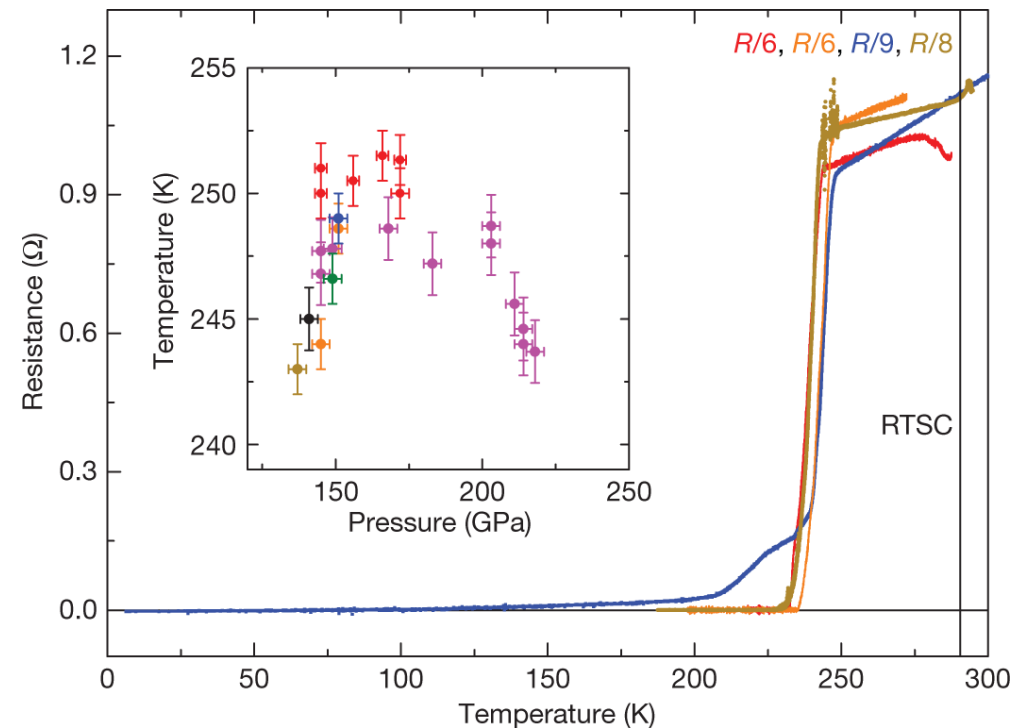
при
400 ГПа
(4 млн атм)

?



Экспериментальные доказательства сверхпроводимости в LaH_{10} под высоким давлением.

T_c 250 К при 152 ГПа



Наблюдается изотопный эффект, предсказываемый теорией БКШ.

Спасибо за внимание!



Коллектив компании СуперОкс – выпускники химического факультета и факультета наук о материалах.