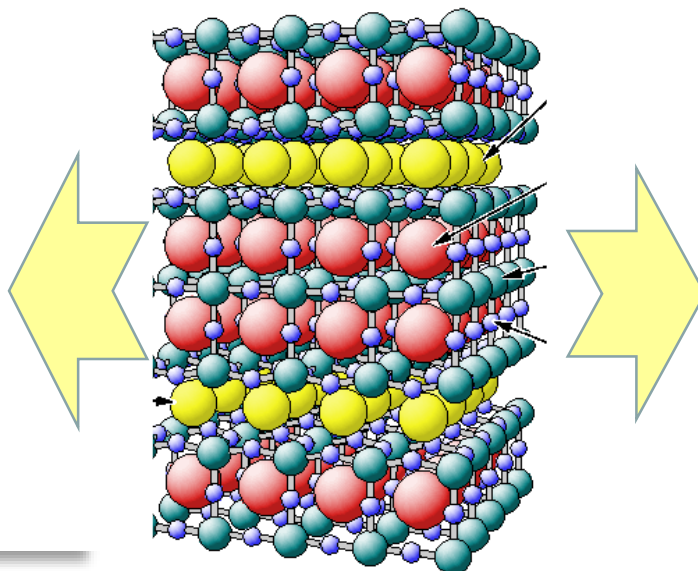
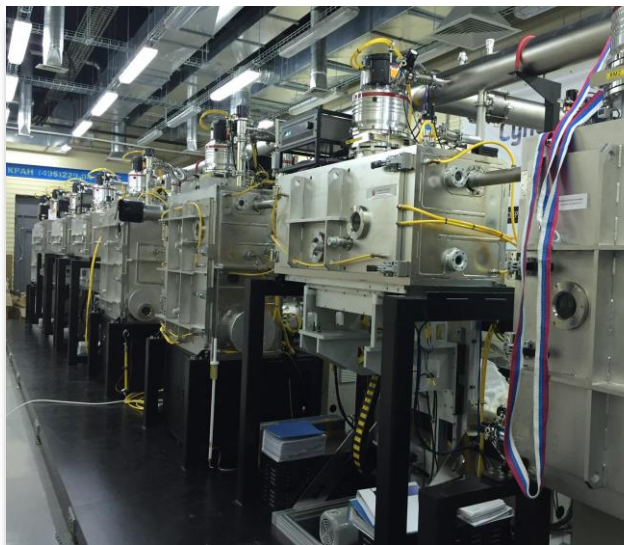


Новые материалы: от научной работы студентов к промышленному производству

Кауль

Андрей Рафаилович

Профессор кафедры неорганической химии
химического факультета





Педагогика

Научная
работа со
студентами и
аспирантами

Наука



Академик Ю.Д.Третьяков (1931-2012)

Основатель факультета наук о материалах.

Педагогика

Научная
работа со
студентами и
аспирантами

Наука

Химический факультет:

Специалитет (6 лет);
Магистратура

Курсовые работы по:

- неорганической химии
- аналитической химии
- органической химии
- физической химии

часто выполняются в научных лабораториях факультета.

Специализация по кафедре
с 7-го семестра (4-5-6 курс).

Выполнение дипломной работы
в течение 2-х семестров.

Аспирантура

Факультет наук о материалах:

Бакалавриат (4 года);
Магистратура

*Работа в научных лабораториях
ХФ, др. фак-тов МГУ, институтов
РАН предусмотрена учебным
планом, начиная с 1-го семестра.*

*Каждый семестр заканчивается
научной сессией (отчет по НИР).*

Ранняя специализация.

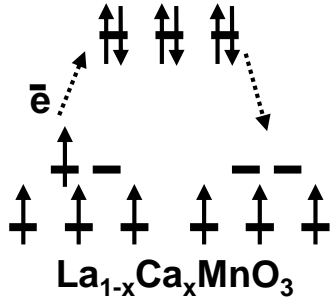
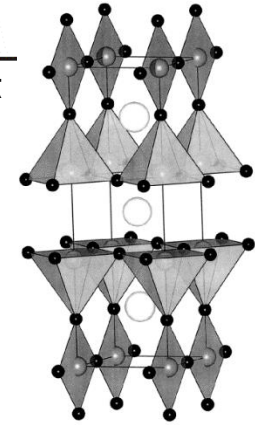
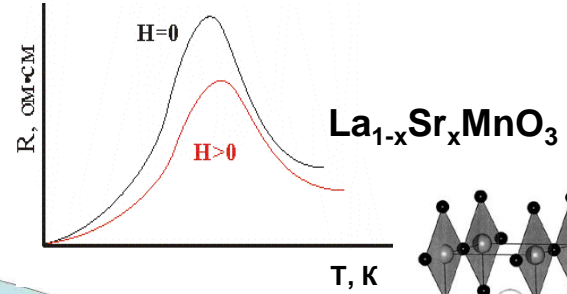
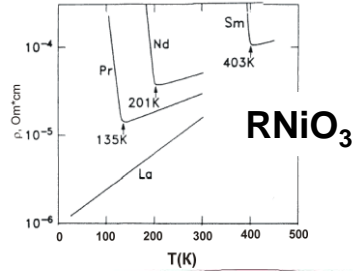
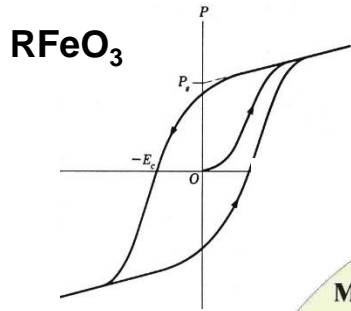
Диплом бакалавра фактически
выполняется около 4-х семестров.

Аспирантура

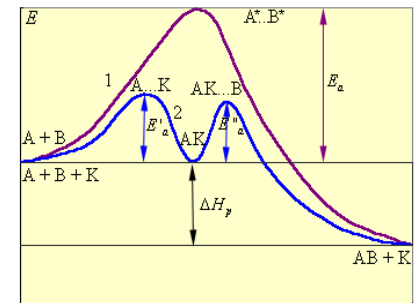
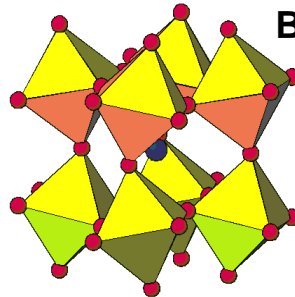
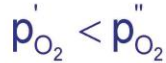
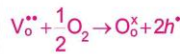
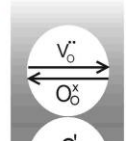
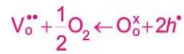
Лаборатория химии координационных соединений



Функциональные оксидные материалы



мембрана



Координата реакции

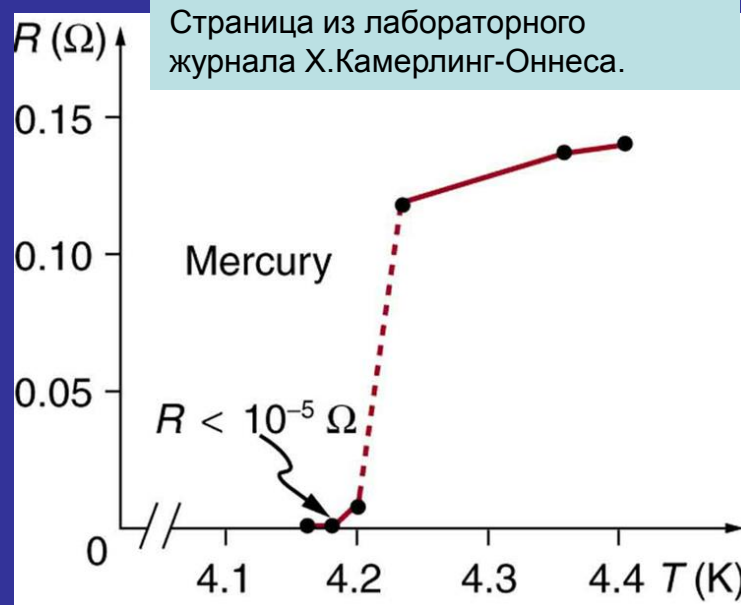


Явление сверхпроводимости открыто в 1911 г. в Университете Лейдена голландским ученым **Х.Камерлинг-Оннесом**

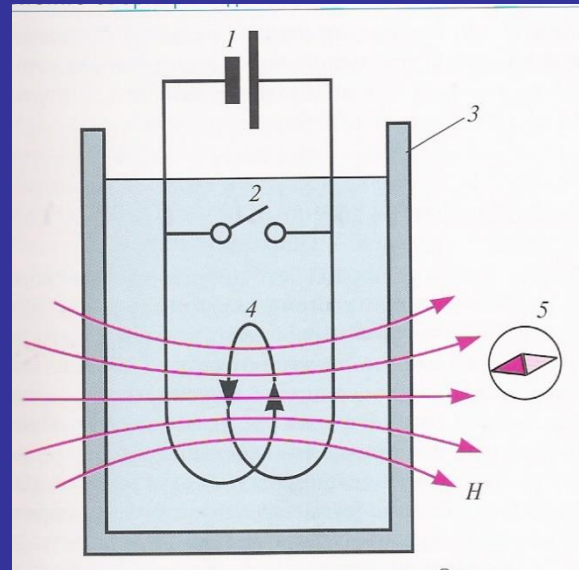


Heike Kamerlingh Onnes
1853 -1926

Нобелевский лауреат
1913 г.

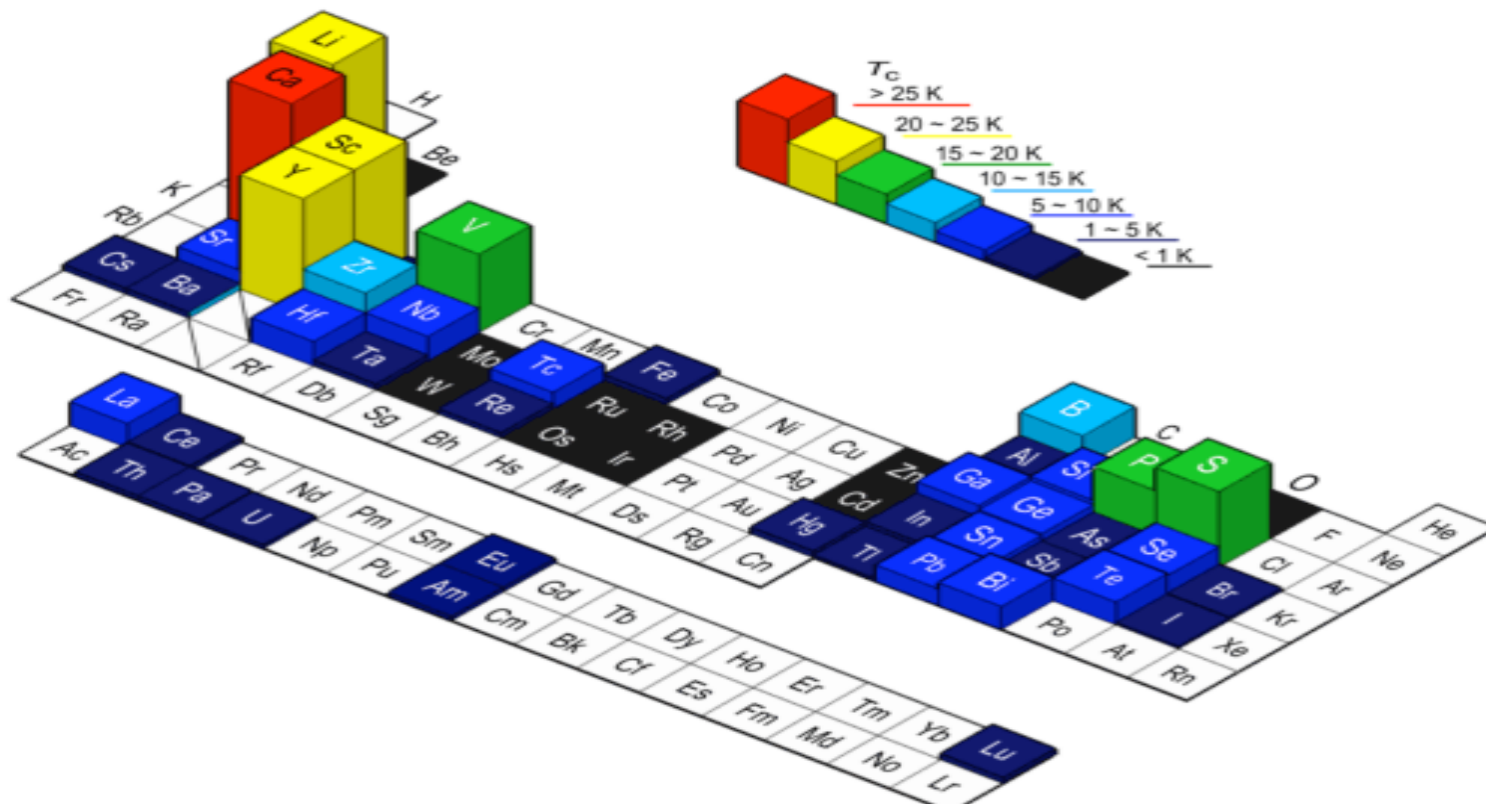
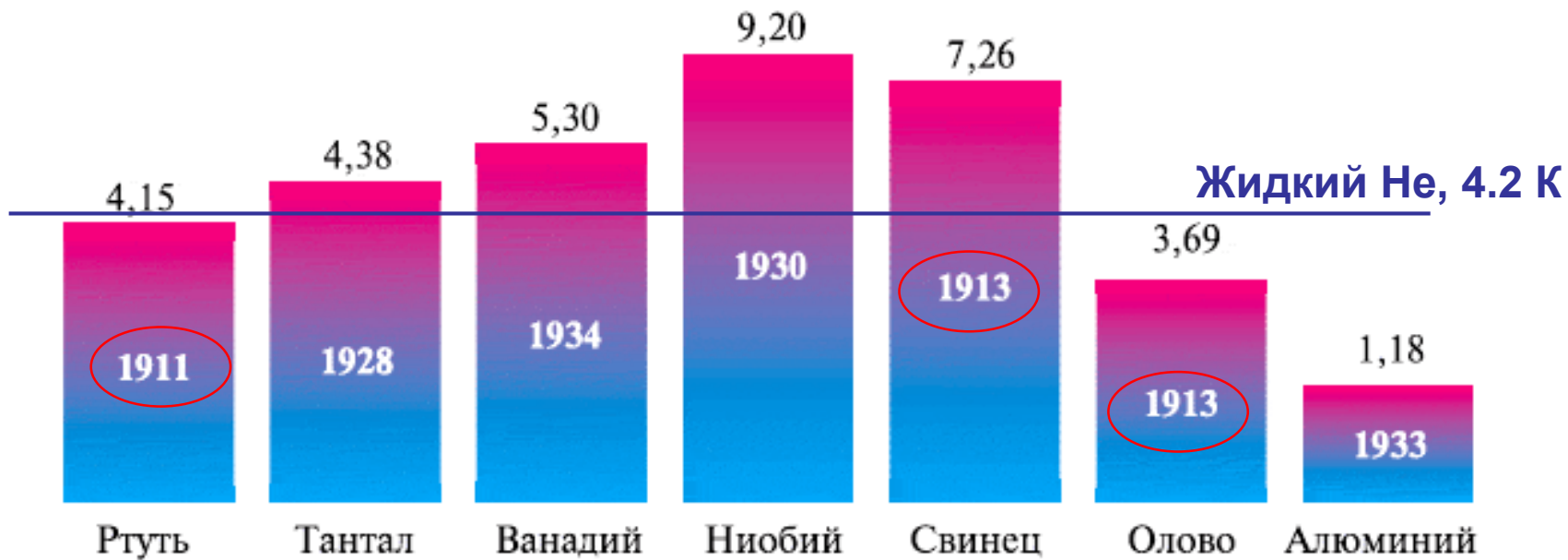


