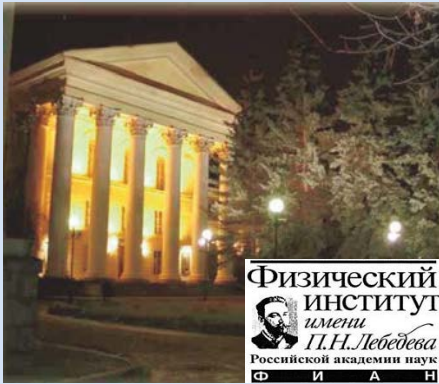


Сверхпроводимость при комнатной температуре : Как? Для чего? Когда ?

В.М. Пудалов, чл.-кор. РАН
(pudalov@lebedev.ru), 7(499)132-6780



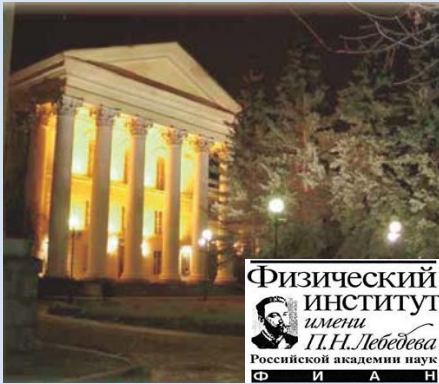
ОП

Физика сверхпроводимости и квантовых материалов

Руководитель: В.М. Пудалов, чл.-кор. РАН
(pudalov@lebedev.ru), 7(499)132-6780

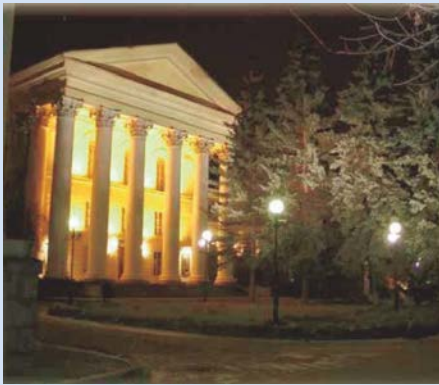
База: Центр высокотемпературной сверхпроводимости и
квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга («**Центр Гинзбурга**»)
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

МФТИ, 9 февраля 2021г.



Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л.Гинзбурга ФИАН

- Физика,
 - Сверхпроводимость,
 - Квантовые материалы
- Что это ?



Сверхпроводимость, высокотемпературная сверхпроводимость.

Почему, Для чего, Как это ?

В.М. Пудалов (pudalov@lebedev.ru),

Центр им. Гинзбурга

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

<https://www.youtube.com/watch?v=ro-Va2NC8Sg>

<https://www.youtube.com/watch?v=BOoODboDs3Y>

МФТИ, 15 февраля 2019г.



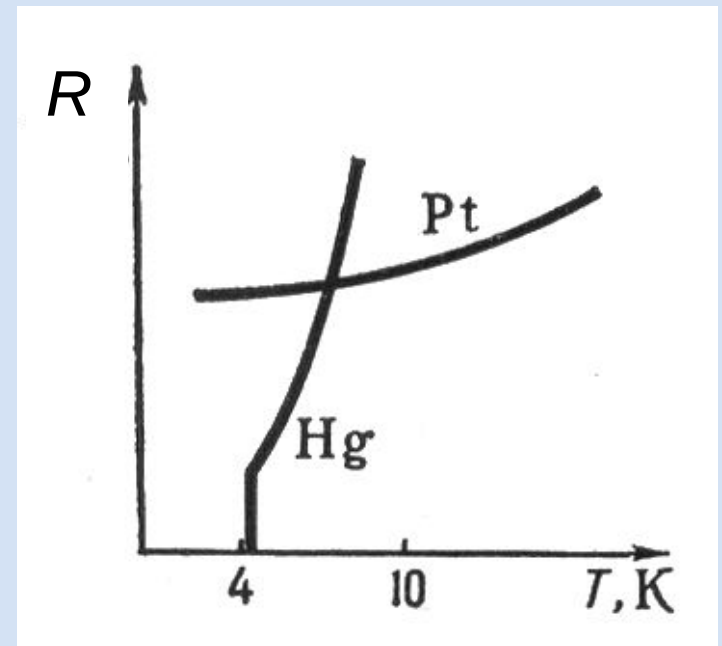
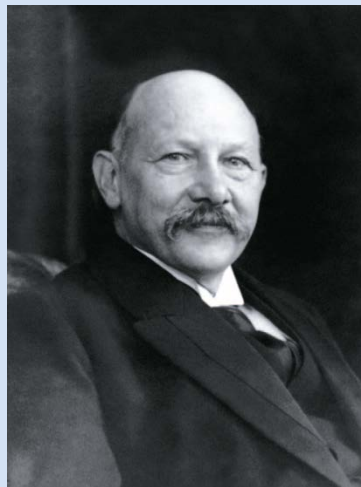
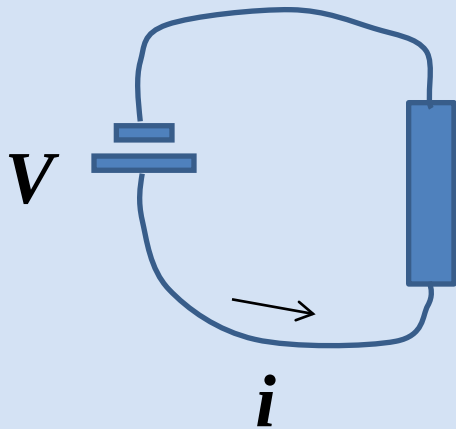
Содержание

1. Начнем с общего. Проводимость, сверхпроводимость.
 - Основные свойства:
 - (а) Исчезновение сопротивления, (б) Идеальный диамагнетизм
 - Механизм(ы) сверхпроводимости
3. Исторические вехи
4. Применения ВТСП
 - ВТСП провода и кабели, технология их изготовления
 - . ВТСП в Энергетике
 - Сверхпроводящие магниты для ускорителей и УТС:
 - Магнитная левитация. Транспорт
 - ВТСП в авиации, космосе

Два основных свойства сверхпроводников

(1) Электрическое сопротивление

$$V = R \cdot i \quad R = 0 \rightarrow \quad V = 0, \\ P = i^2 R = 0$$



1911г. Камерлинг Онесс обнаружил исчезновение сопротивления ртути

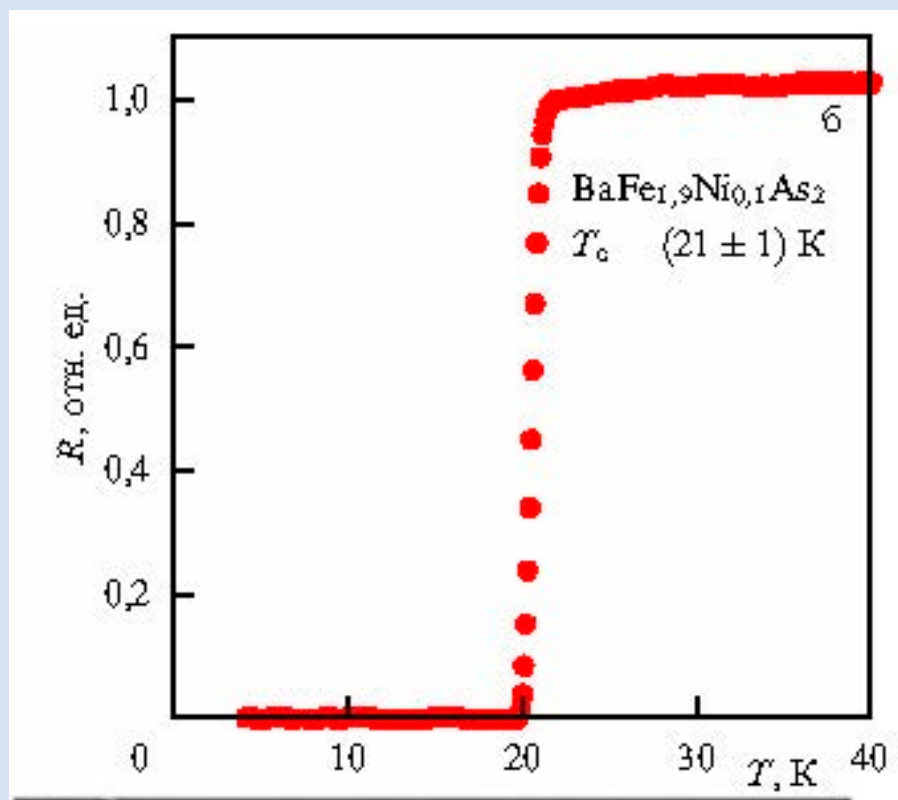
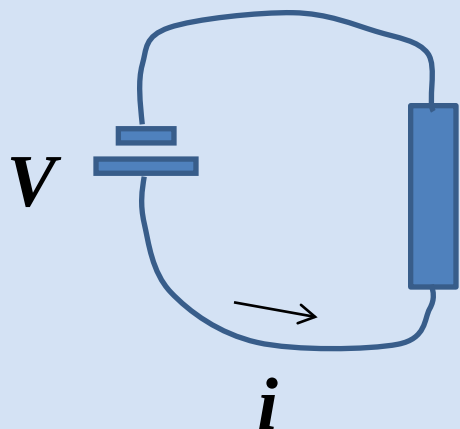
Два основных свойства сверхпроводников

(1) Исчезновение электрического сопротивления

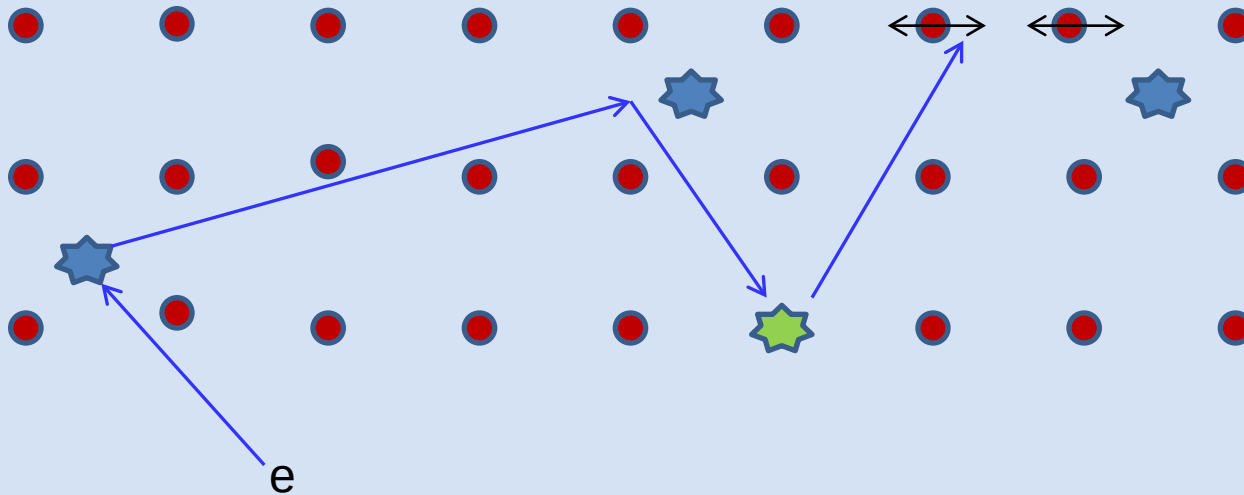
$$V = R \cdot i \quad R = 0 \rightarrow$$