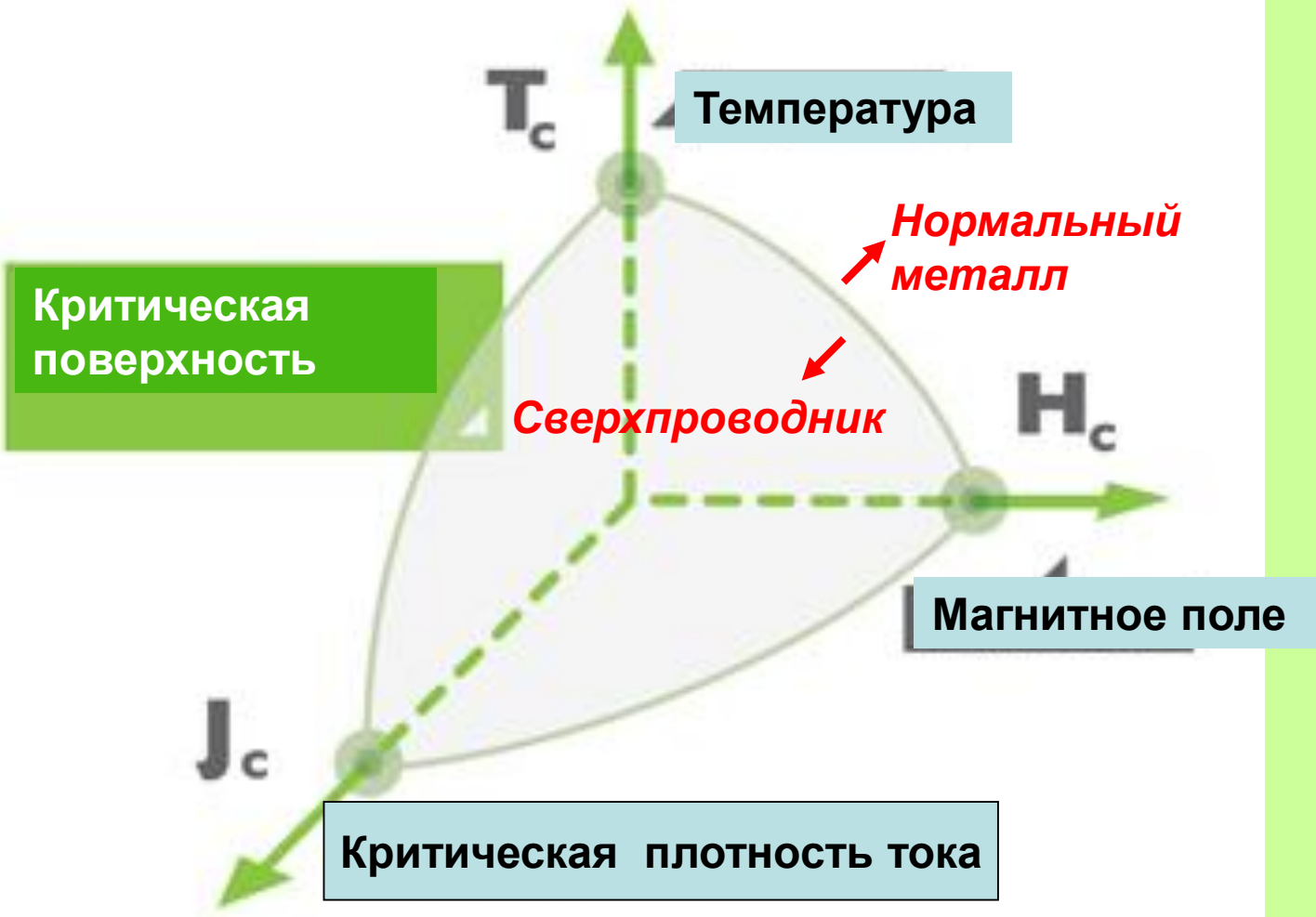
**Сопротивление
высокоочищенной
ртути
становится
неизмеримо
малым при $T < 4,2 \text{ K}$ ($T_{\text{кип}} \text{ He}$)**

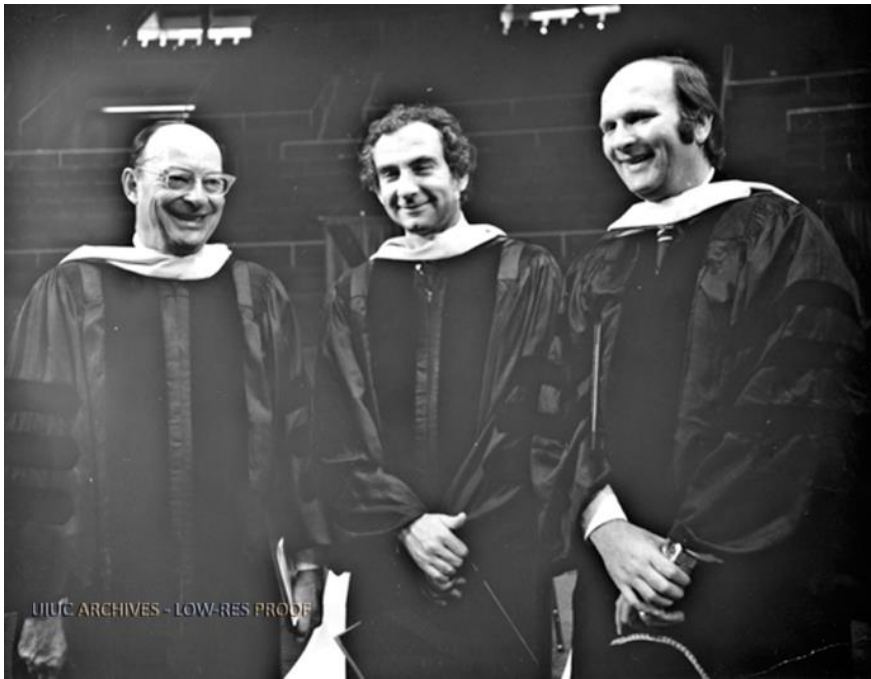


Ток, возбужденный в замкнутом сверхпроводящем контуре, циркулирует, не затухая (persistent current). Это доказывает, что **электрическое сопротивление в контуре = 0.**

Критические температуры элементарных сверхпроводников







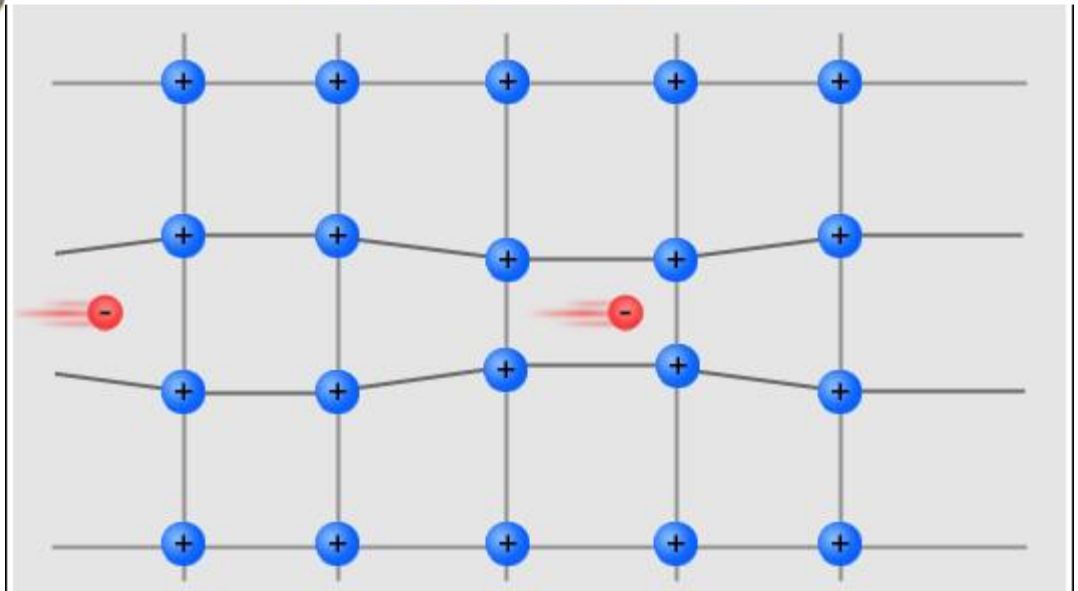
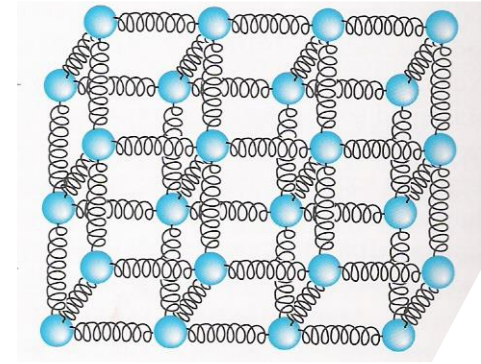
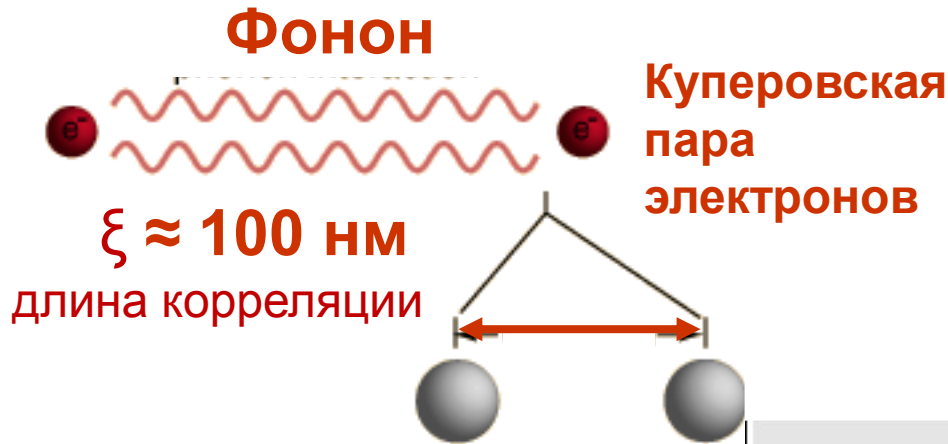
**John Bardeen,
Leon Cooper
Robert Schrieffer**

«БКШ-терия»

Куперовские пары электронов с участием фононов образуют квантовый «конденсат».

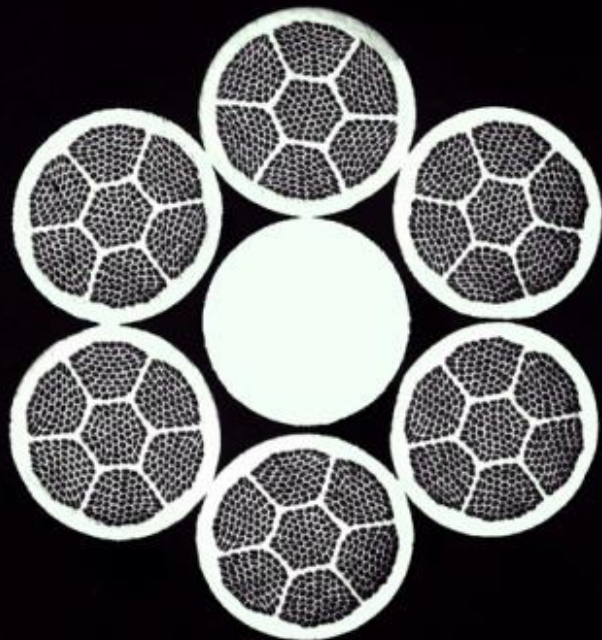
**Нобелевская премия по физике 1972 г
«За создание теории сверхпроводимости»**

Образование Куперовских пар электронов. Электрон – фононное взаимодействие.



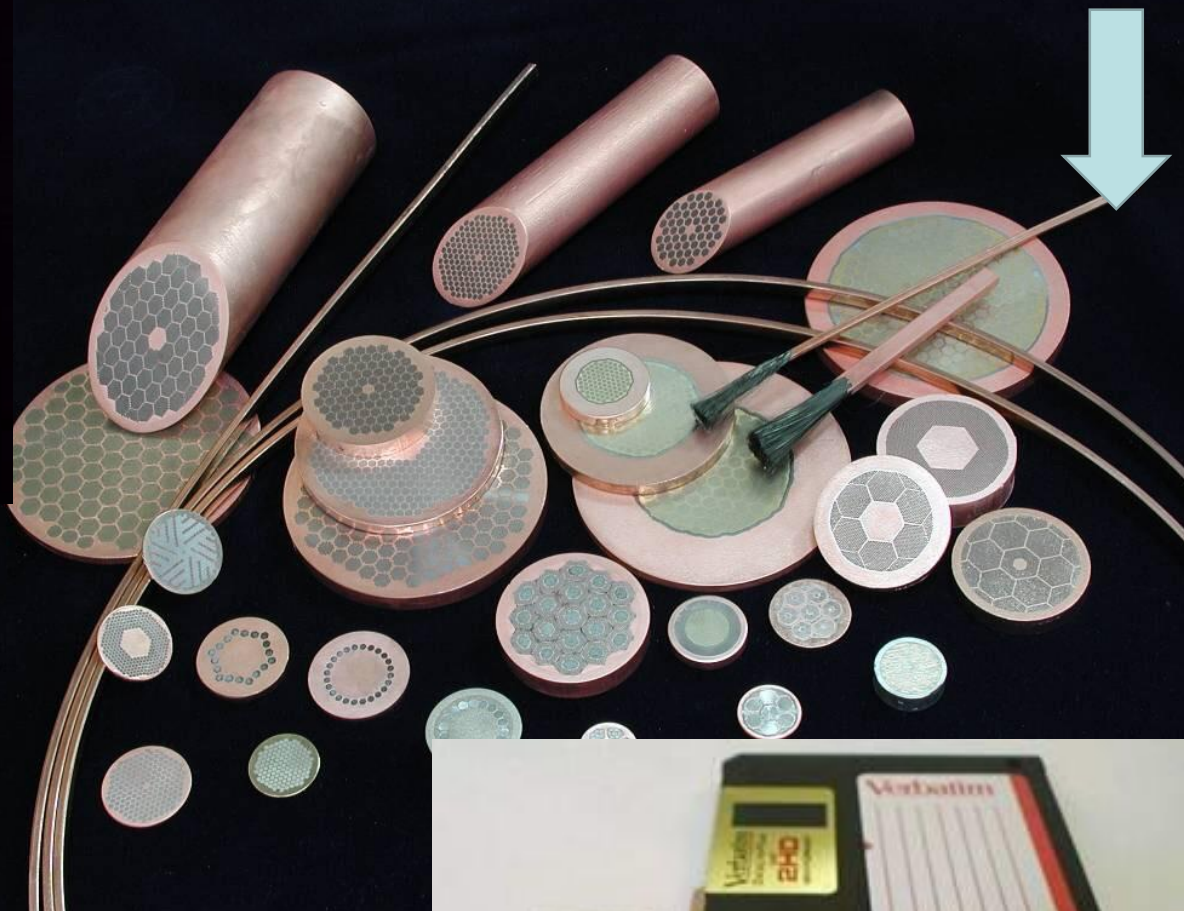
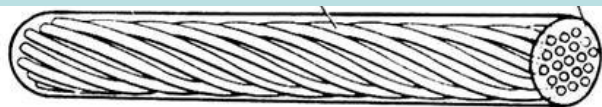
Взаимодействие электронов с колебаниями решетки

Разновидности промышленно производимых сверхпроводящих кабелей с единичными жилами NbTi и Nb₃Sn