$$V = 0,$$

$$P = i^2 R = 0$$

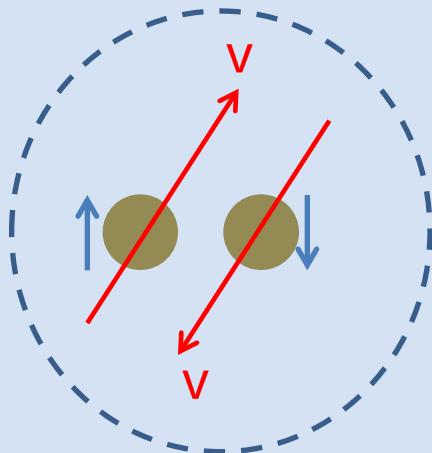
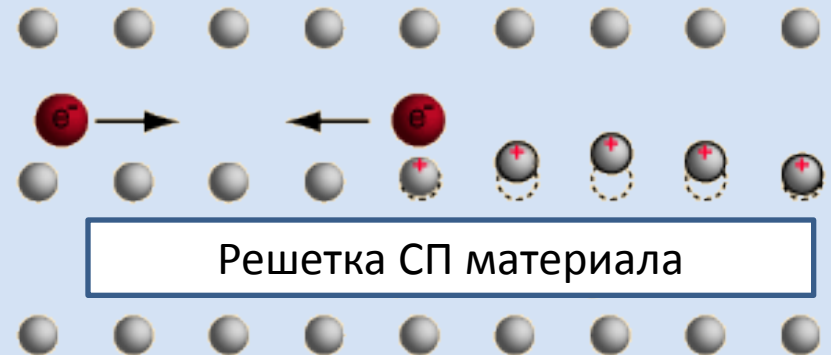
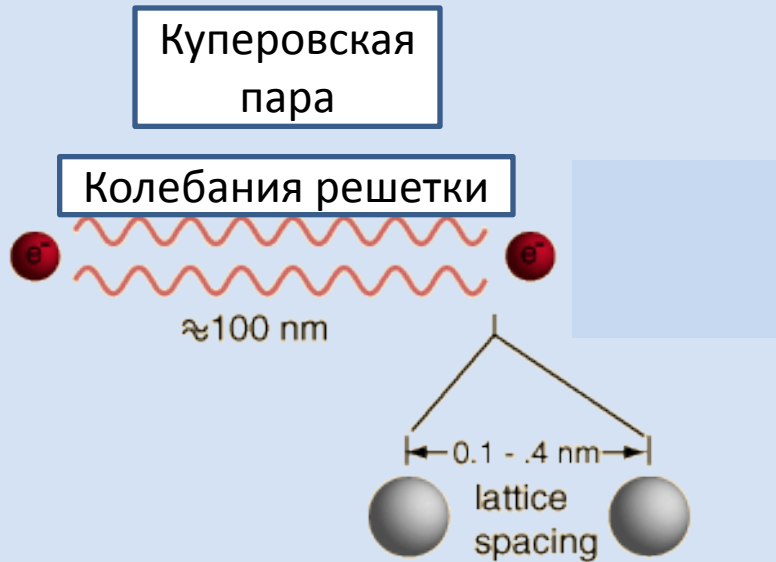


Электрическое сопротивление в нормальном металле. Из-за чего возникает ?



- А) Рассеяние на примесях
- Б) Рассеяние на колебаниях решетки

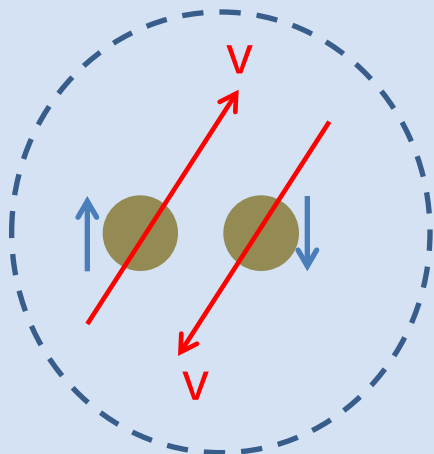
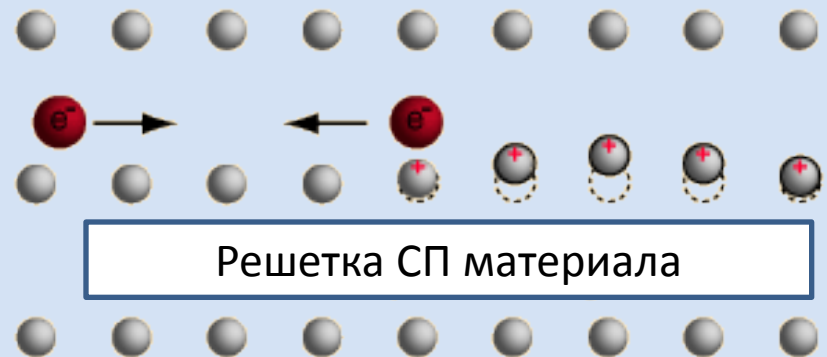
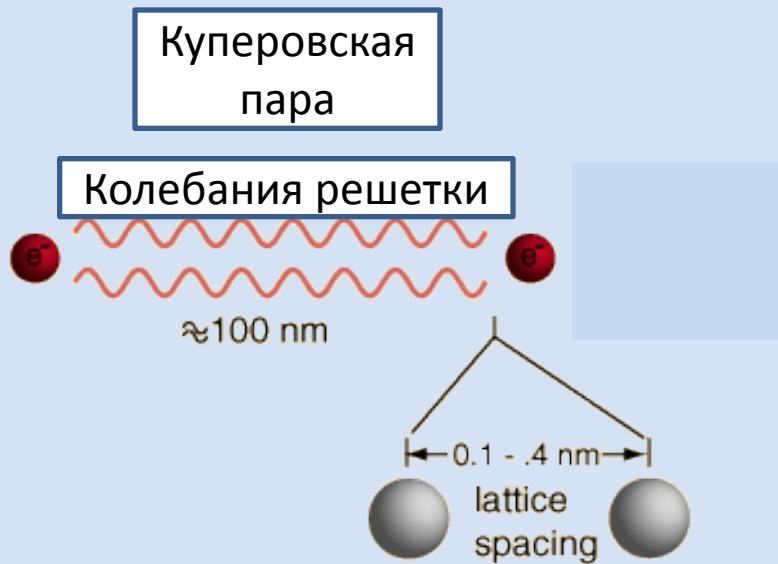
Электрическое сопротивление. Почему оно исчезает в сверхпроводнике?



Куперовская пара:
Два электрона с
противоположными
импульсами и
спинами

Все куперовские
пары когерентны и
образуют одну
волну

Электрическое сопротивление. Почему оно исчезает в сверхпроводнике?



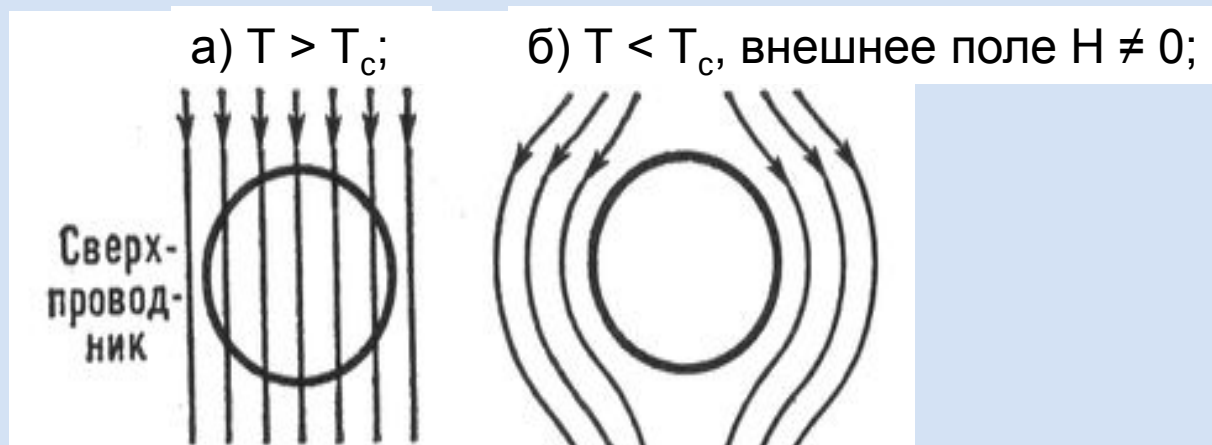
Куперовская пара:
Могут ли спариваться
электроны с
суммарным
импульсом $\neq 0$?

Все куперовские
пары когерентны и
образуют одну
волну

(2) Идеальный диамагнетизм

Сверхпроводники I-го рода

В 1933г. В. Мейснер и Р. Оксенфельд установили, что слабое магнитное поле не проникает вглубь сверхпроводника.



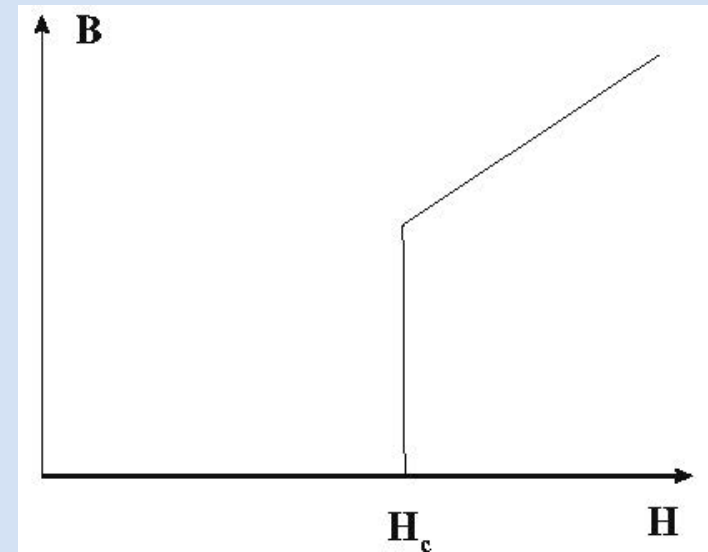
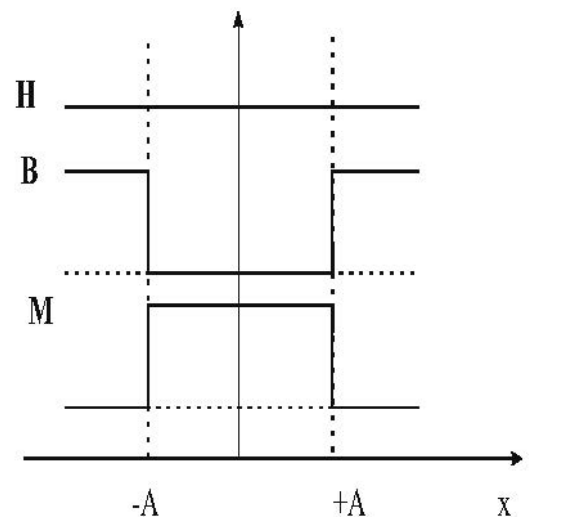
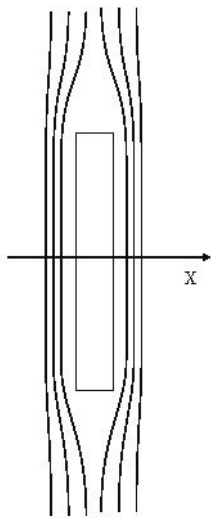
Распределение магнитного поля около сверхпроводящего шара:

(2) Идеальный диамагнетизм

Сверхпроводники I-го рода

$T < T_c$, внешнее поле $H \neq 0$;

Распределение магнитного поля около сверхпроводящего цилиндра:



Исторические вехи

- 1898** H₂ ожижение James Dewar в Royal Institution of London
- 1908** Ожижение He
- 1911** Сверхпроводимость ртути Kamerling-Onnes,
(Holst/ James Dewar) Соперники
- 1933** Walter Meissner и Robert Ochsenfeld
- 1931-1935** de Haas & Keesom & Лев Шубников: СП в сплавах
- 1950** Гинзбург-Ландау. Абрикосов- вихри.
- 1935-50** Неудачные попытки создания микроскопической теории
(Dirac, Einstein, Feynman and Pauli)
- 1957 John Bardeen, Leon Cooper, Robert Schrieffer
- 1935-1960 Nb₃Sn (18.5K), Nb₃Ge (23.2K)
- 1968** теоретик Bill McMillan. **1969** –“Superconductivity”, ***This book would represent “the last nail in the coffin of superconductivity”***

1964-82 теор. группа В.Л.Гинзбурга в ФИАН. Книга “Проблема ВТСП”

1986 Georg Bednorz and Alex Muller's $\text{La}_2\text{BaCuO}_4$ ($T_c=35\text{K}$)

C.Michel, B.Raveau (Univ. of Caen, France) создали 123 Суперовскиты на 4г. ранее, но не охлаждали образцы!

Это же соединение ранее синтезировали в ИОНХ в Москве, но не охлаждали ниже 77K !