Сечение сверхпроводящего кабеля

Транспонированный сверхпроводящий кабель





Открытие высокотемпературной сверхпроводимости

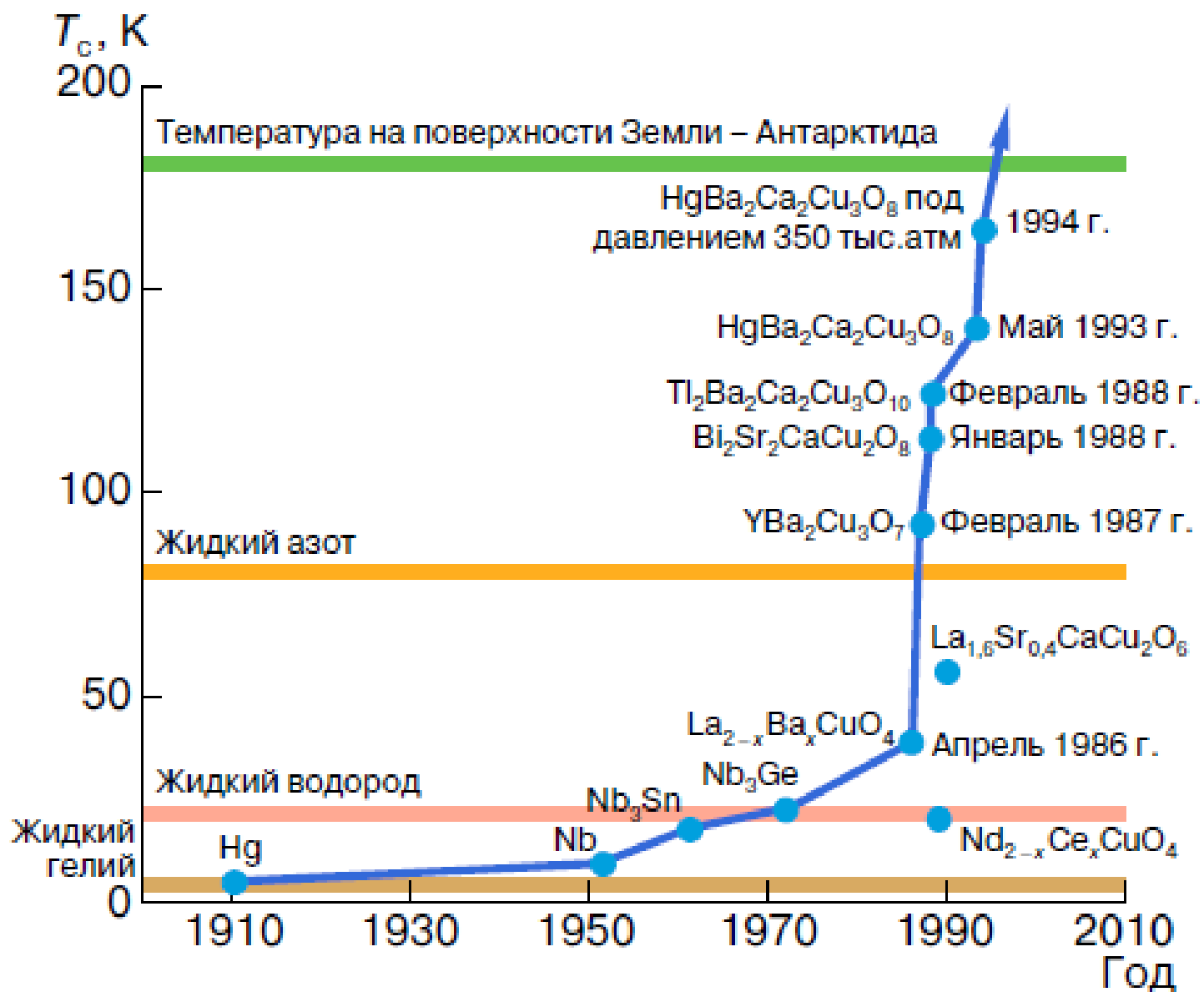
Alex Müller

Georg Bednorz

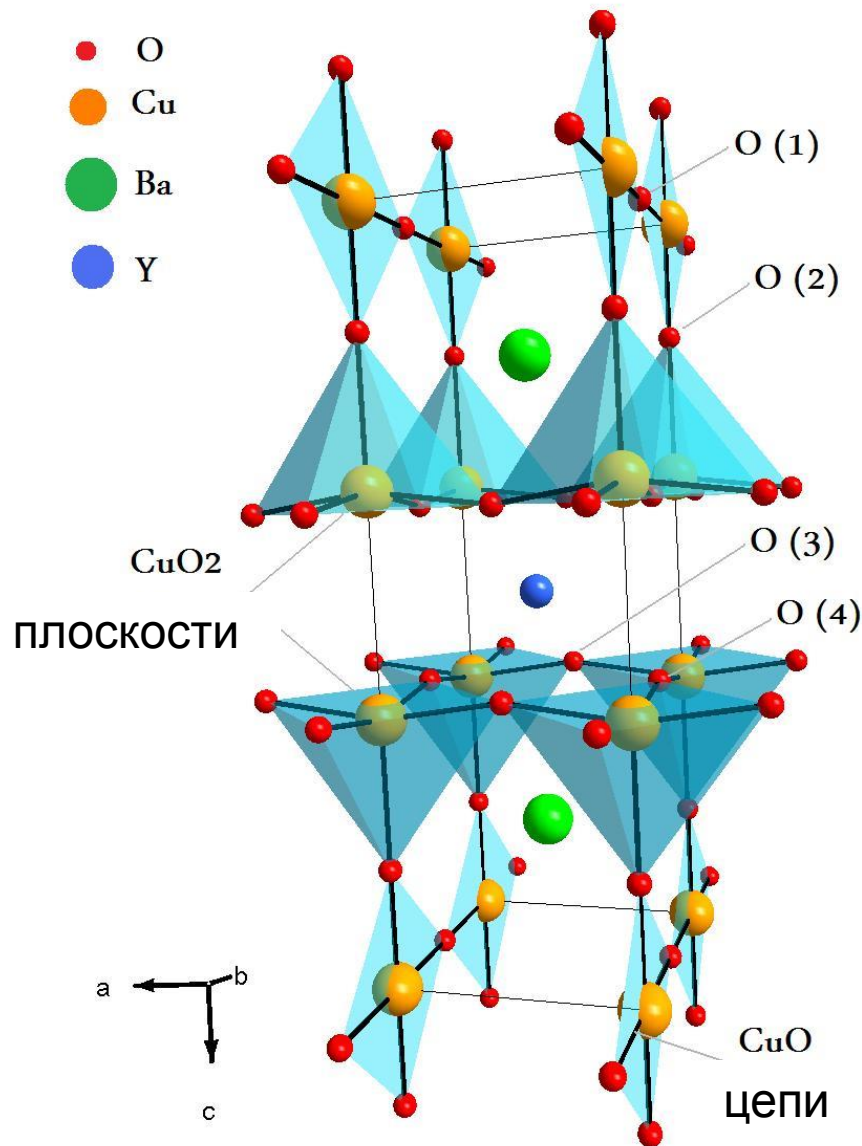
1986



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



Кристаллическая структура сверхпроводников редкоземельного семейства $\text{R}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (R123, RBCO, YBaCuO)



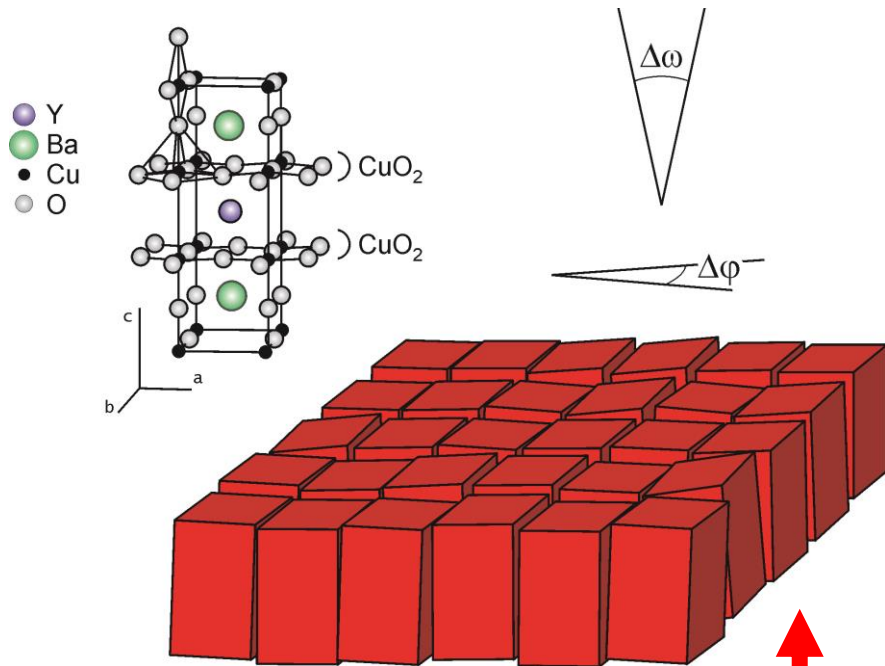
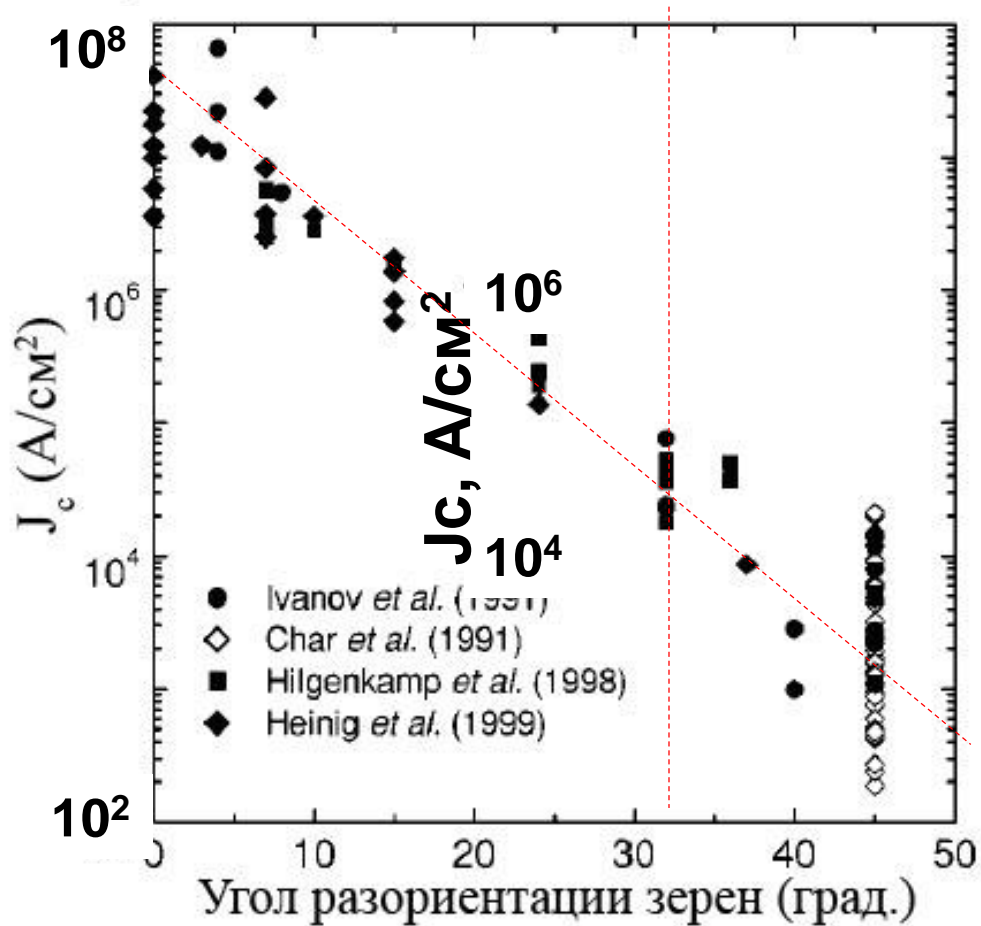
Кристаллическая анизотропия R123 приводит к анизотропии сверхпроводящих свойств:

Длина когерентности пар носителей заряда:

$$\xi_{ab} \approx 20 \text{ \AA}$$

$$\xi_c \approx 4 \text{ \AA}$$

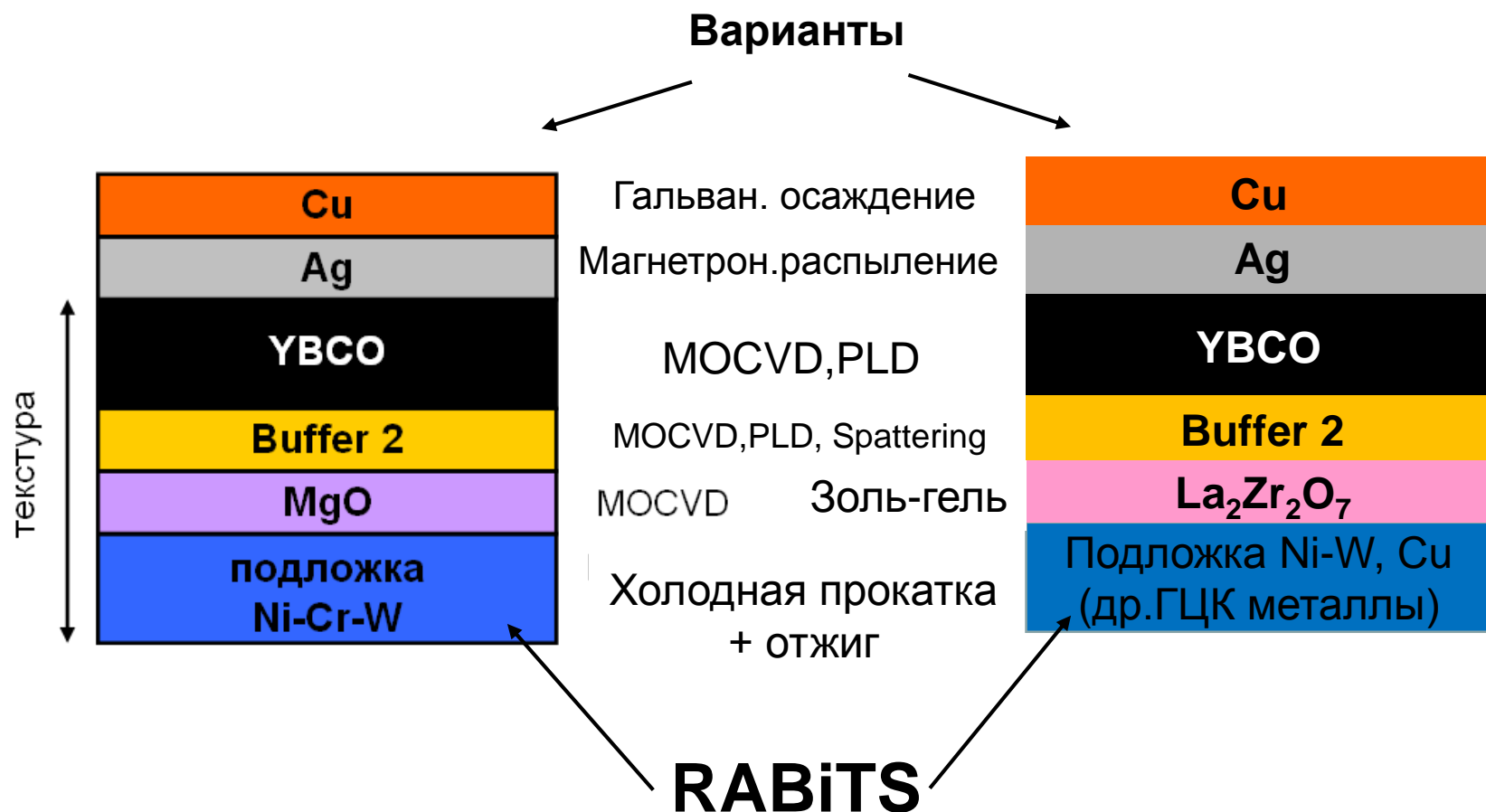
Анизотропия $YBCuO_8$ – причина резкой зависимости плотности критического тока j_c от угла разориентации соседних зерен



Для достижения высокой величины j_c необходимо достичь высокой степени соориентированности зерен в ВТСП-материале.