1987 M. K. Wu, Paul Chu: **$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (93K)**

1993 Е.В.Антипов, С.Н.Путилин, **$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ (138K при $P=0$), 166K (26kV)**

2001 Jun Akimitsu MgB_2 ($T_c=39\text{K}$)

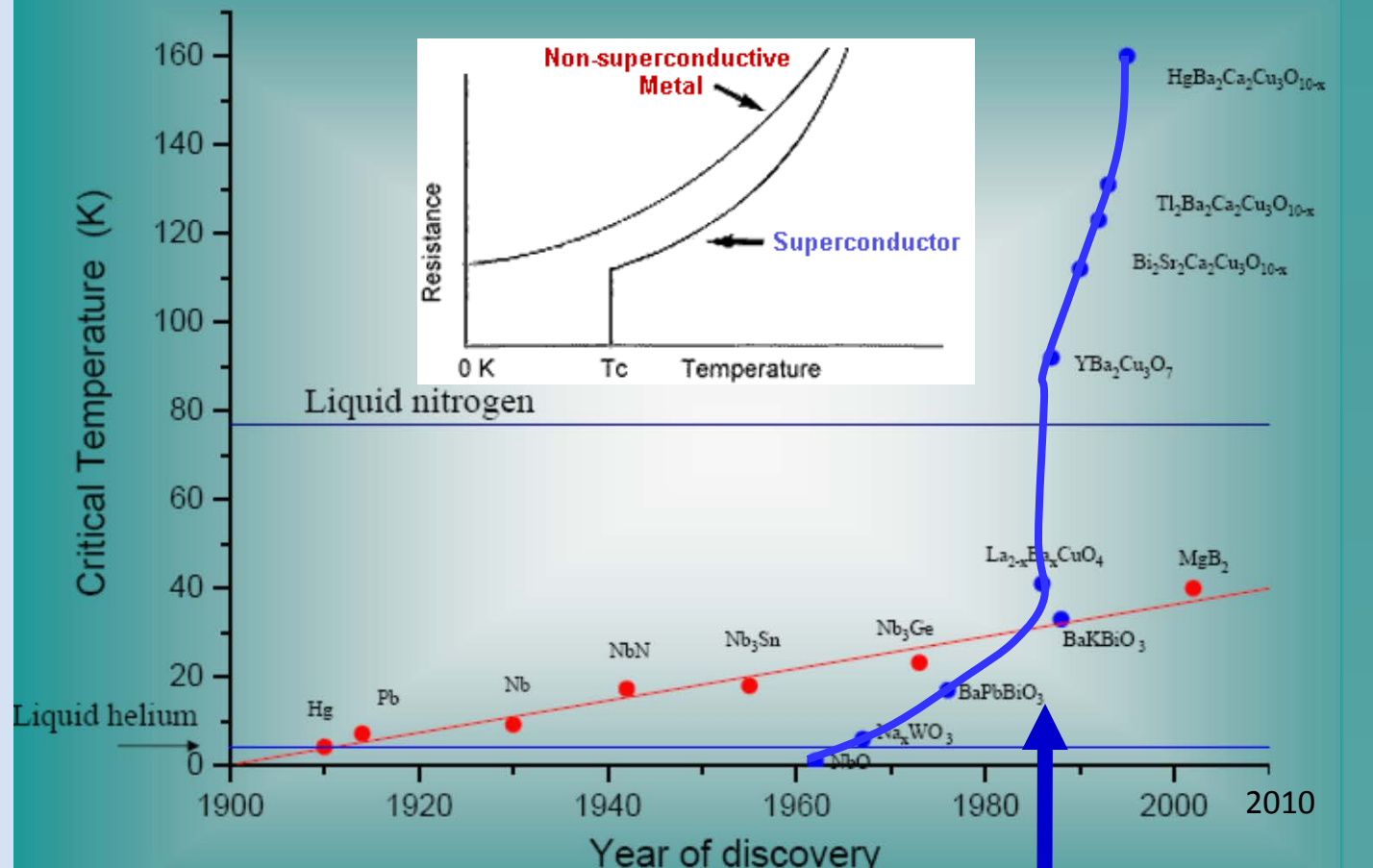
В 1957 R.Swift and D.White в Унив. Сиракузы (NY) изучали $C_p(T)$!

2008 Hosono $\text{LaFeAsO}(\text{F})$ ($T_c=40\text{K}$), затем $\text{Sm}(\text{Gd})\text{FeAsO}$ (56K)

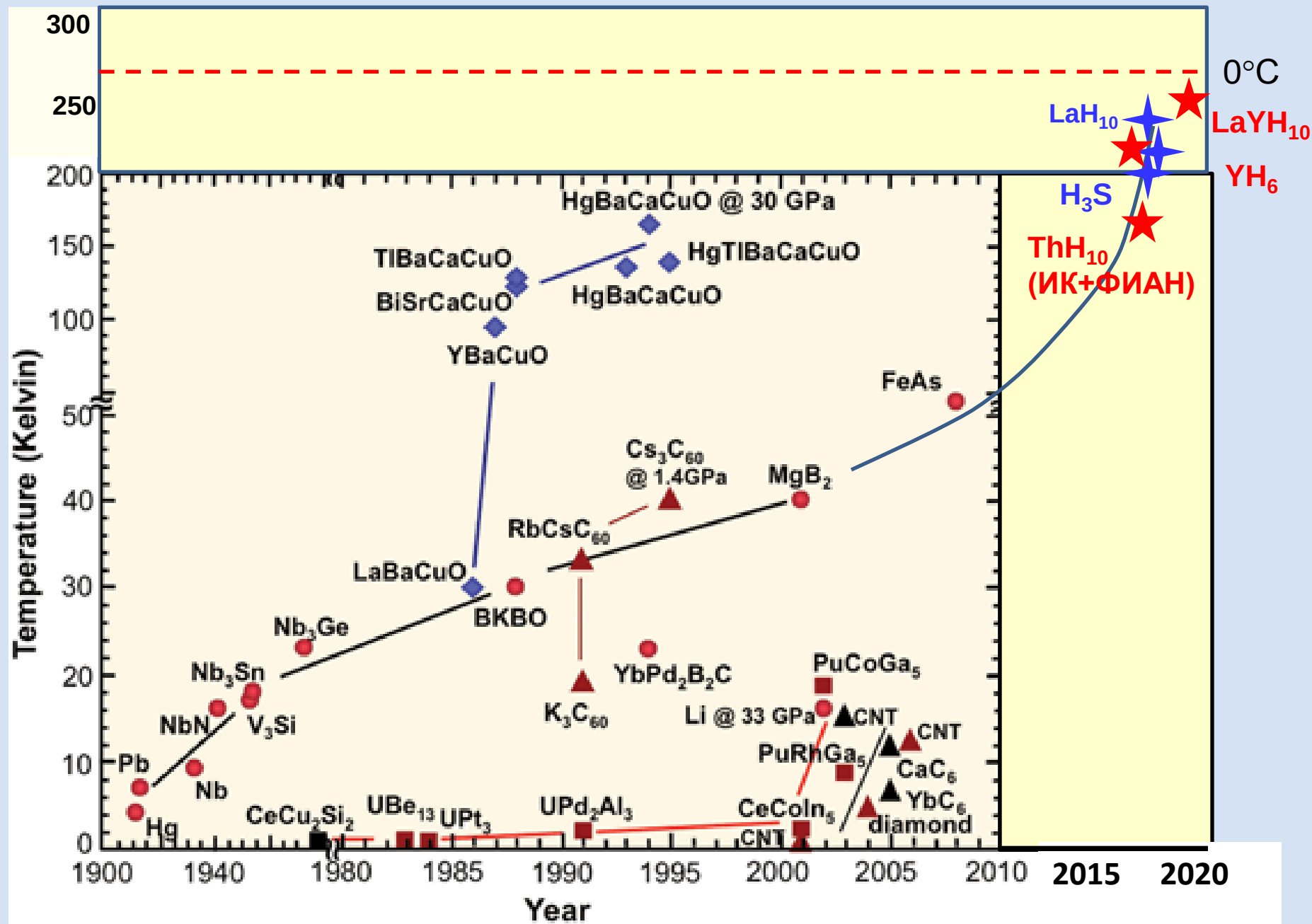
2014 $\text{H}_2\text{S}(\text{H}_3\text{S})$ $T_c=190\text{K} - 205\text{K}$ под давлением 170ГПа.

2018 LaH_{10} ($T_c = 215 - 260\text{K}$) под давлением 250ГПа.

Краткая история открытия сверхпроводников



Купраты
1986



**Для чего и кому нужны
сверхпроводниковые технологии ?**

Условное мерило качества жизни:

потребление энергии на душу населения, в тоннах условного топлива (у.т.),

1 т у.т. = энергии, выделяемой при сжигании 1т угля (~ 8 МВтч).

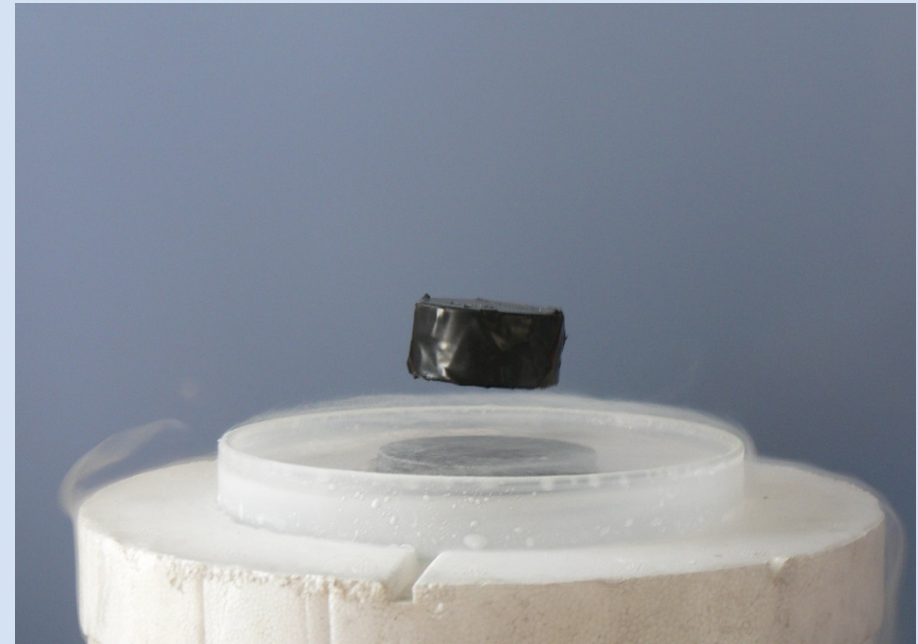
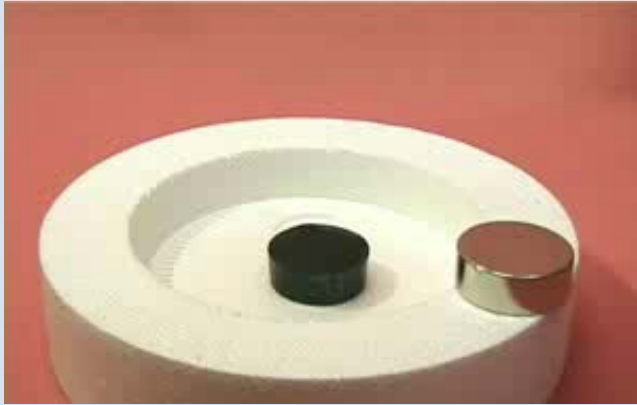
В США ~ 15 т у.т./душу

В России 7т у.т./душу

Наращивать потребление энергии ?

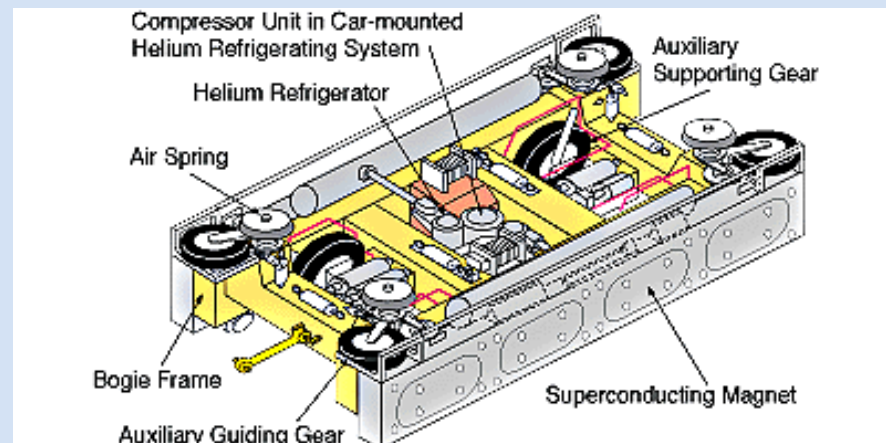
Нет, надо экономить !