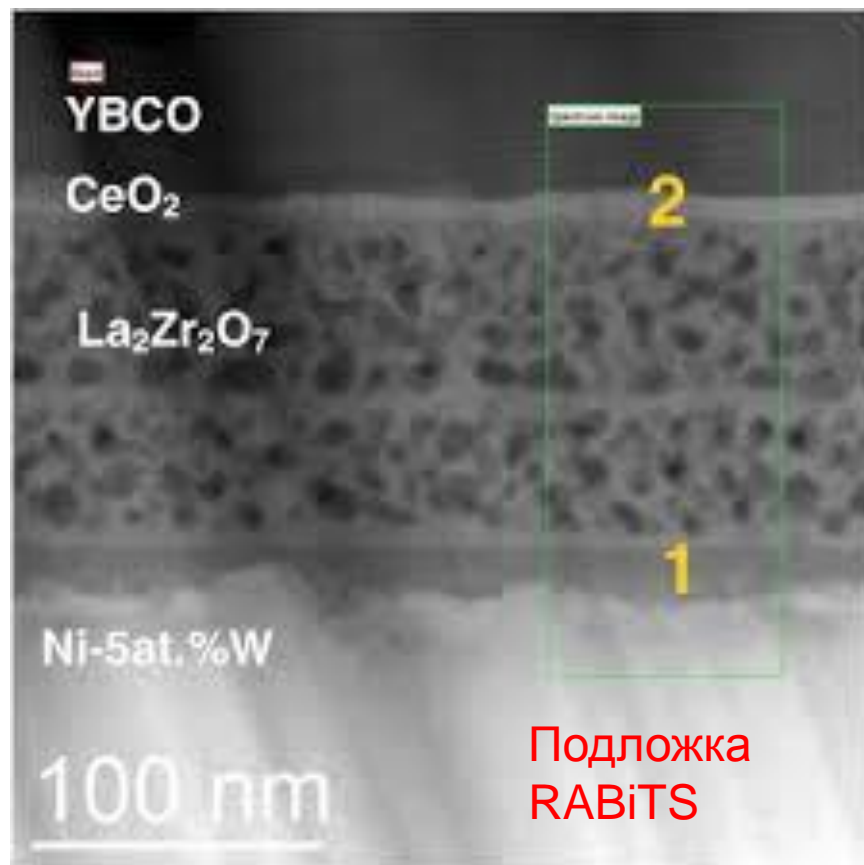
ВТСП-ленты 2-го поколения: технология RABiTS

RABiTS: Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate (Подложки с двухосевой текстурой, полученные с помощью прокатки).

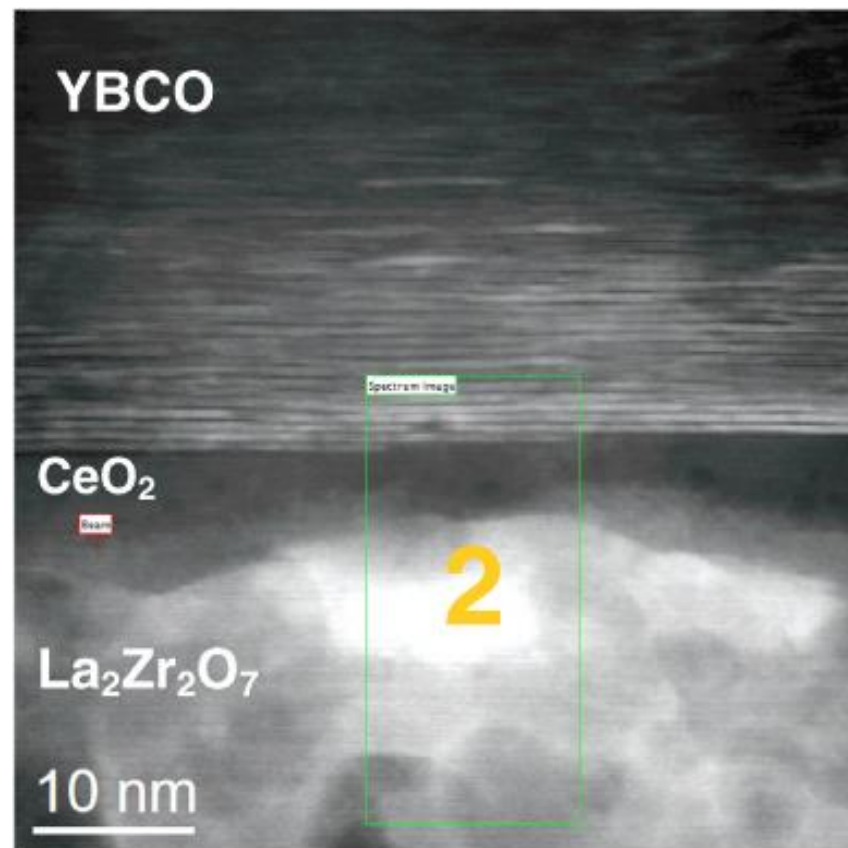


Гетероструктуры YBCO/CeO₂/La₂Zr₂O₇/Ni-W, полученные по технологии RABiTS (просвечивающая электронная микроскопия)

La₂Zr₂O₇ получен методом золь-гель из р-ра пропионатов

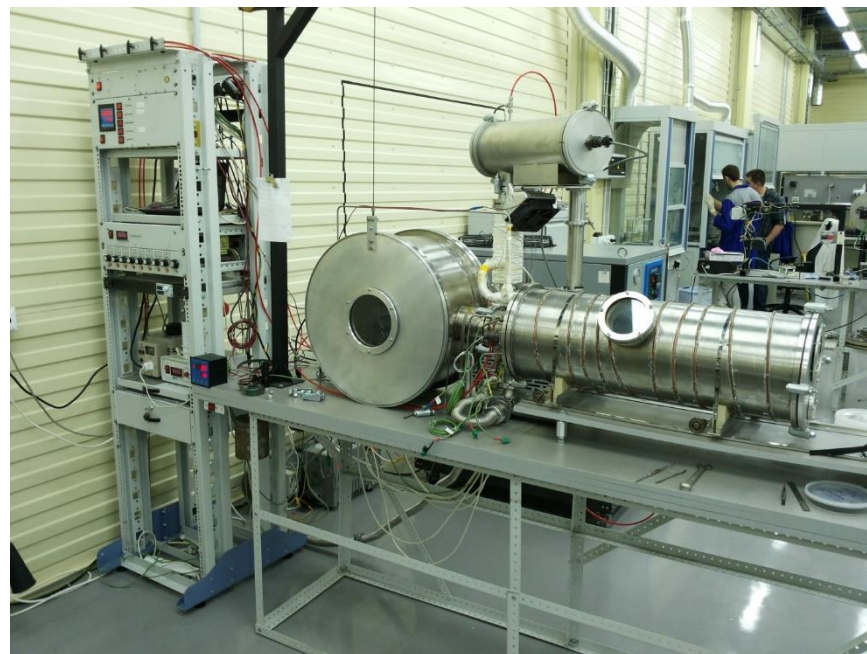
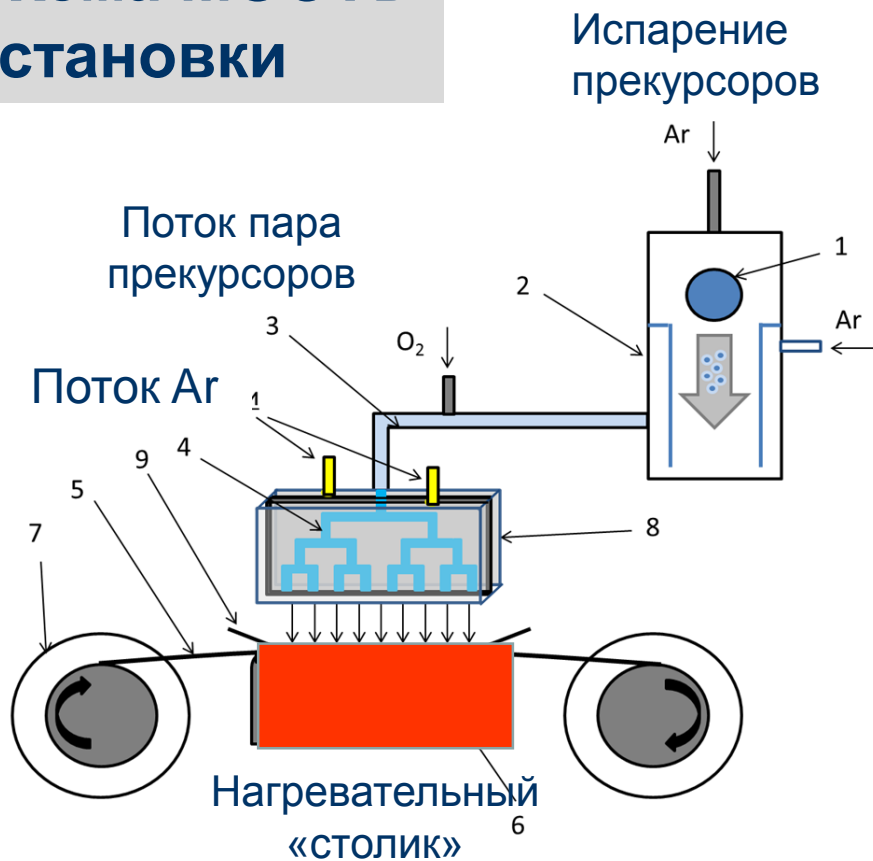


CeO₂ и YBaCuO получены методом MOCVD из бета-дикетонатов



Нанесение буферных слоев и слоя ВТСП на металлические ленты методом МOCVD в режиме лентопротяжки

Схема МOCVD установки



2006 г. : Организация инновационной компании ЗАО «СуперОкс» с целью перехода к промышленному производству новых электротехнических материалов на основе высокотемпературных сверхпроводников.

В компании работает 18 выпускников химического факультета и факультета наук о материалах МГУ.

www.superox.ru

в Москве
65 сотр., 2500 м²



СуперОкс: производство ВТСП-проводов второго поколения

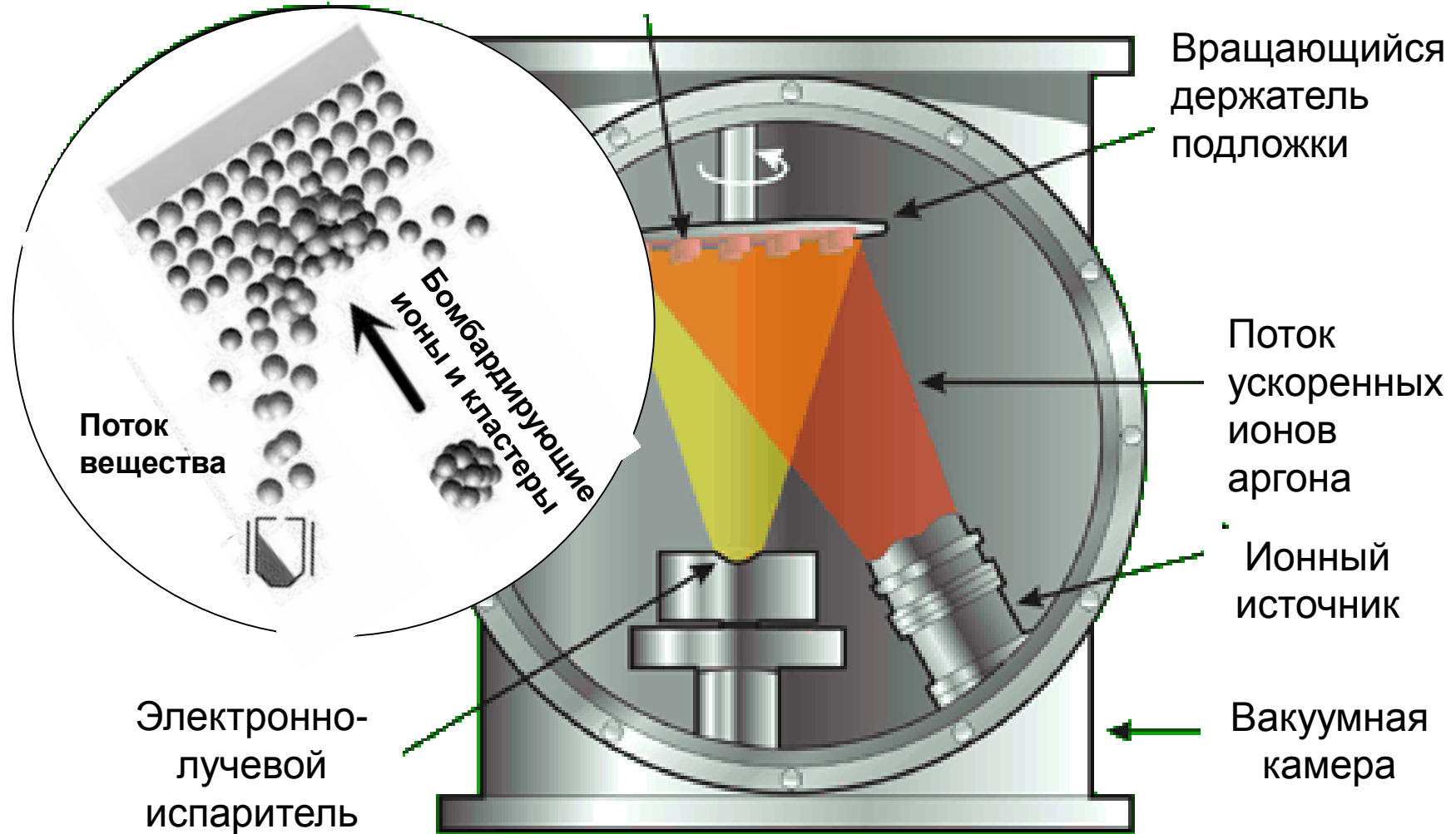
- Электрополирование металлической подложки
- Напыление аморфного буферного слоя Al_2O_3
- Напыление аморфного буферного слоя Y_2O_3
- IBAD-напыление зародышевого слоя MgO
- Эпитаксиальный рост слоя MgO
- Эпитаксиальный рост слоя $LaMnO_3$
- Лазерное напыление ВТСП-слоя $RBa_2Cu_3O_{7-\delta}$
- Напыление слоя серебра (магнетрон)
- Окислительный отжиг
- Продольная резка
- Гальваническое нанесение слоя меди
- Нанесение полимерной криоизоляции
- Измерения критического тока
- Лужение
- Ламинирование

- Напыление ВТСП-слоя (PLD)
- Напыление слоя серебра
- Измерения критического тока



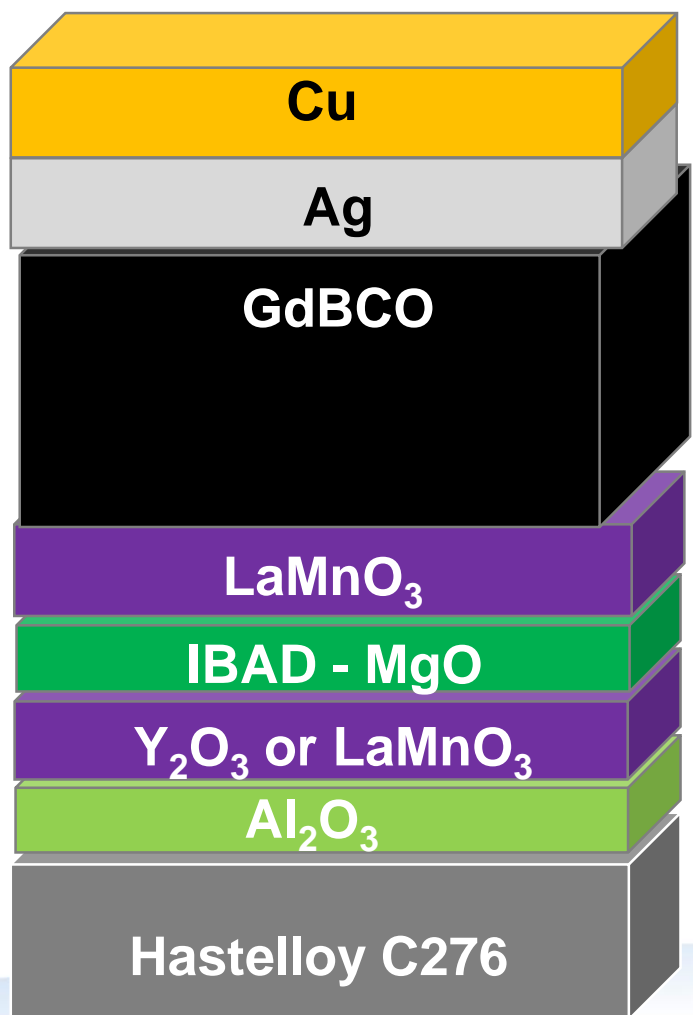
в Токио
10 сотр., 220 м²

Принцип IBAD (Ion Beam Assisted Deposition)



На нетекстурированную (поликристаллическую) ленту методом IBAD наносят оксиды MgO , $ZrO_2(Y_2O_3)$ или TiN с острой текстурой.