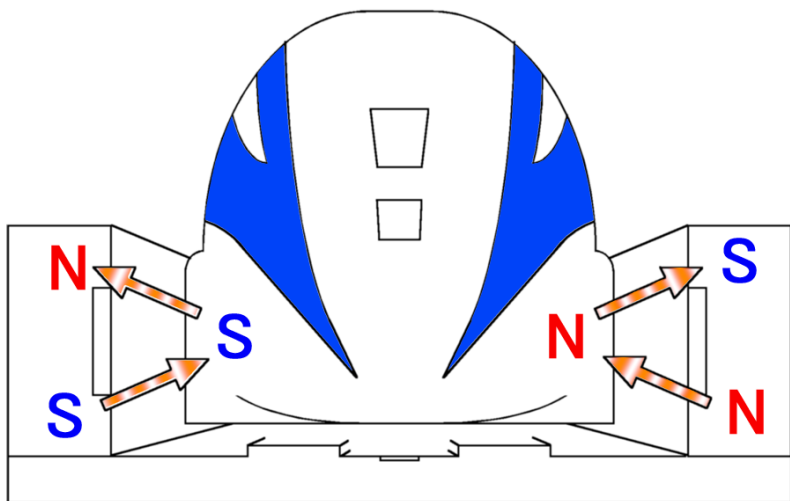
Магнитная левитация и транспорт



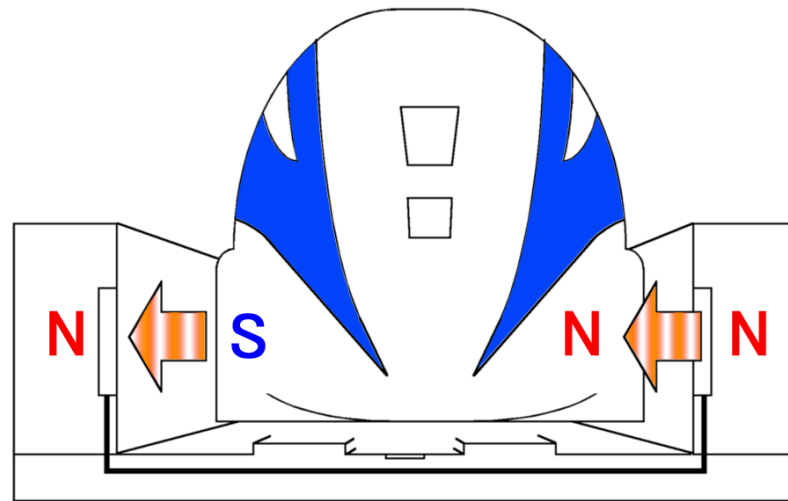


Поезд Синкансэн Нагойя – Осака.
Скорость до 603 км/час

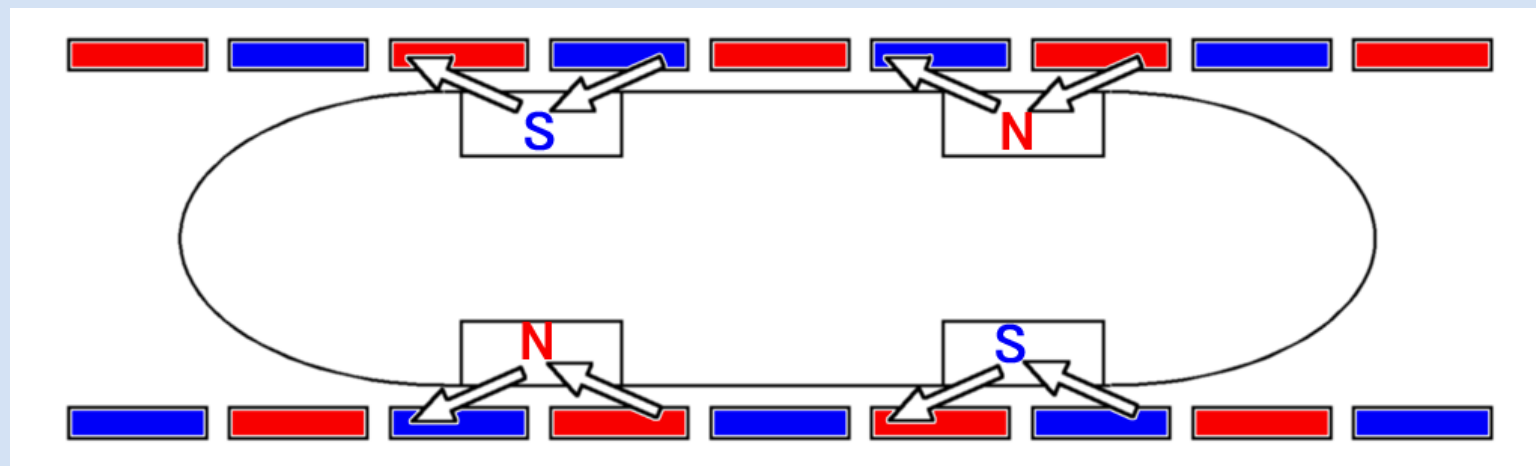




Система левитации



Система стабилизации



Система ускорения



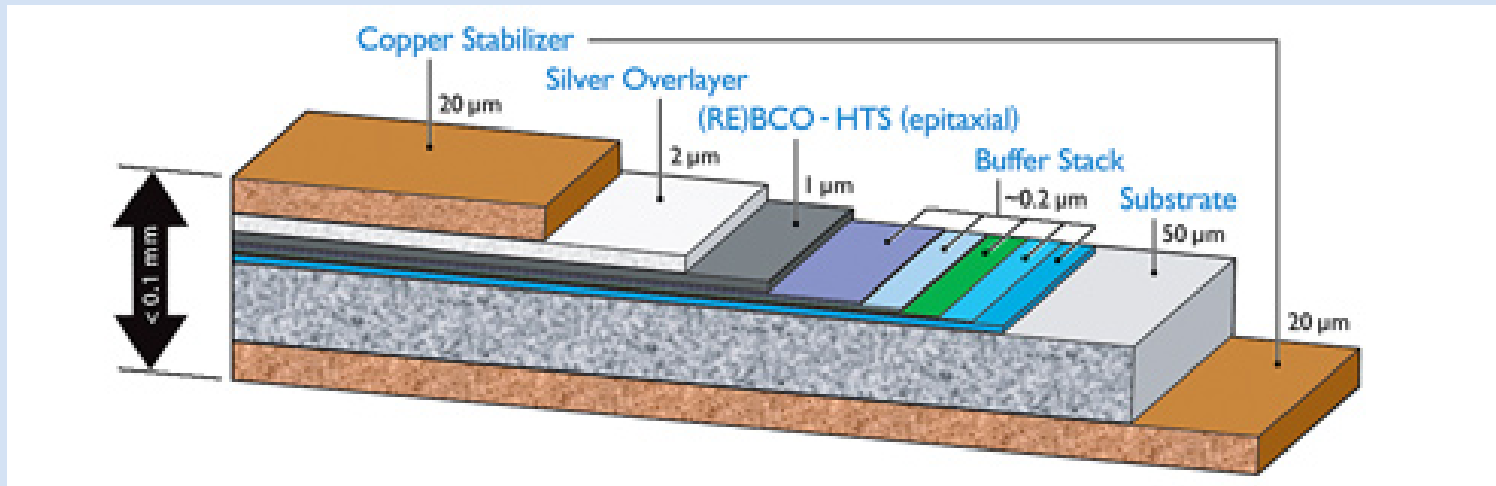
Поезд Maglev из аэропорта Пудун в Шанхай. 30км за 7,5мин.
Скорость до 480км/ч. Цена билета ~400руб

<https://geektimes.ru/post/130656/>

<https://youtu.be/uerF6zIIZ-0>

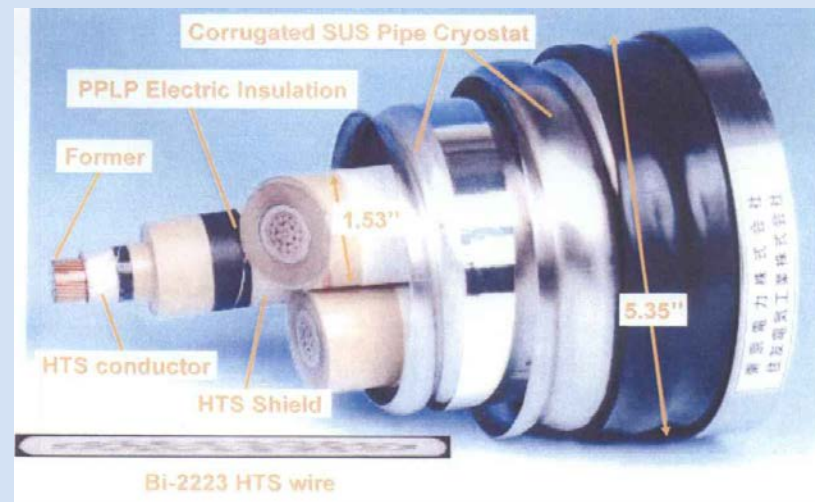
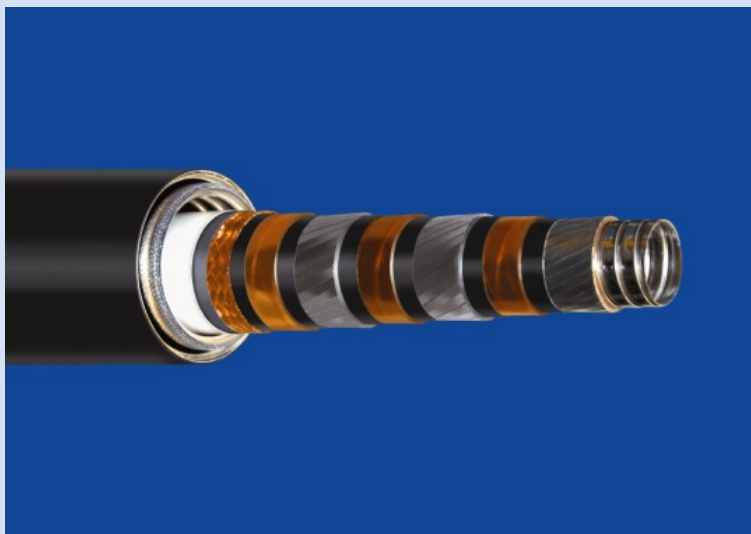
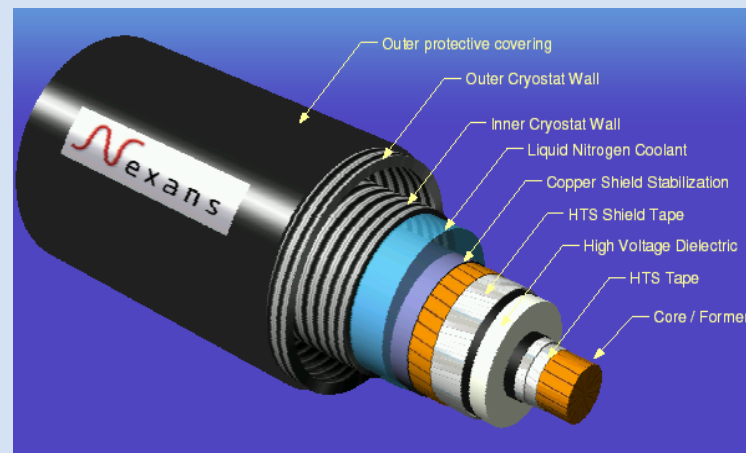
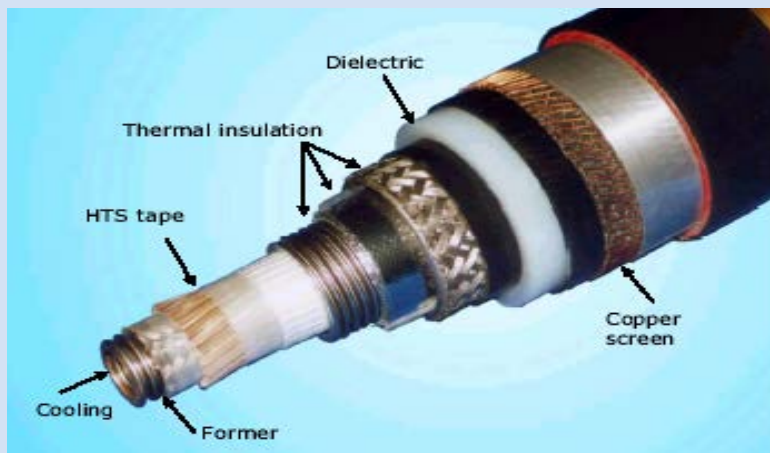
Токонесущие ВТСП ленты

Тонкие кристаллически ориентированные пленки на основе Y, Sm, Gd, нанесенные на металлическую подложку.