Архитектура 2G- ВТСП-ленты:



Гальваническое нанесение, ≈ 20 мкм
(толщина зависит от назначения)
Магнетрон, 1-4 мкм

PLD-2 (1-1,5 микрона)

Магнетрон (30-50 nm)

IBAD (5-7 nm) + homo-epi (10-50 nm)

Магнетрон (10-50 nm)

Магнетрон (50 nm)

Холоднокатанная и электрополированная
(60-100 мкм)



Линия из 8-ми последовательных вакуумных камер для получения ленты с буферными слоями по технологии IBAD.



PLD-линия с Xe-Cl лазером (700 мВт/импульс, 200 Гц) для осаждения слоя ВТСП RBCuO.

ВТСП-провод: спецификация

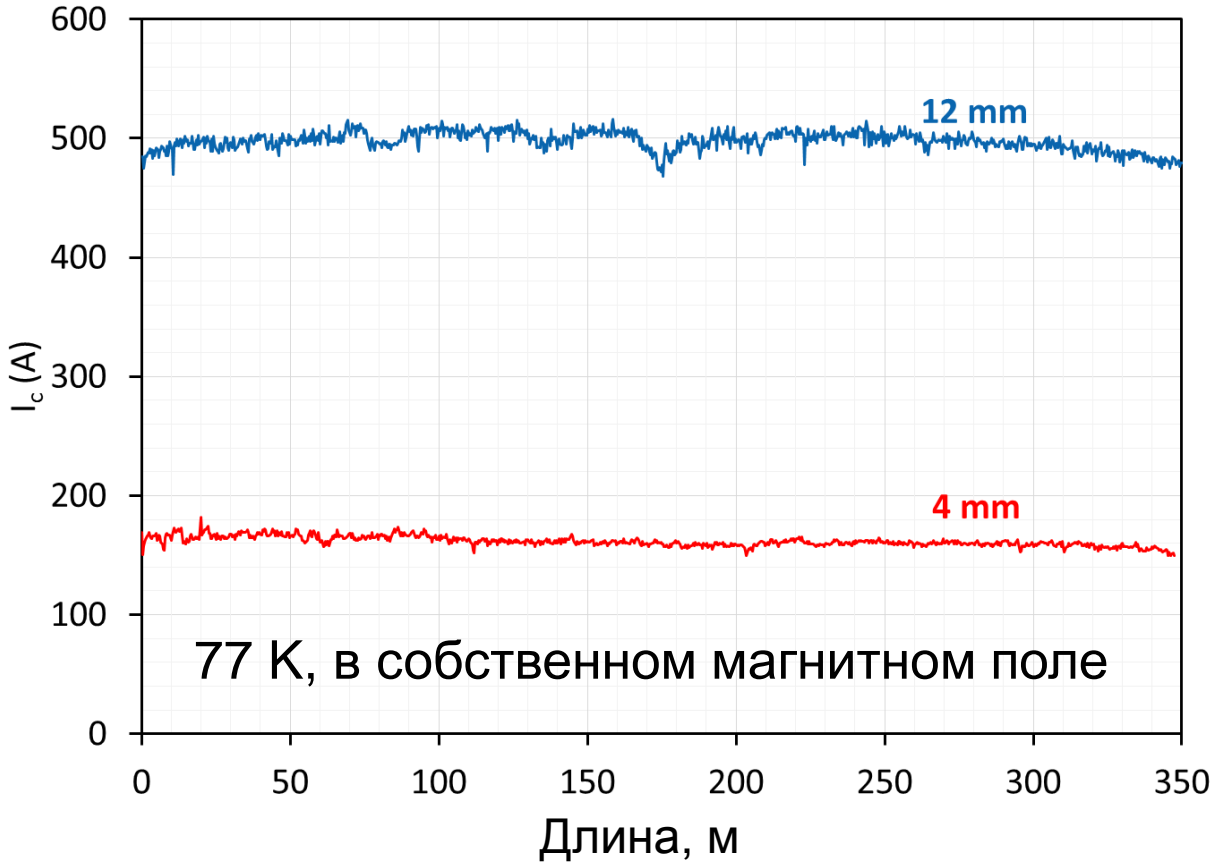
Параметр	Величина	
Длина единичного куска	До 500 метров	
Толщина подложки	60/100 мкм	
Ширина ленты	4 мм	12 мм
Критический ток @ 77К, s.f.	150-200 А	600-900 А
Плотность тока @ 4.2 К, 20 Тл	> 40 000 А/см ²	> 40 000 А/см ²
Однородность по току	±10%	±10%

Кастомизация:

- + Толщина Ag-слоя по заказу
- + Толщина Cu-слоя по заказу
- + Лужение
- + Ламинирование
- + Изоляция
- + Низкоомные соединения лент
- + ... по заказу

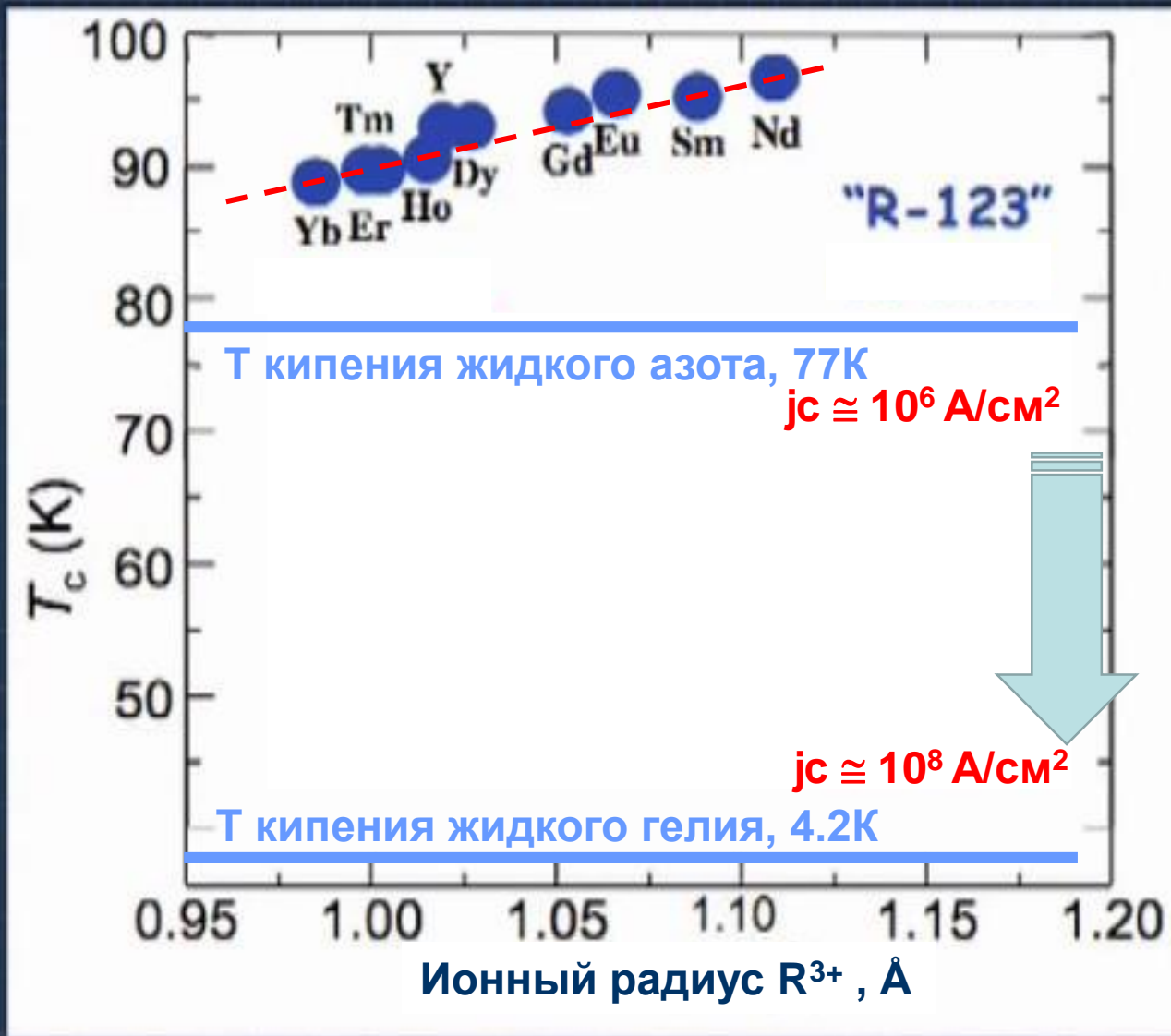
ВТСП-провод: однородность критического тока по длине SuperOx&MSU

Ширина 12 мм : 500 А x 350 м = =175 кАм



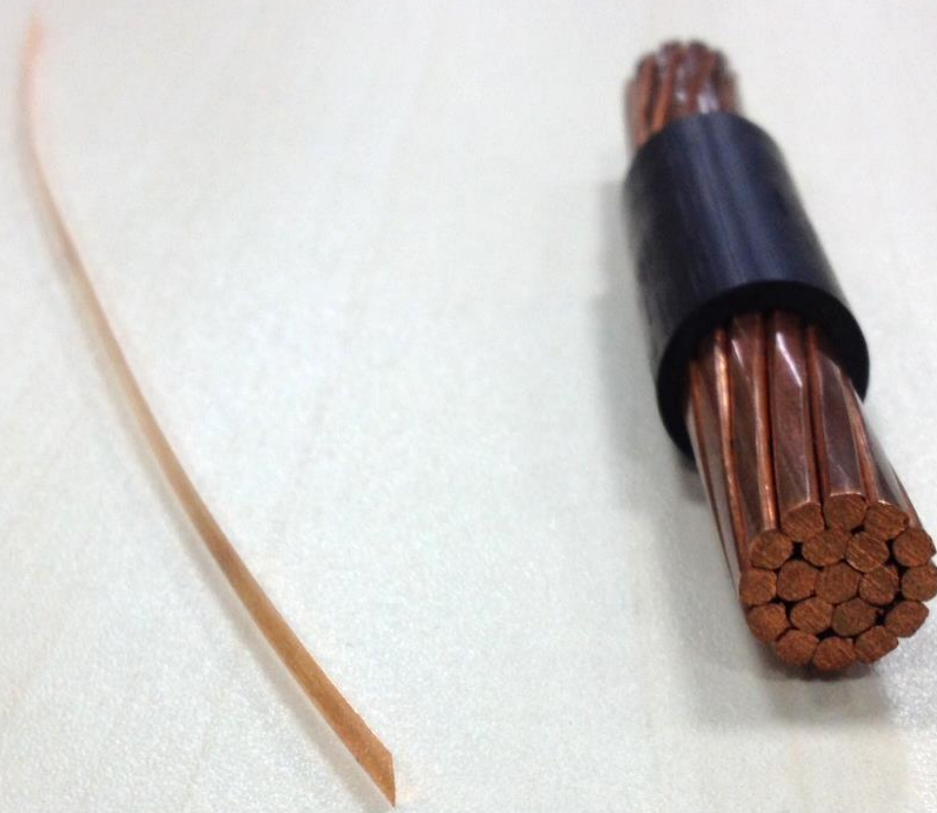
★ Производительность производства 100+ километров / год

Критические температуры сверхпроводников «редкоземельного» семейства $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$



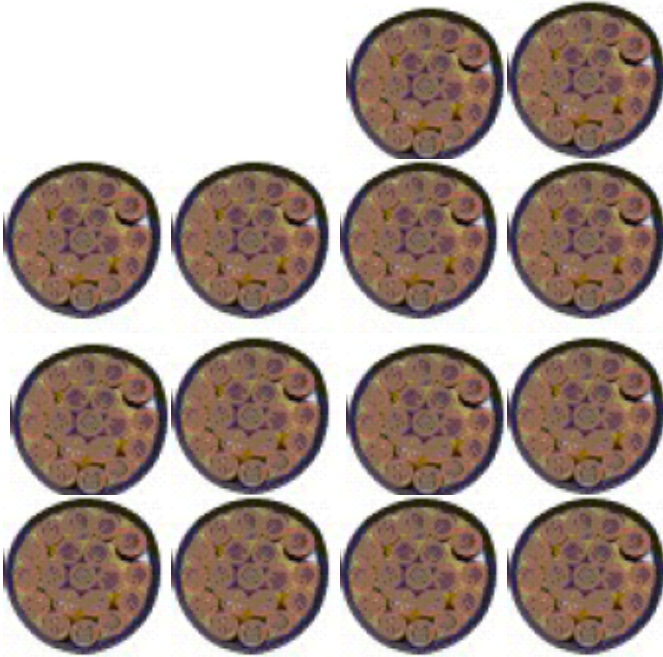
Чем ниже температура использования по сравнению с T_c , тем большая плотность критического тока (j_c) может быть достигнута.

Где применяют ВТСП-провод?



Токонесущая способность ВТСП-провода в ≈ 500 раз больше, чем у меди. Показаны кабели равной токонесущей способности (200 Ампер).

Медный кабель



**Предельный ток
4550 А**

Вес 52 кг/м

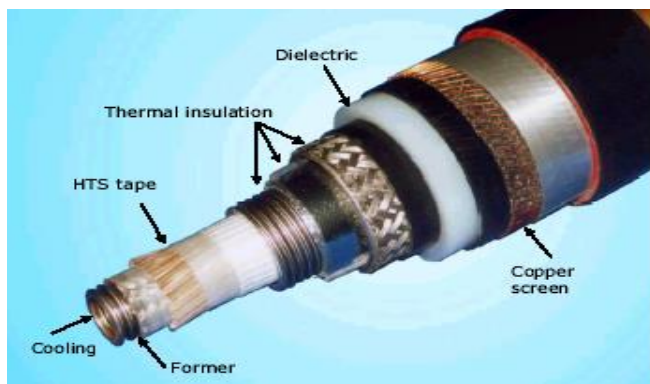
ВТСП - кабель



**Критический ток
6000 А**

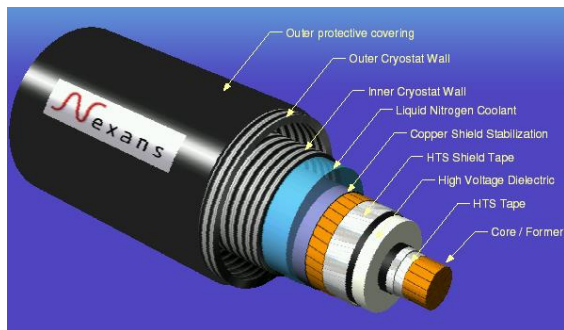
Вес 3 кг/м

Силовые ВТСП-кабели

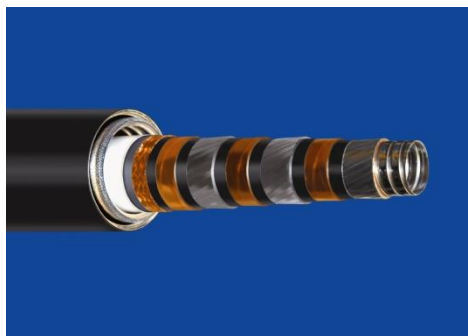


Несверхпроводящий экран.
Первый 30 м кабель НКТ
(Дания) с 2001 г

С холодной изоляцией



Сверхпроводящий экран.
Проект LIPA – 600м
Запущен в апреле 2008 г.