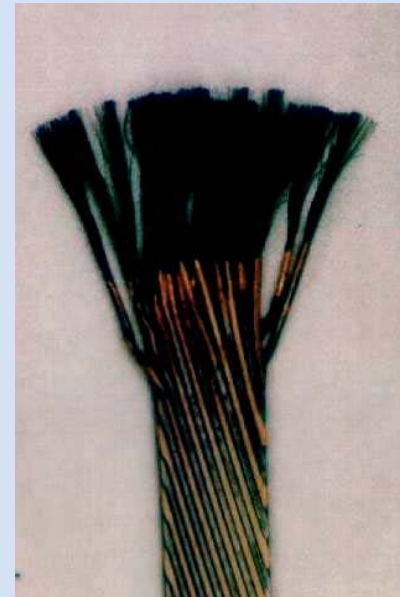
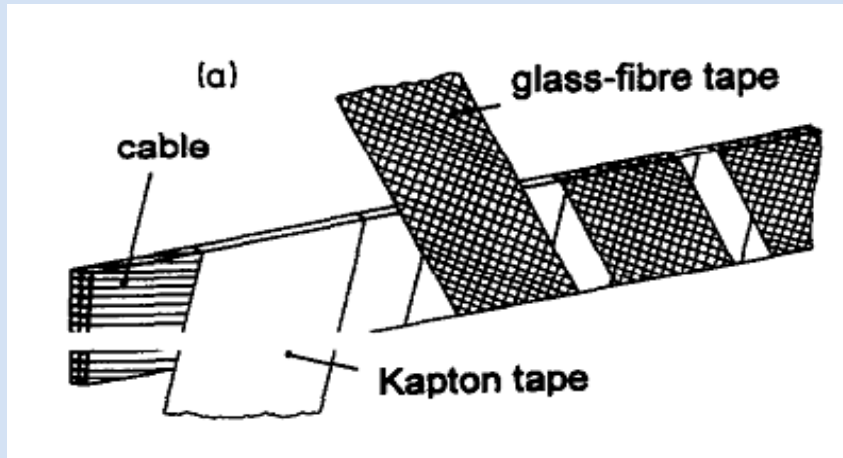


Конструкция ВТСП ленточного проводника: медный стабилизирующий слой, серебряное покрытие, сверхпроводник, буферные прослойки, подложка.

Провода и кабели

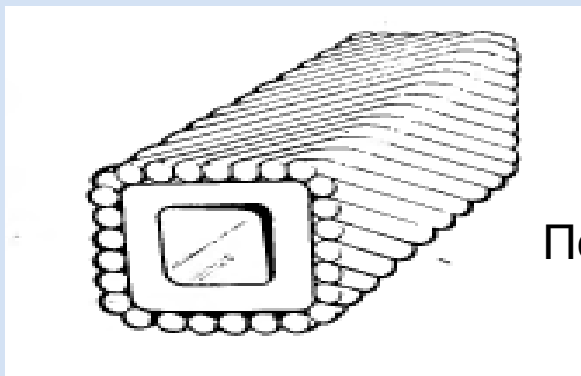
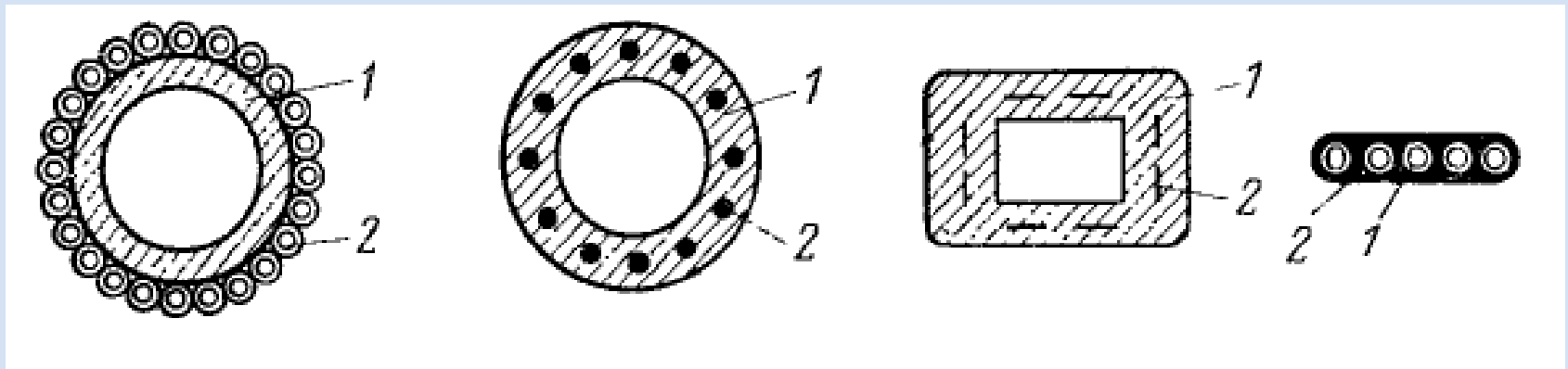


Сверхпроводящие провода и кабели, технология их изготовления



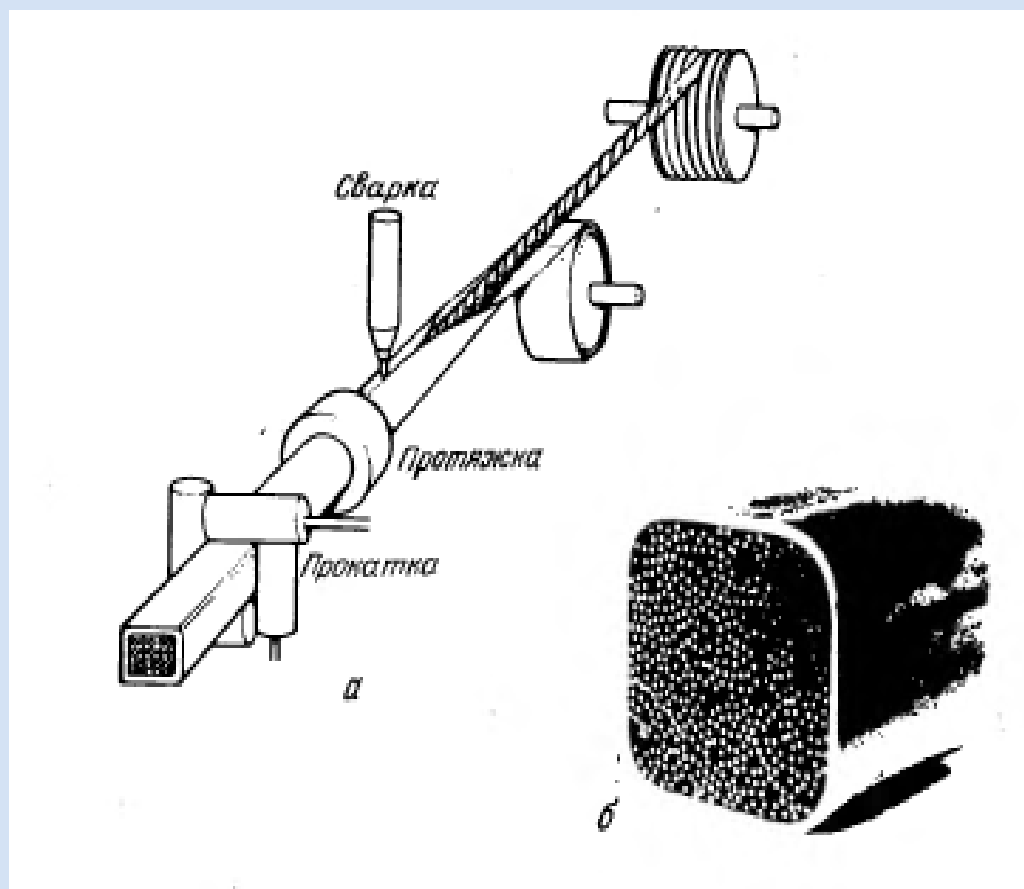
Кабель «резерфордского» типа

Сверхпроводящие провода и кабели, технология их изготовления



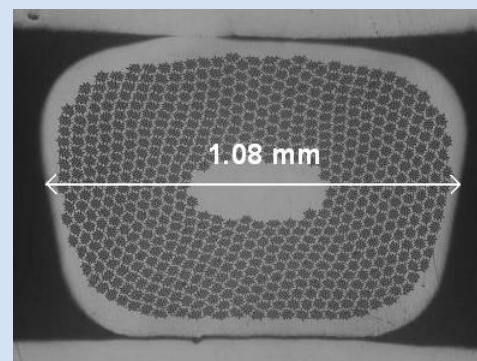
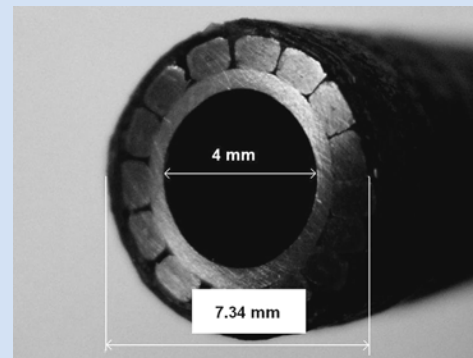
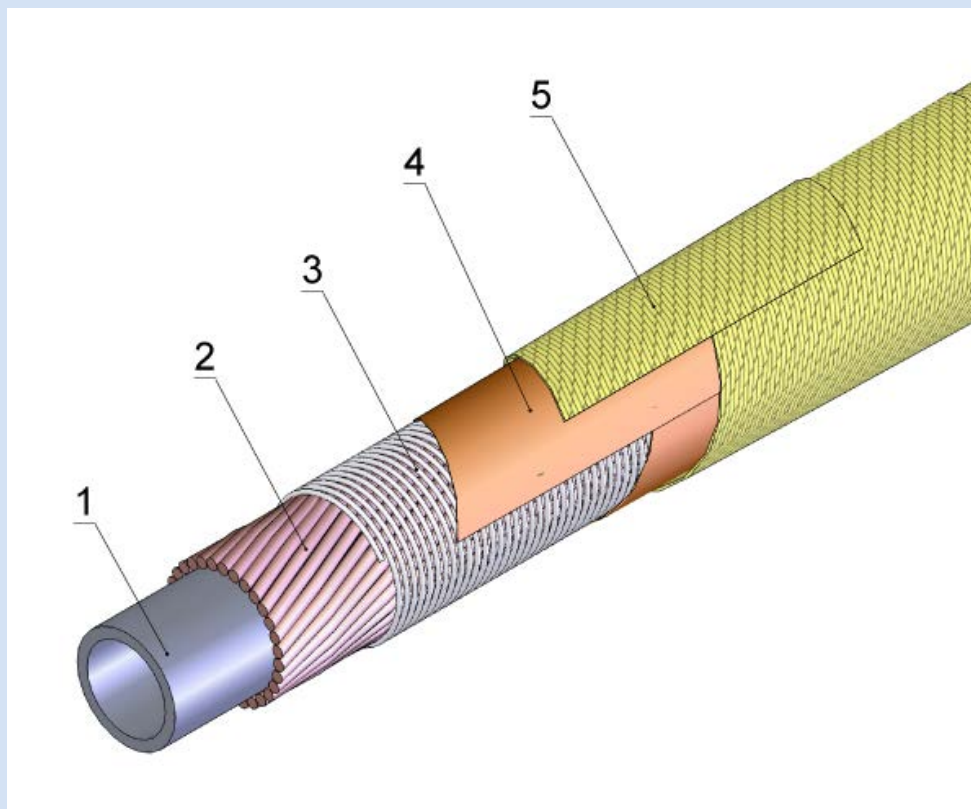
Полые проводники: 1 – медь, 2 – сверхпроводник.