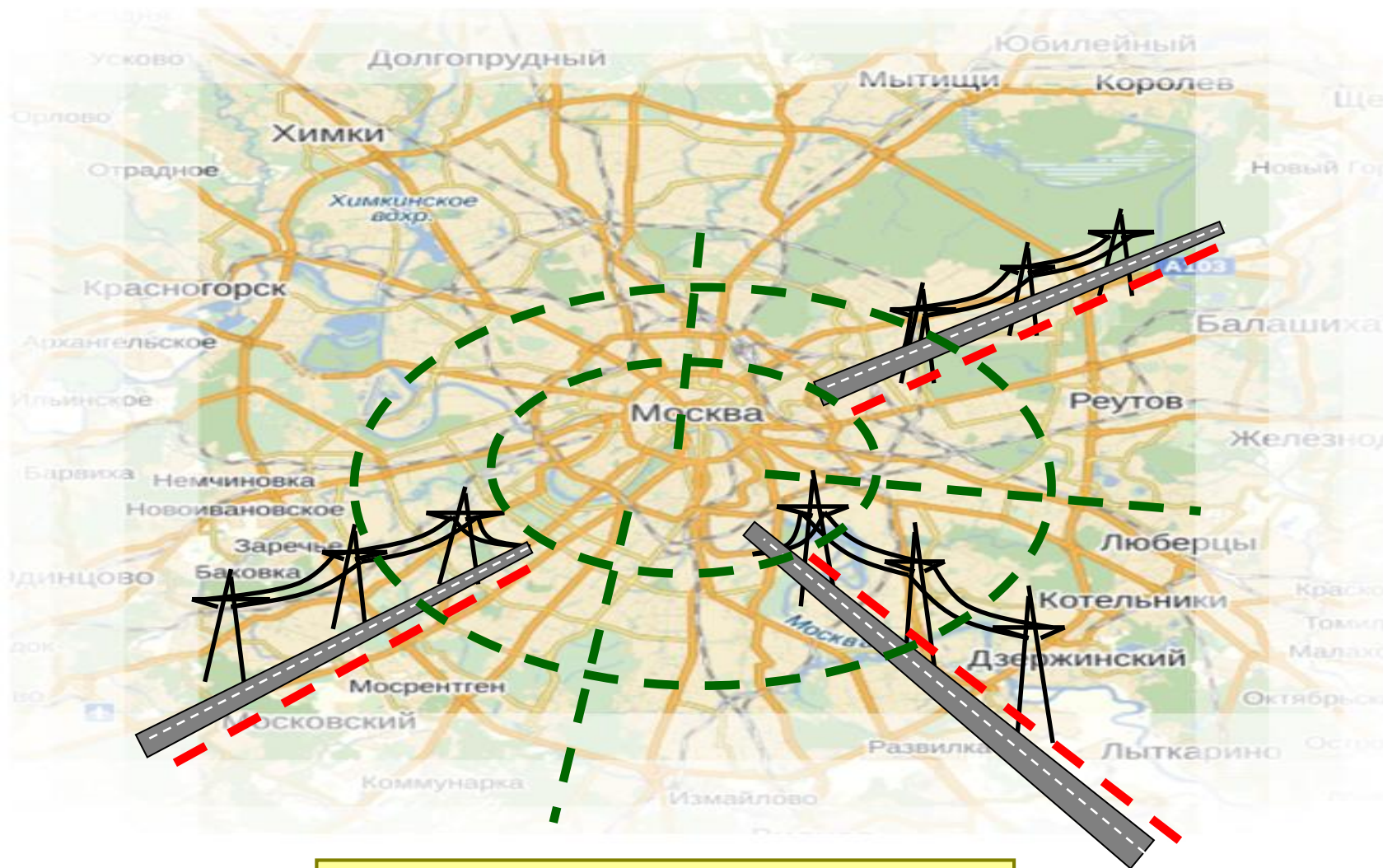
Триаксиальный кабель.
Проект ULTERA - 200 м;
Запущен 8.08.2006
в США на подстанции
Биксби



Три в одном.
Проект Sumitomo - 350 м;
Запущен 20.07.2006 в
г.Олбани, США. Вставка из
ВТСП 2-го поколения

Сверхпроводниковые технологии для мегаполиса

Инфраструктура 21-го века



Городские ВЛЭП

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



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



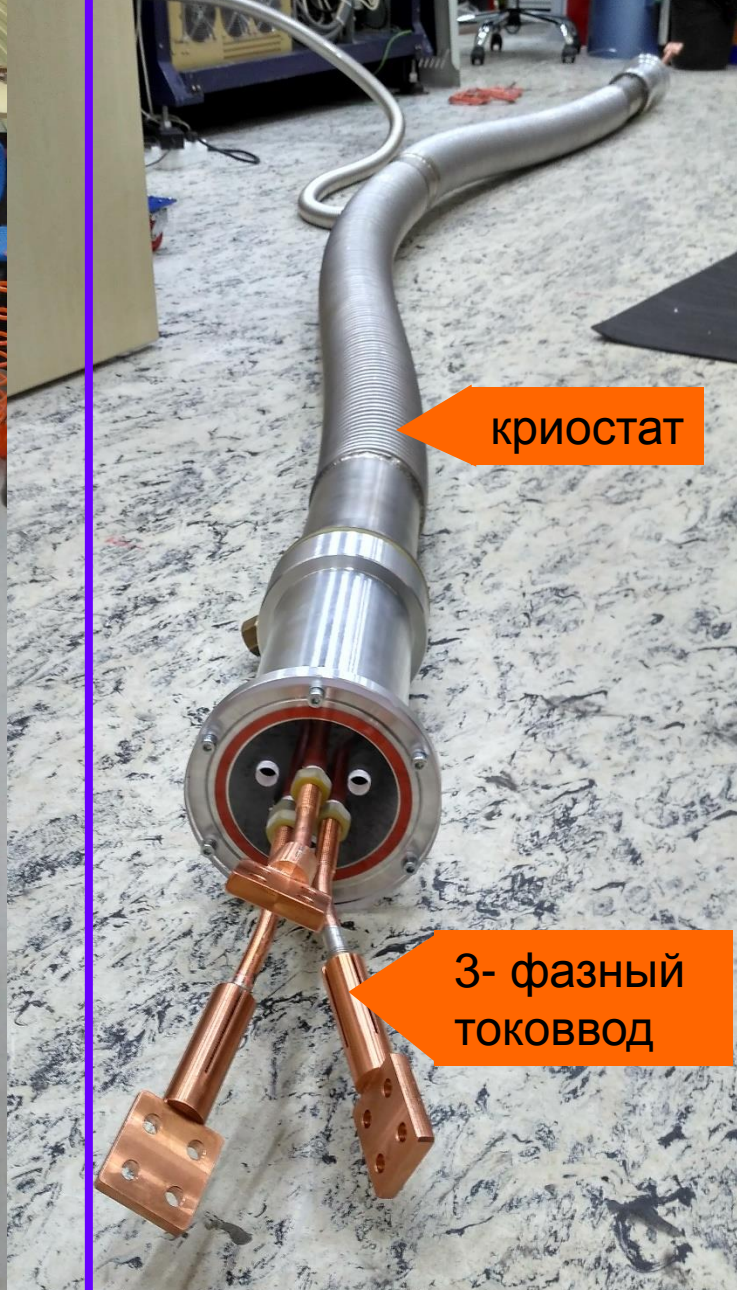
- Высочайшая эффективность использования энергии
- Очень низкий шум
- Малое загрязнение воздушной среды



Двухслойная навивка



крионасос

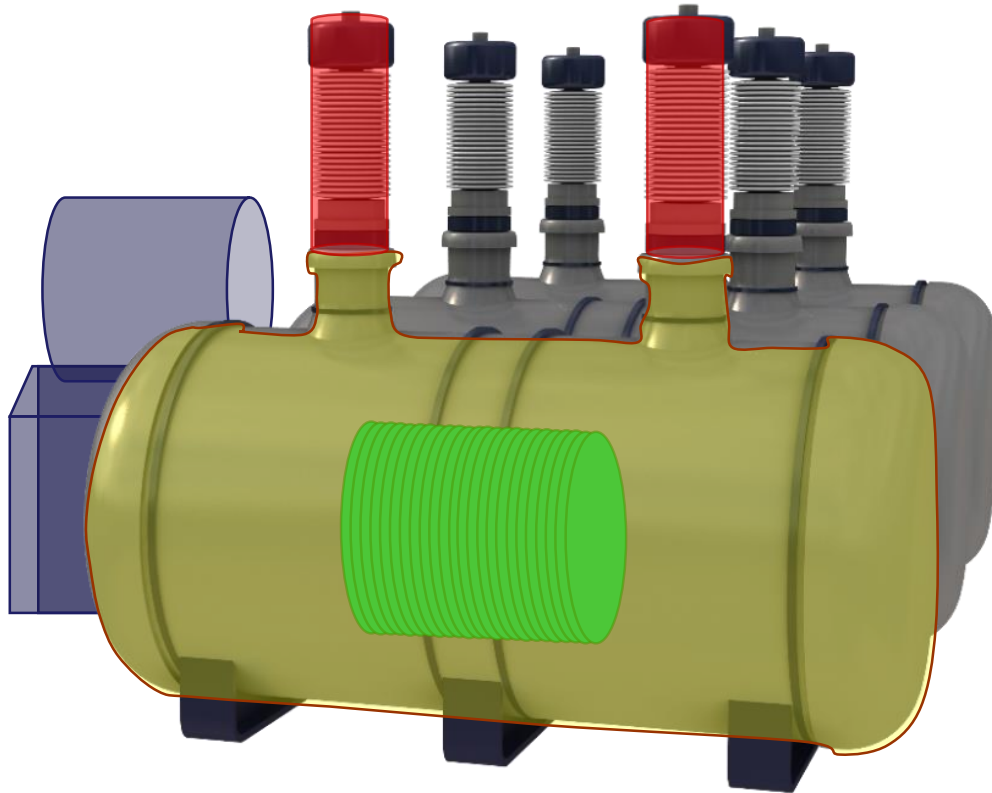


криостат

3- фазный
ТОВОВВОД

Суперокс: Трехфазный сверхпроводящий кабель 2,2 кА 220 В для электроснабжения самолета Airbus.

Сверхпроводящий ограничитель тока для Московской городской электросети: 220 кВ, 2400 А. $W = 528 \text{ МВА}$.



Срок создания – 3 года. Экономэффект для
МОЭСК = 5 млрд.\$

Модули СОР

SuperOx

Криостат

Партнер 1

Криокулер

Партнер 2

Токовводы

Партнер 3

Сверхпроводящий ограничитель тока: Единичный модуль

SuperOx&MSU

$U_{\text{rated}} = 3,3 \text{ kV}$
 $I_{\text{rated}} = 500 \text{ A}$

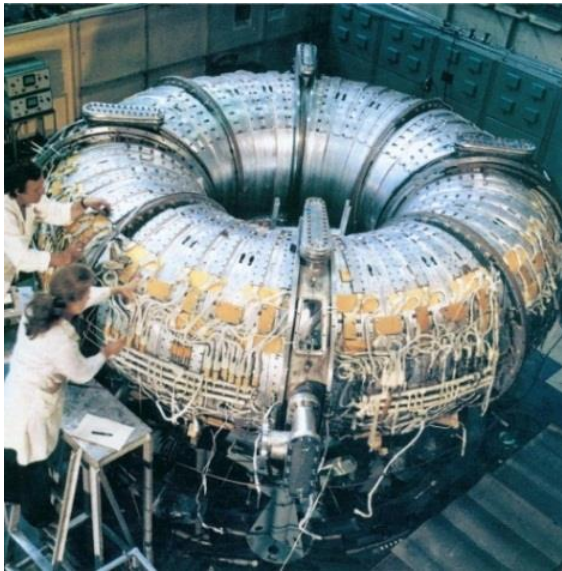
~ 60 m of 12 mm
wide 2G wire



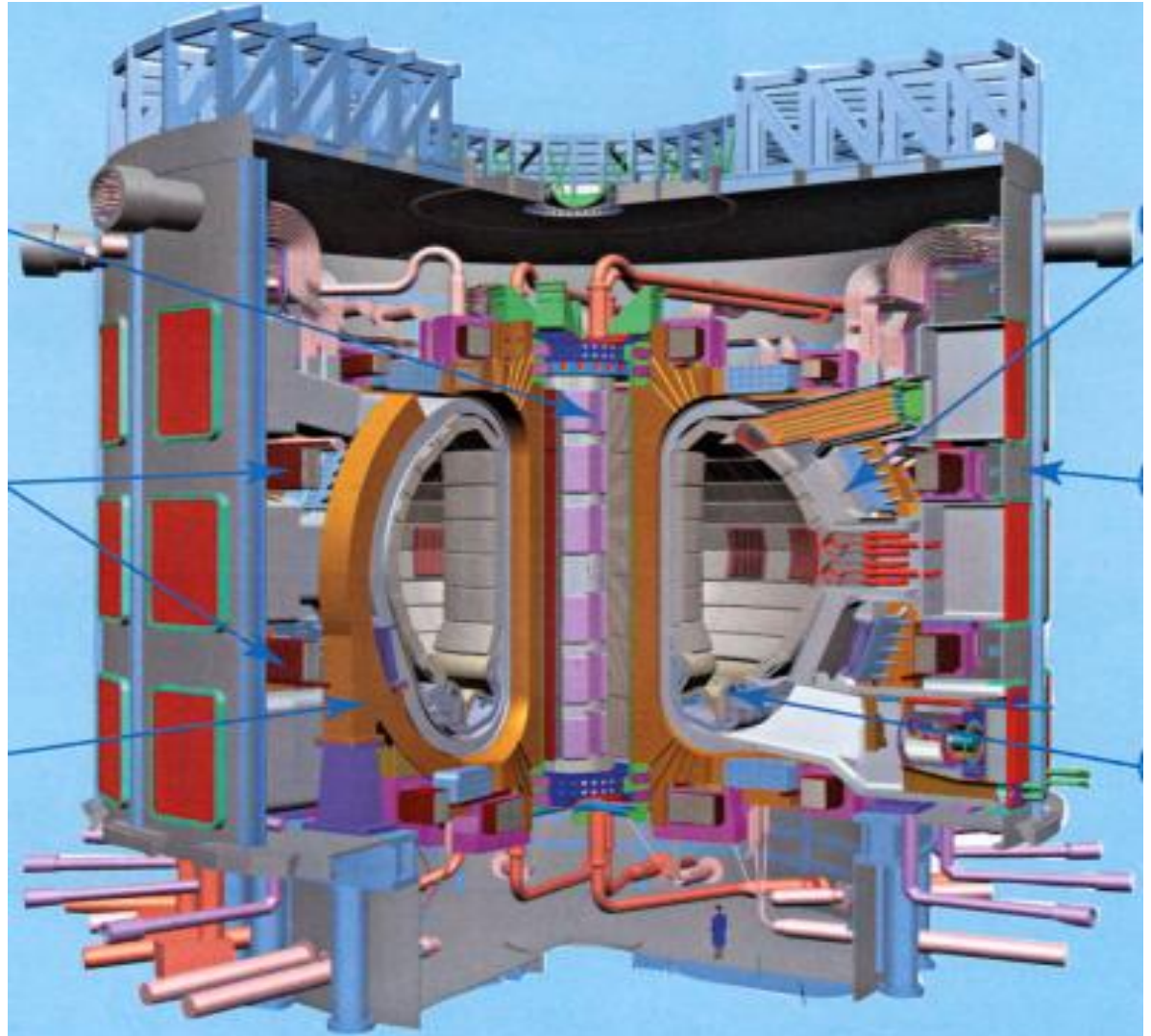


Наиболее масштабный потребитель низкотемпературных сверхпроводников – высокополевые магниты для физических установок.