Сверхпроводящие провода и кабели, технология их изготовления



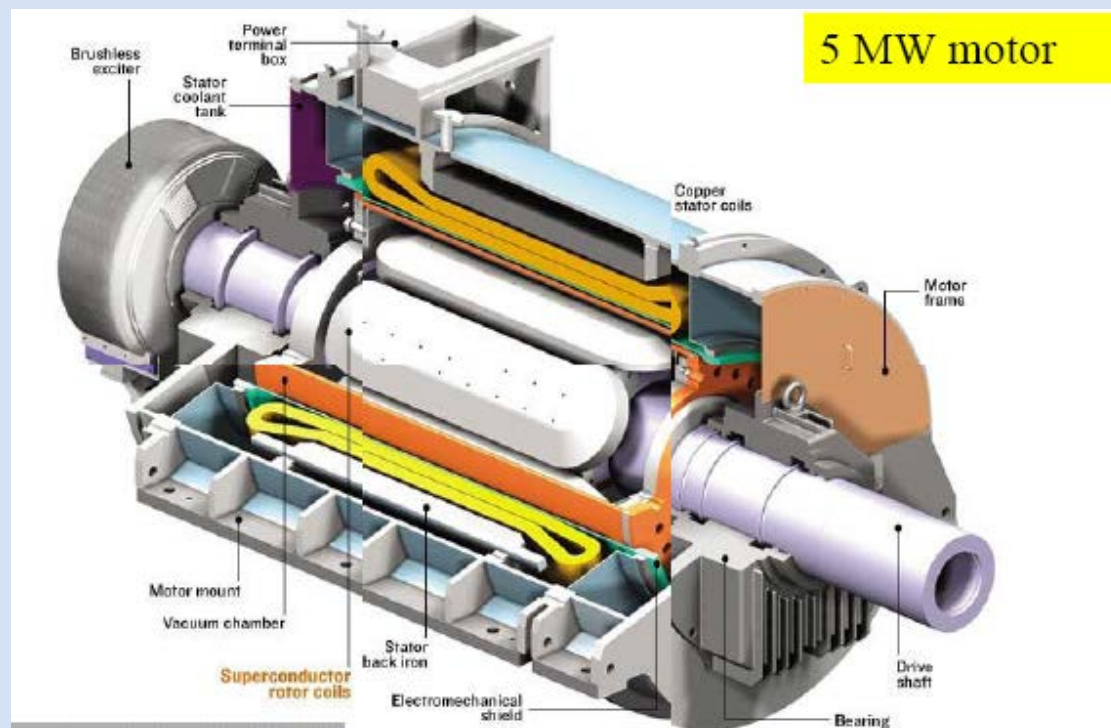
а – схема изготовления кабеля в оболочке, *б* – поперечное сечение кабеля

ВТСП провода и кабели, технология их изготовления

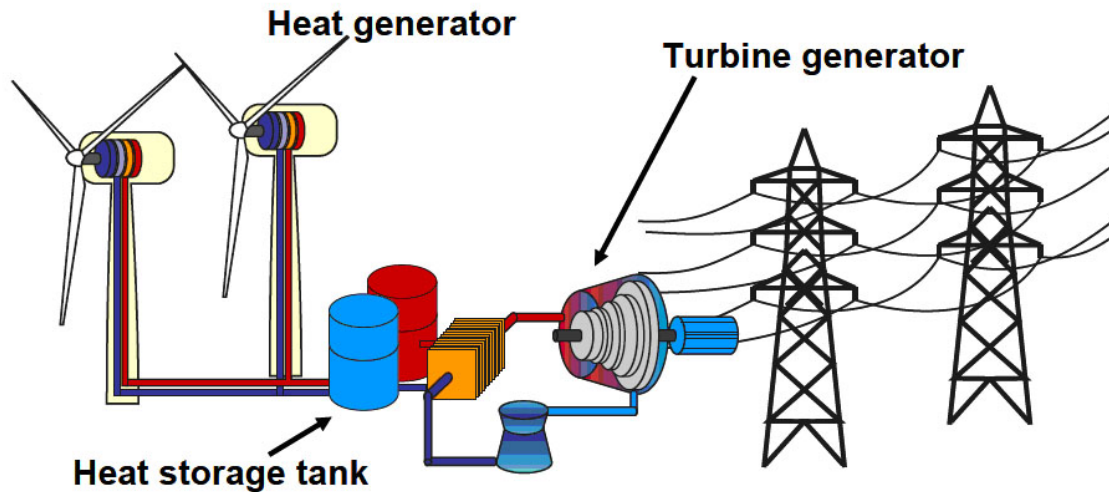


Трубчатый кабель: 1 – охлаждающая трубка, 2 – СП провод, 3 – бандажный провод, 4 – полиимидная лента, 5 – стеклолента, пропитанная эпоксидным компаундом.

ВТСП электромоторы



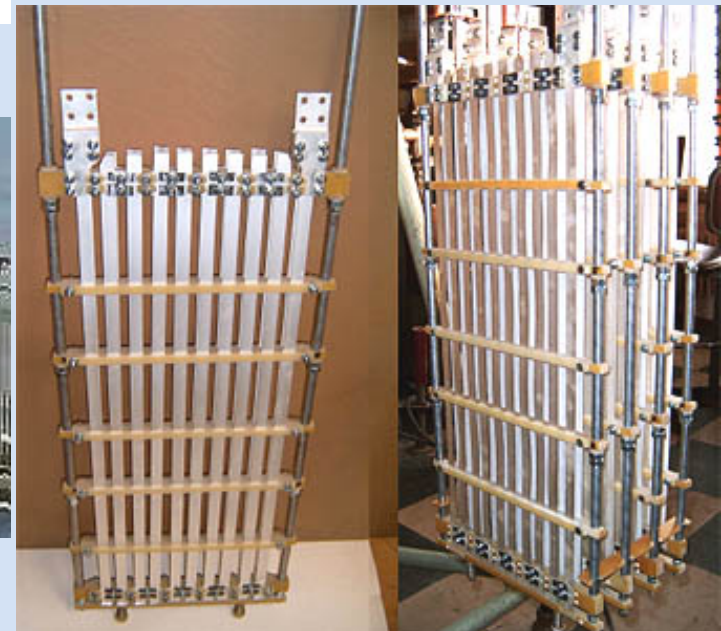
Энергетика



ВТСП
ветрогенератор.
Увеличение
мощности с 2-3
до 10 МВт, и КПД
(на ~ 30 %)

ВТСП
ограничитель
тока КЗ

Ограничение тока
до 1кА при токе КЗ
порядка 9 кА



ВТСП кабели в условиях городской застройки



3-ф кабель длиной 600м на острове Лонг-Айленд в системе энергоснабжения Нью-Йорка. Ток 2,4кА при напряжении 138 кВ и передаваемую мощность 574 МВА. Три фазы кабеля располагаются в отдельных криостатах, кабель проложен в условиях реальной городской застройки

ВТСП кабели в условиях городской застройки



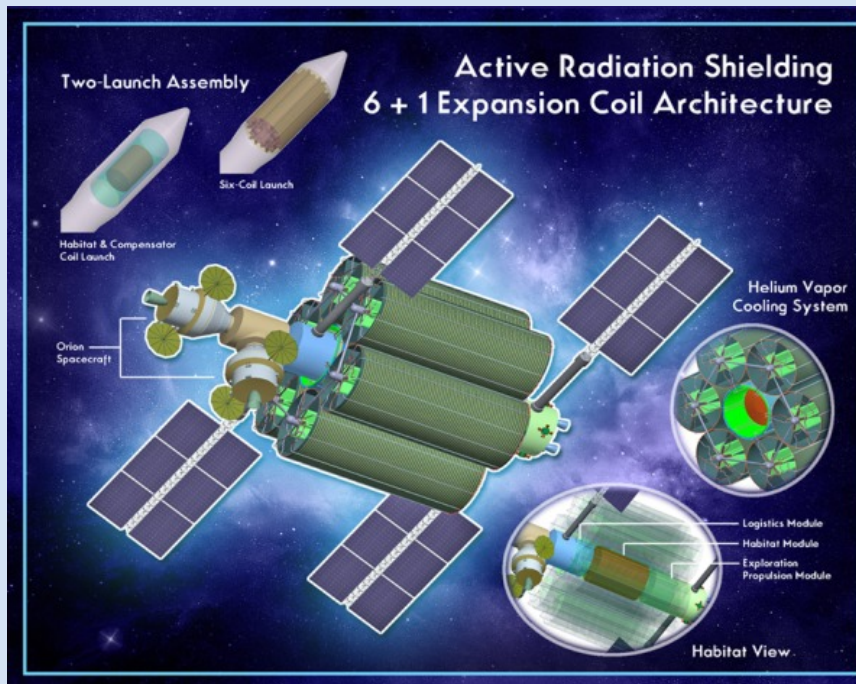
Передача электроэнергии по ВТСП линии пока дорога и потому далеко не всегда оправдана.

Затраты эксплуатации: на охлаждение N_2 , прокачку LN_2 .

Как компенсировать эти расходы ?

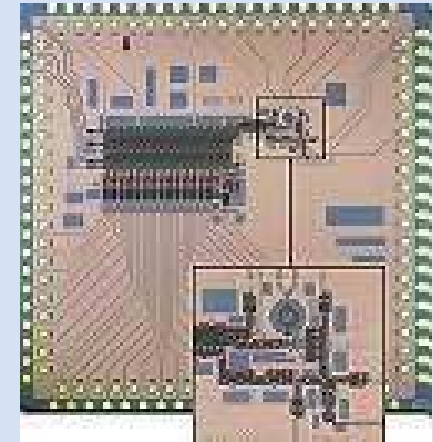
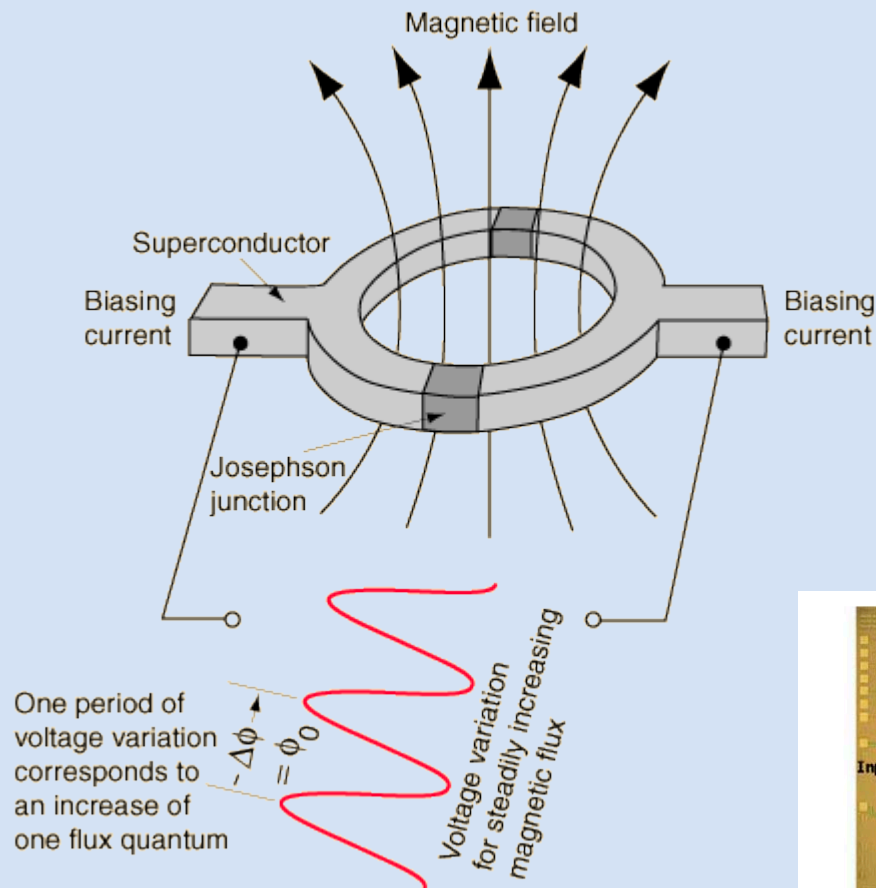
Передавать по криогенному трубопроводу не только LN_2 , но, одновременно, и жидкое топливо (водород, пропан)!