ТокамакТ-7 (NbTi) -1978

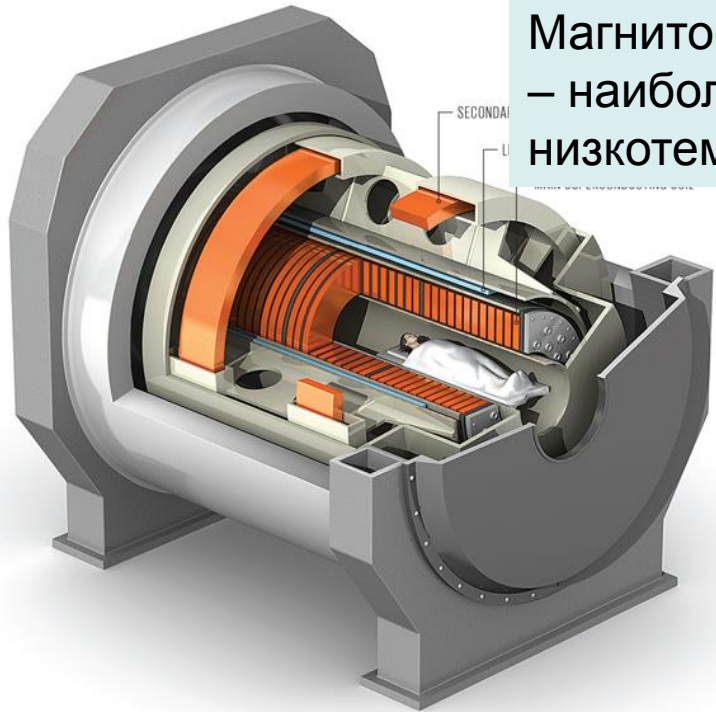


Плазма сжимается и удерживается полем сверхпроводящих магнитов



Международный термоядерный экспериментальный реактор - ITER 2008-2020 Cadarache, France

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

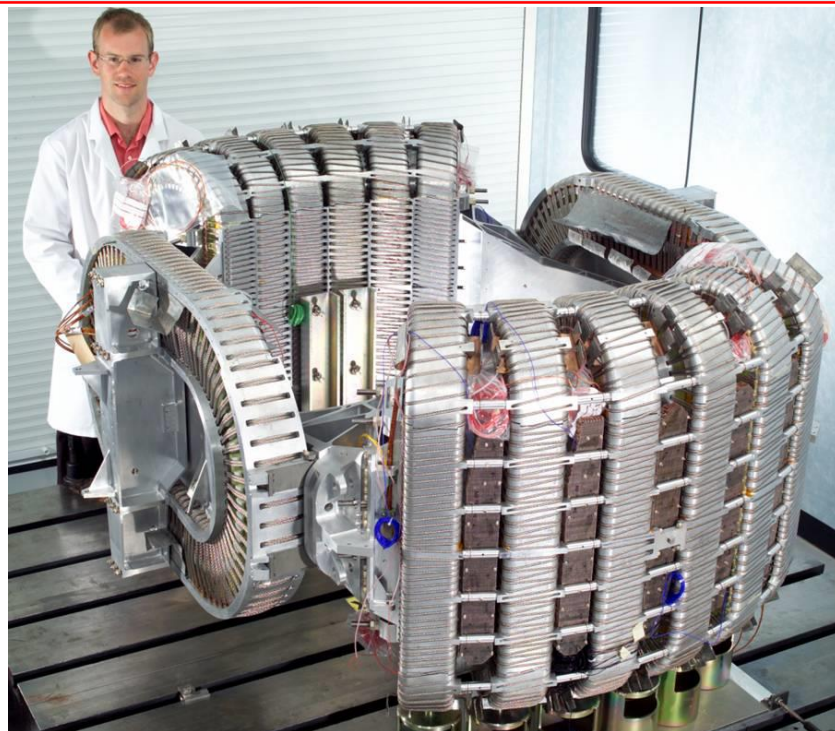
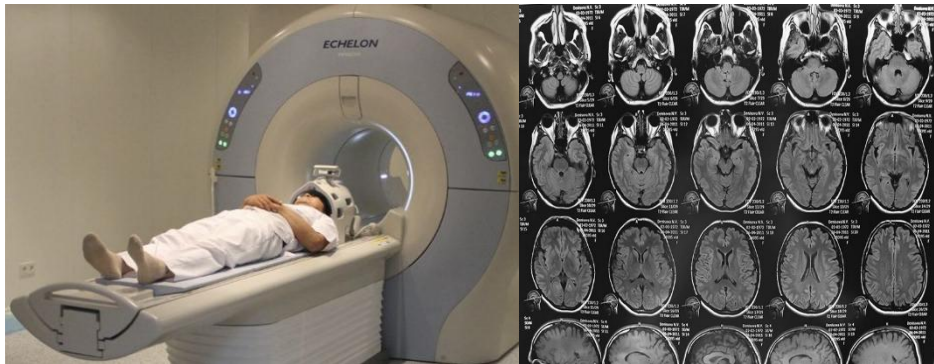


Проектируемый магнит с полем 11,5 Тл !

> 200 км сверхпроводящего кабеля с критическим током 1500 А

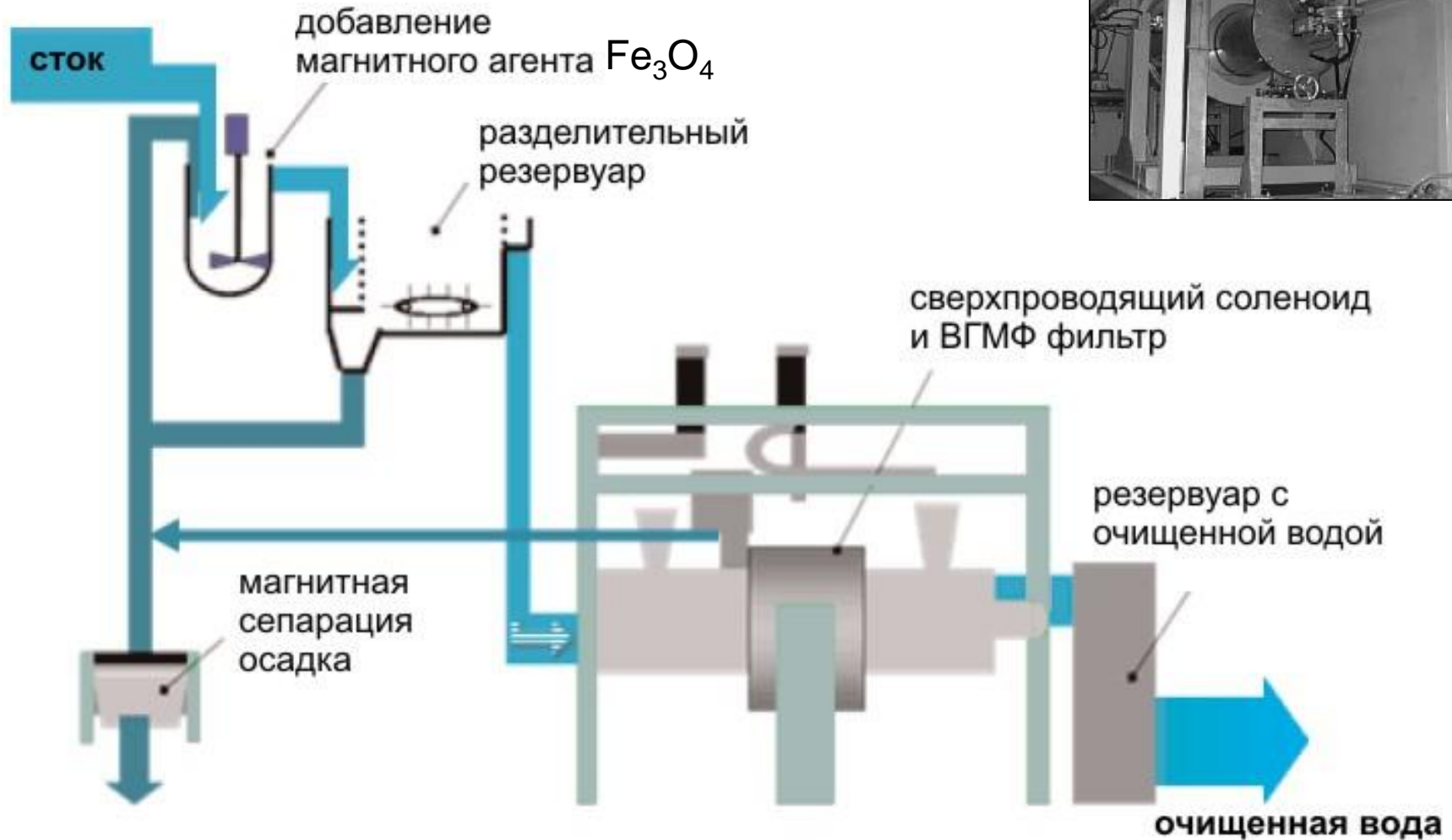
Разрешение томографа < 0,1мм.

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



ВТСП-магниты в промышленности

Магнитная очистка сточных вод,
2000 м³ в сутки (Япония)



ВТСП-ПРОЕКТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН. ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ВЭУ.

Мощность синхронного генератора зависит от величины магнитного поля между ротором и статором.

Применение ВТСП-лент позволяет увеличить поле и радикально сократить размеры и массу генератора при сохранении его мощности.

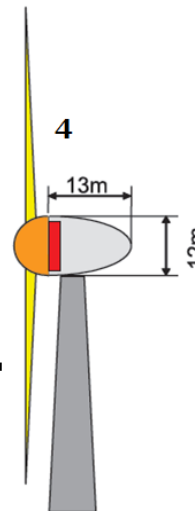
Генератор 5 МВт:

Постоянный магнит. $B_g \sim 0,9$ Тл. $\rightarrow V_{\text{ротор}} \sim 35 \text{ м}^3$
ВТСП. $B_g \sim 2,4$ Тл. $\rightarrow V_{\text{ротор}} \sim 13 \text{ м}^3$



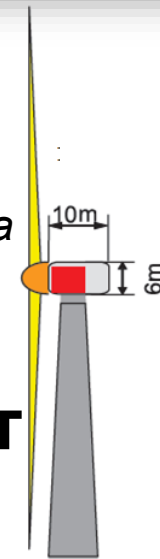
Генератор 10 МВт:

Традиц. ВЭУ
без редуктора



$m \sim 320 \text{ т}$

Проект
ВТСП ВЭУ
без редуктора



$m \sim 70-150 \text{ т}$

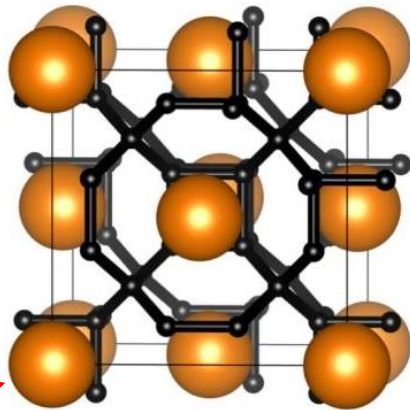
- Блоки и пластины обеспечивают стабильную левитацию
- Альтернатива текстурированной ВТСП-керамике: нет ограничений в размере и форме



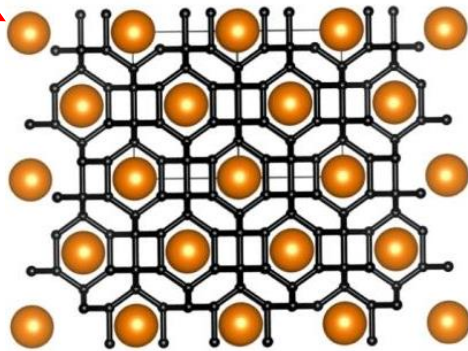
В СуперОксе изготовлены ВТСП-сборки с силой левитации более 200 кг

Сверхпроводящие супергидриды РЗЭ: теоретические предсказания и экспериментальные результаты.

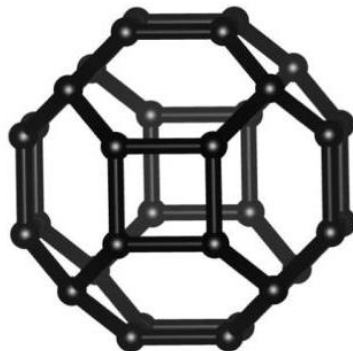
Структура
 LaH_{10}



La



Подрешетка
атомов
водорода

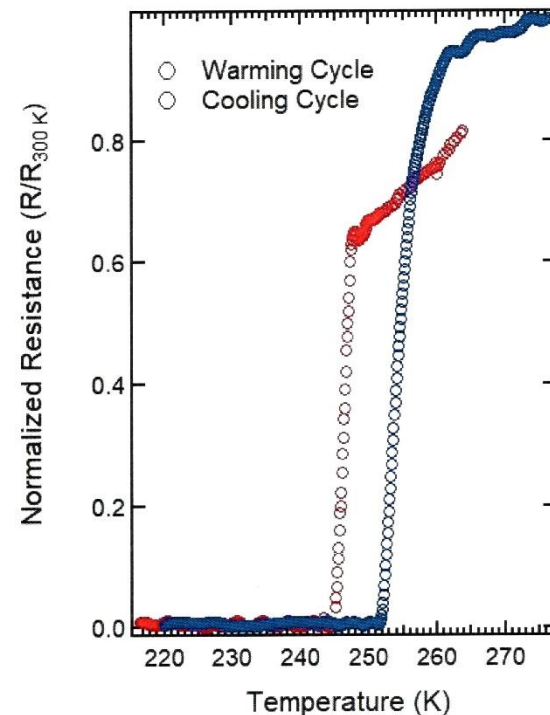


Теория:

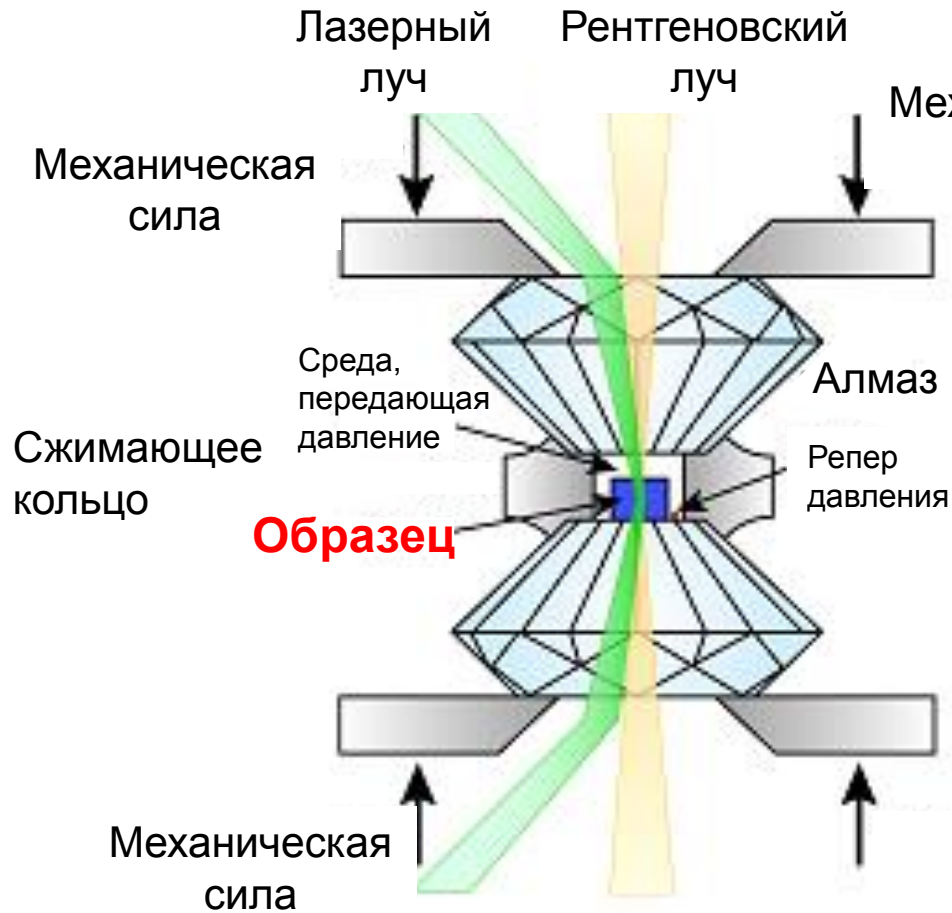
Супергидриды РЗЭ, образующиеся под высоким давлением $\sim 150\text{-}300$ ГПа, являются сверхпроводниками с критическими температурами $250\text{-}300$ К.

Эксперимент: LaH_{10}

под давлением 160 ГПа T_c 265-248 К



Алмазные наковальни – инструмент для проведения синтеза, структурных исследований и исследования физических свойств при рекордных давлениях



Внешний вид алмазных наковален в сборке

Клатратные структуры супергидридов РЗЭ, образующиеся при высоких давлениях – потенциальные сверхпроводники с рекордными критическими температурами

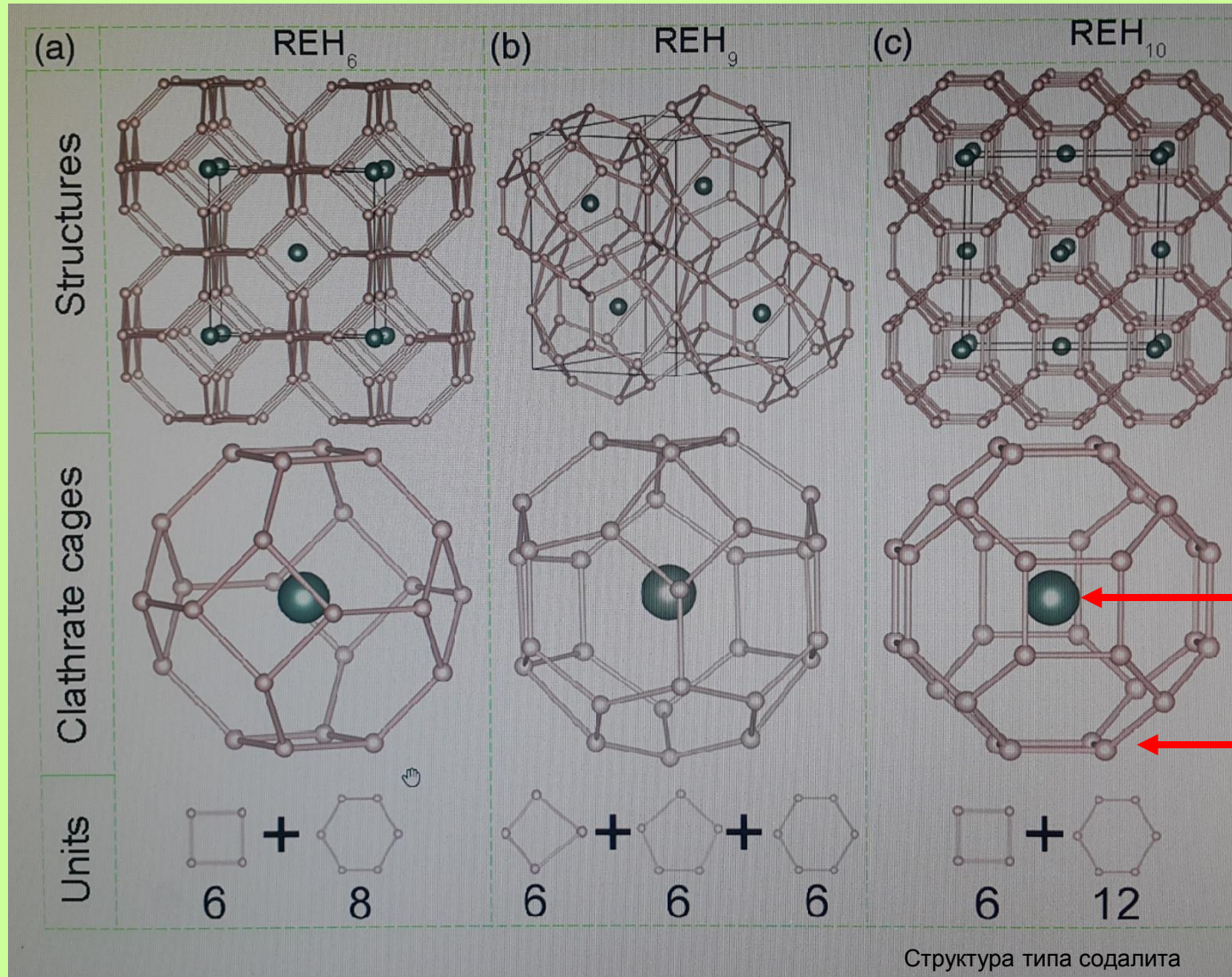
Теоретические предсказания:

YH_{10}

$T_c = 303\text{ K}$

при
400 ГПа
(4 млн атм)

?

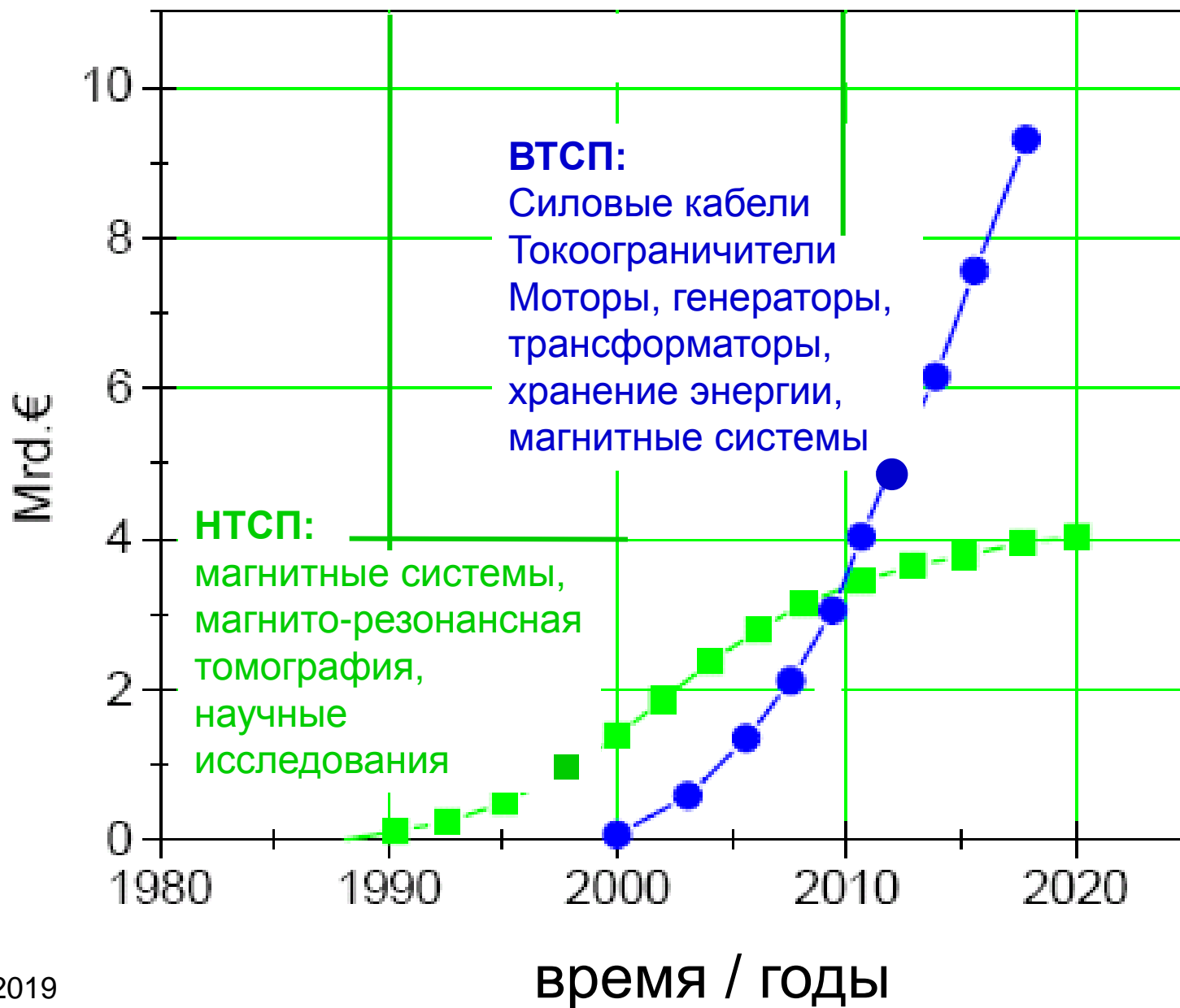


Спасибо за внимание!



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

Динамика мирового рынка сверхпроводимости

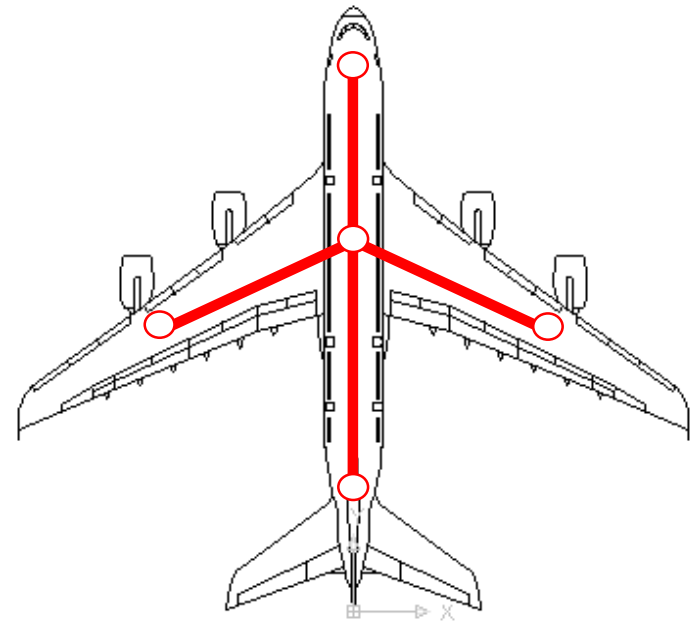


Power cable Project Proposal

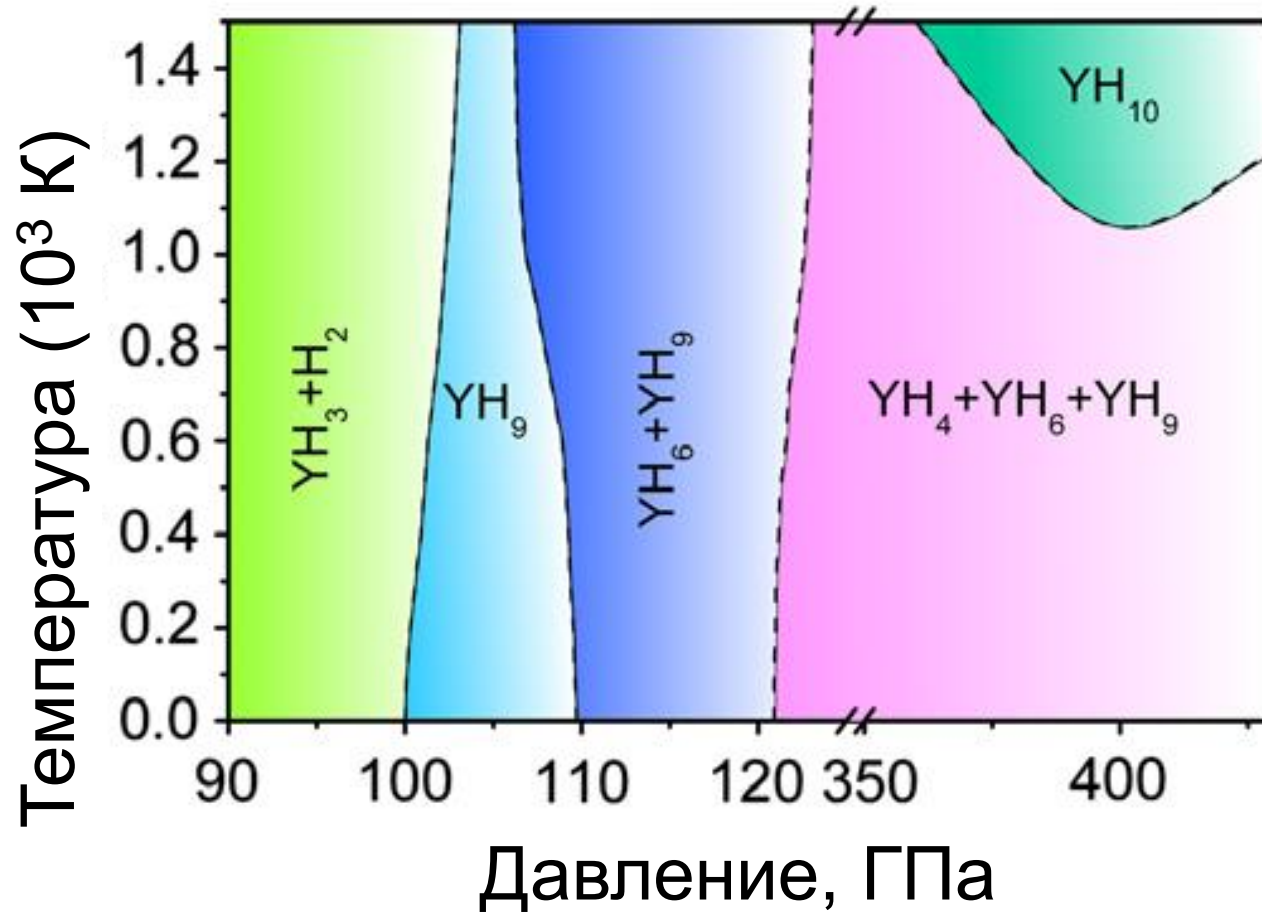
Goal: fabricate and test in laboratory (or outdoors) HTS cable system with total length of ~50-100 meter and choice of the cryogenic system

Technical characteristics:

Rated voltage :	115 VAC
Phases :	3
Rated current :	1600 A
Max. rated frequency :	850 Hz
Outer diameter :	5-10 cm
Weight :	< 5 kg/m
Terminations :	5
Timeframe:	12-18 months
TRL:	3 to 4



Расчётная фазовая диаграмма системы иттрий – водород
при высоких давлениях

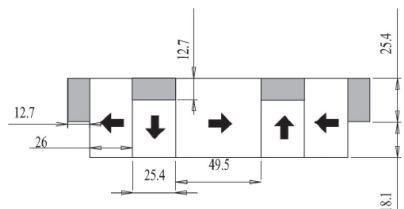
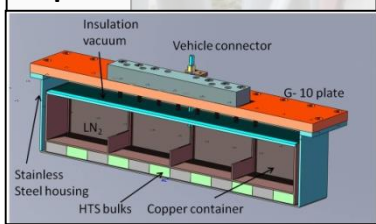


Применения высокотемпературных сверхпроводников

Первый пассажирский поезд на пассивном подвесе ВТСП над постоянными магнитами
Рио-де-Жанейро, Бразилия



Криостат с ВТСП



Рельс – сборка постоянных магнитов

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ НА МАГНИТНОМ ПОДВЕСЕ



↑
Япония,
максимальная скорость 581 км/ч



Китай

Каким методом наносить оксидные слои на подготовленную подложку с двуосной текстурой?

Химические методы – MOCVD

-золь-гель

Физические методы - Импульсное лазерное нанесение (PLD)

- Магнетронное распыление

- Электронно-лучевое испарение