Магнитная защита космических кораблей от радиации

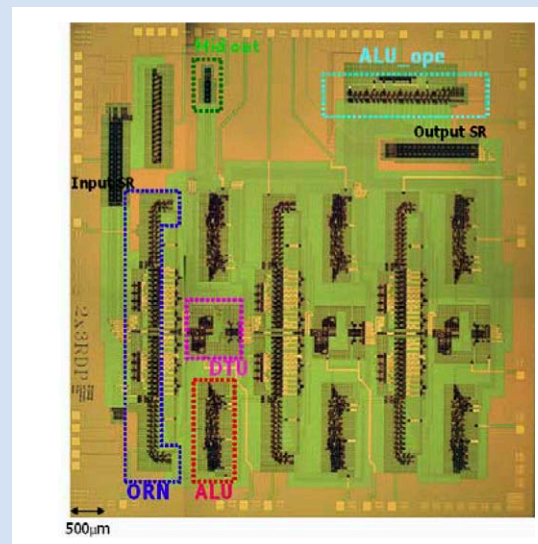


Сверхпроводниковая наноэлектроника.

СКВИД. Устройства на основе эффекта Джозефсона



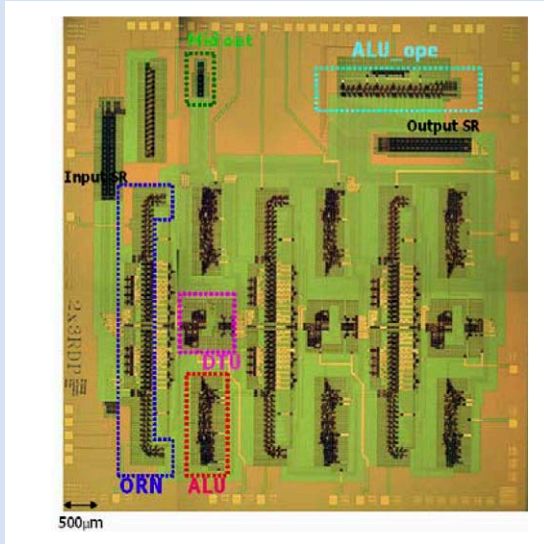
Сверхпроводящий микрочип с 6000 переходов Джозефсона .



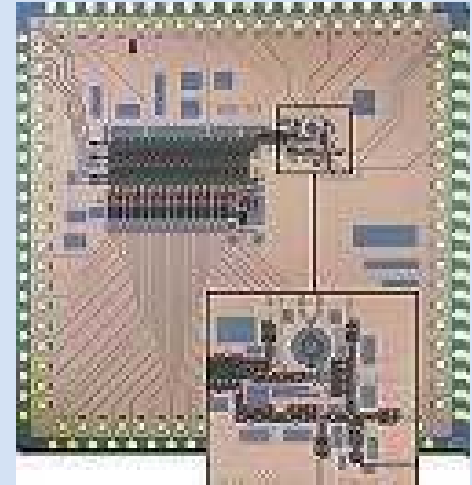
Микропроцессор с 14000 переходов

Сверхпроводниковая наноэлектроника.

СКВИД. Устройства на основе эффекта Джозефсона

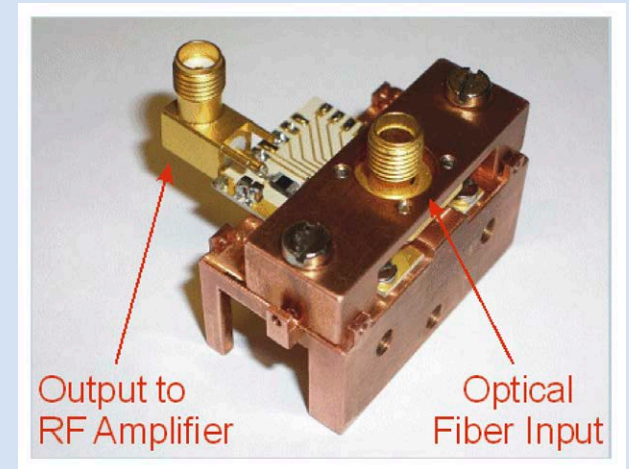


Микропроцессор с
14000 переходов



Сверхпроводящий микрочип с
6000 переходов Джозефсона .

Однофотонный
детектор



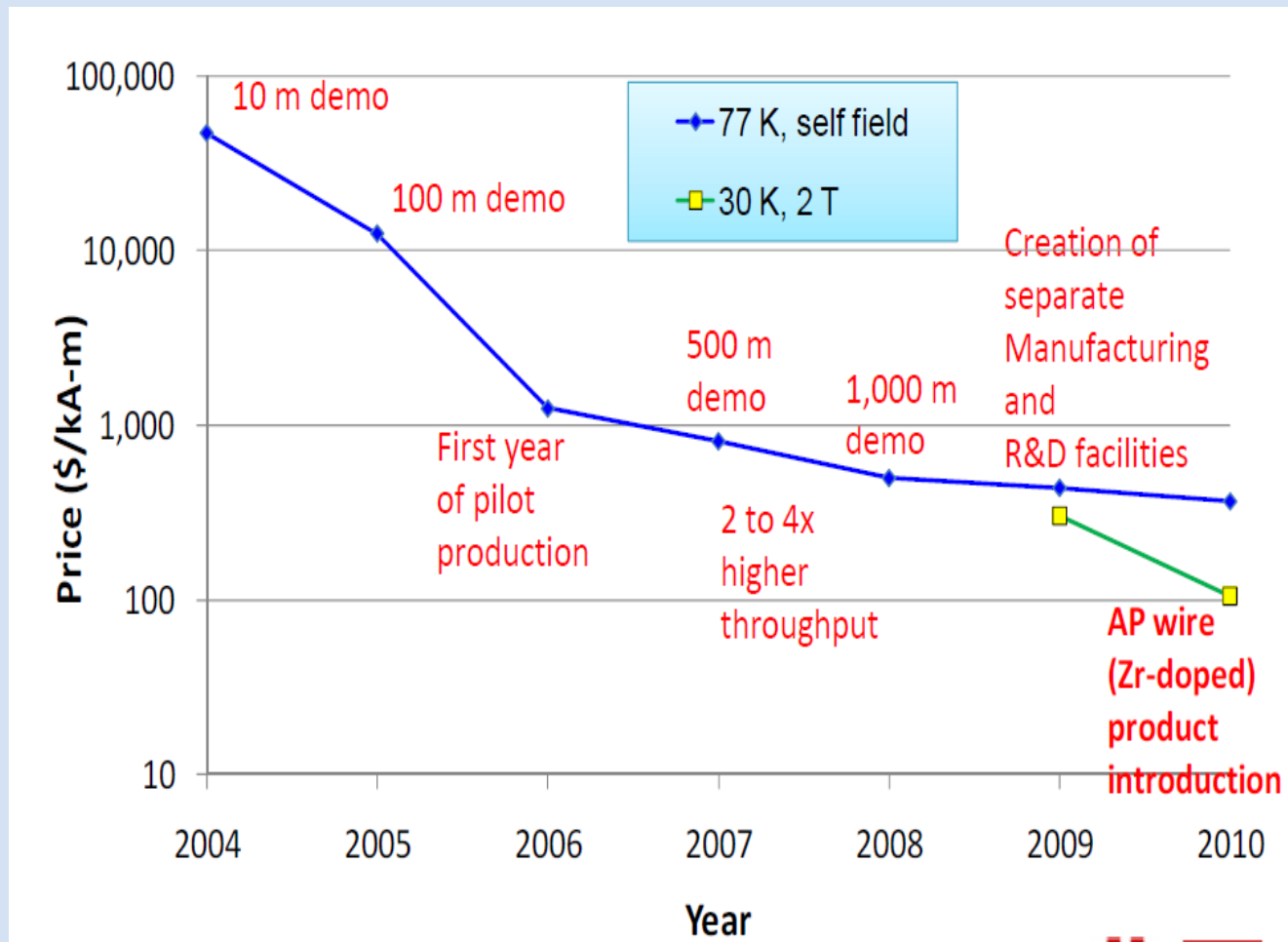
Высокотемпературные сверхпроводники

Стоимость технических обмоточных проводов

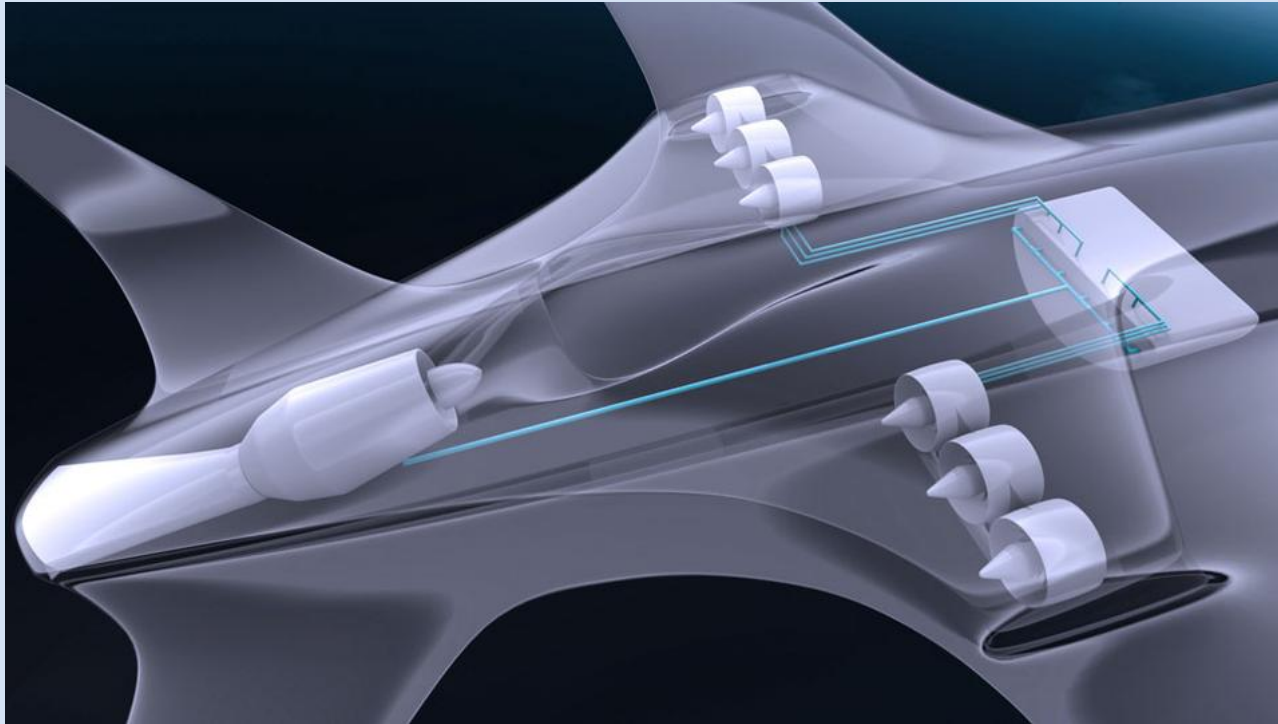
Материал	Стоимость, US \$ / кА·м
Медный провод $J \leq 2 \cdot 10^2 \text{ A/cm}^2$	15-25
NbTi провод ($T = 4,5 \text{ K}$, $J = 3 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$, $B = 5 \text{ Тл}$)	1-3
Nb ₃ Sn провод ($T \leq 10 \text{ K}$, $J = 5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, $B = 5 \text{ Тл}$)	10-20
MgB ₂ провод - лента ($T = 20 \text{ K}$, $J = 1 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2$, $B = 20 \text{ Тл}$)	10
ВТСП 2-го поколения – Y-123 покрытия на металлической подложке ($T \leq 77 \text{ K}$, $J = 1 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2$, в собственном поле)	400

Высокотемпературные сверхпроводники

Применение ВТСП сдерживается их стоимостью, малыми длинами (до 1,5 км), трудностями сшивки кусков. Технология совершенствуется и стоимость уменьшается.

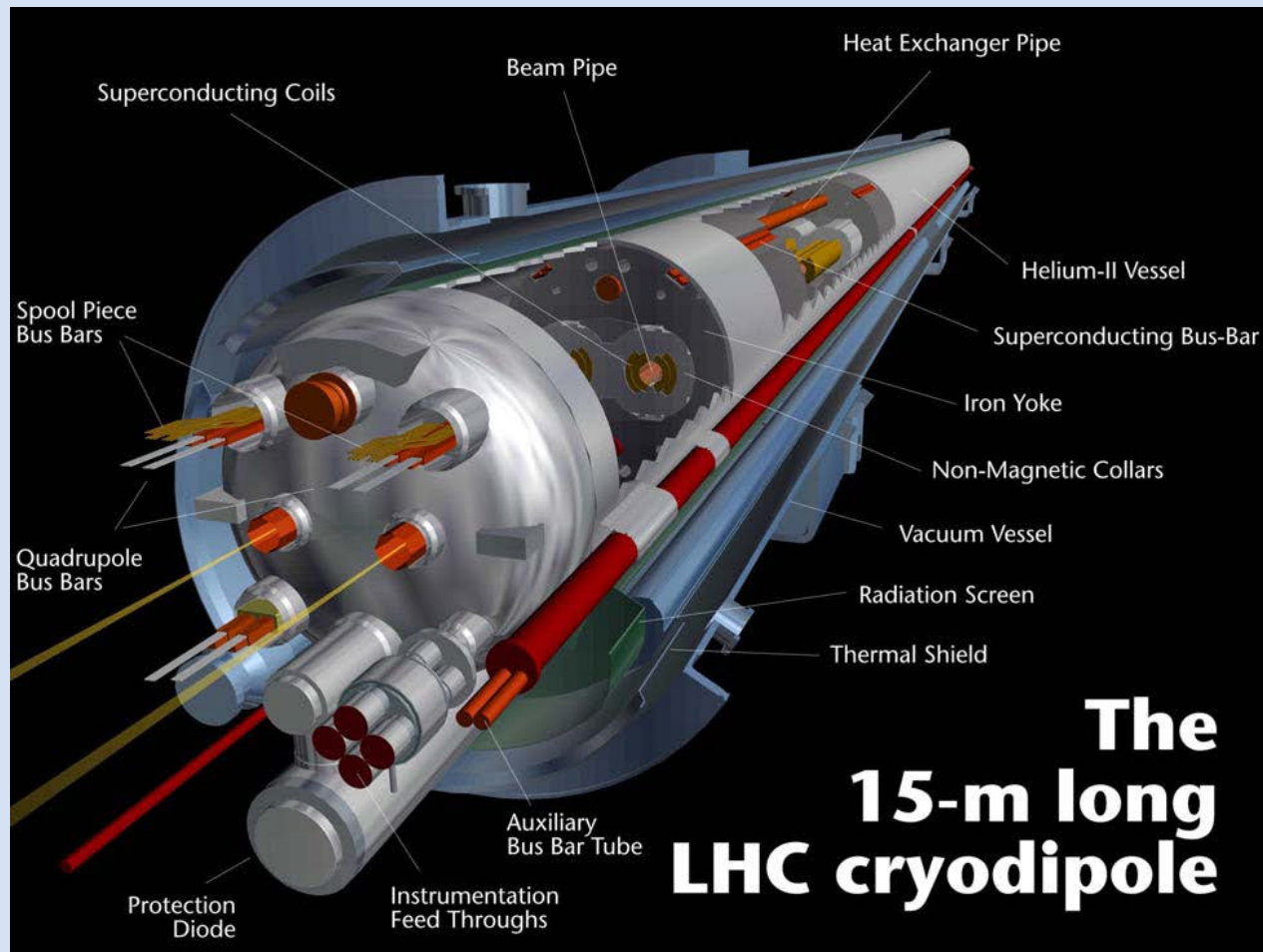


ВТСП в авиации



ВТСП магнитные системы для крупных научных установок

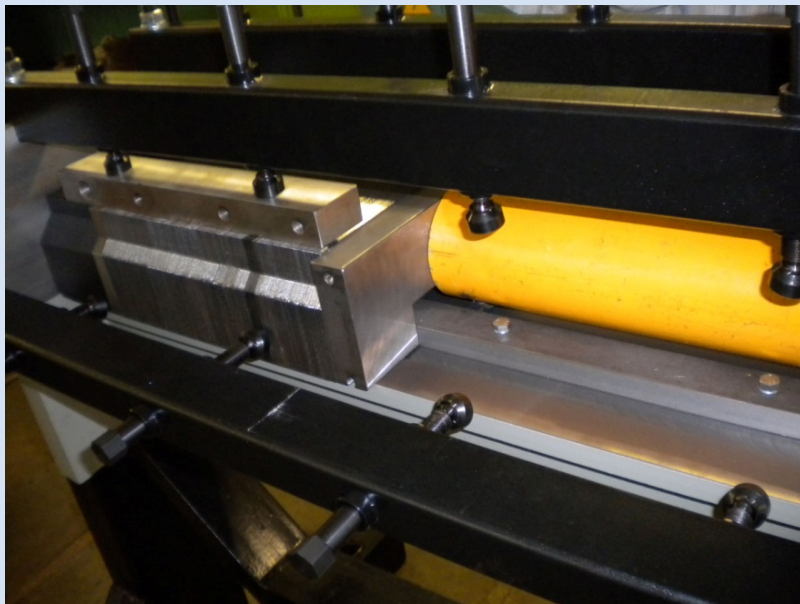
Сверхпроводящие магниты для синхротронов



Большой адронный коллайдер



Изготовление ярма магнита Бустера NICA



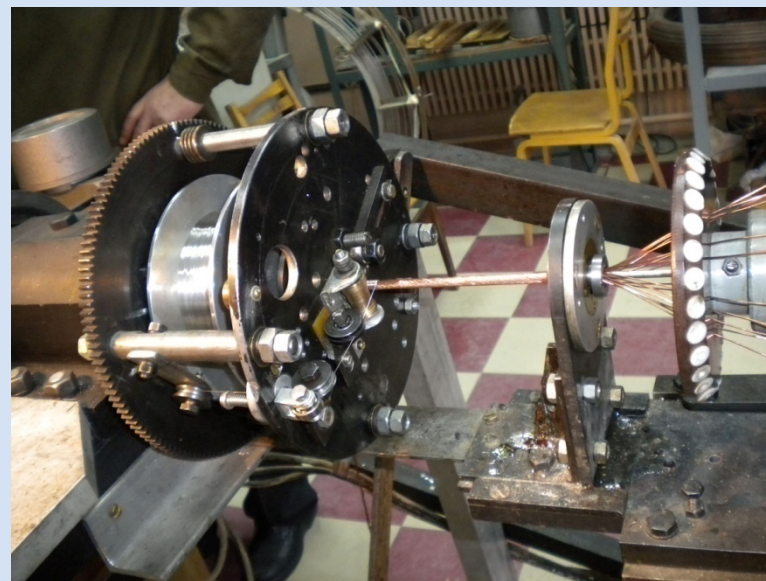
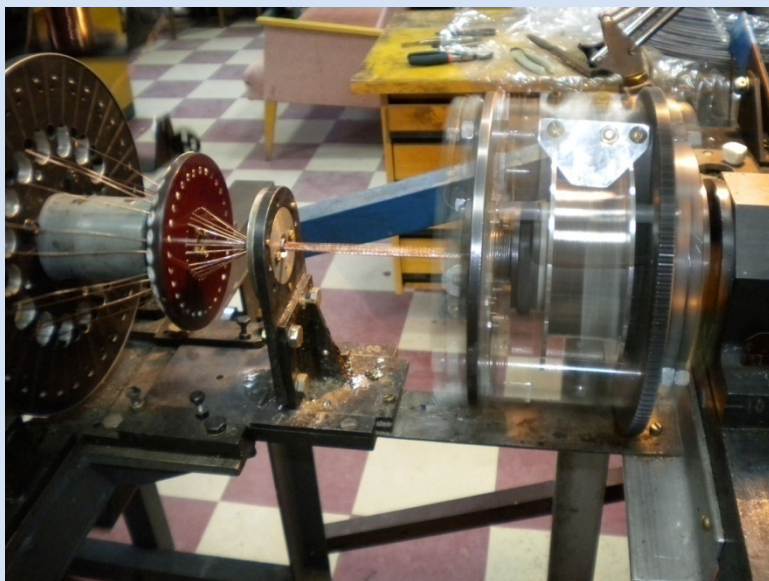
Сборка полуярма из пакета пластин и сжатие его в осевом направлении

Изготовление ярма магнита Бустера NICA



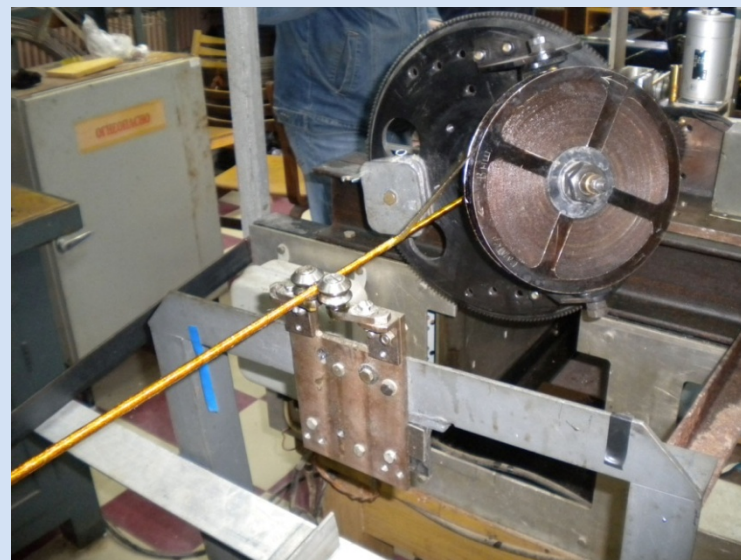
Пластины из электротехнической стали свариваются на стапеле с лобовыми, боковыми и верхними силовыми пластинами полуярма.

Изготовление сверхпроводящего трубчатого кабеля



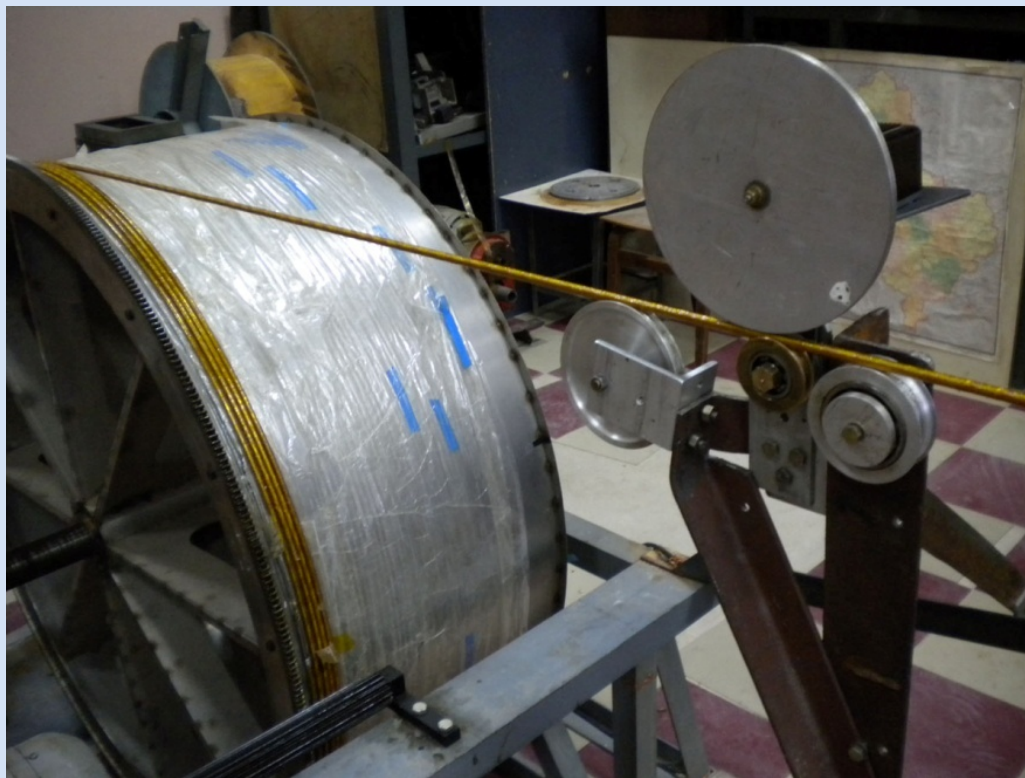
Направляющие устройства, фильера и устройство для нанесения бандажной проволоки.

Изготовление сверхпроводящего трубчатого кабеля



Нанесение электрической изоляции полиимидной (слева) и стеклолентой, пропитанной эпоксидным компаундом горячего отверждения (справа).

Изготовление сверхпроводящего трубчатого кабеля



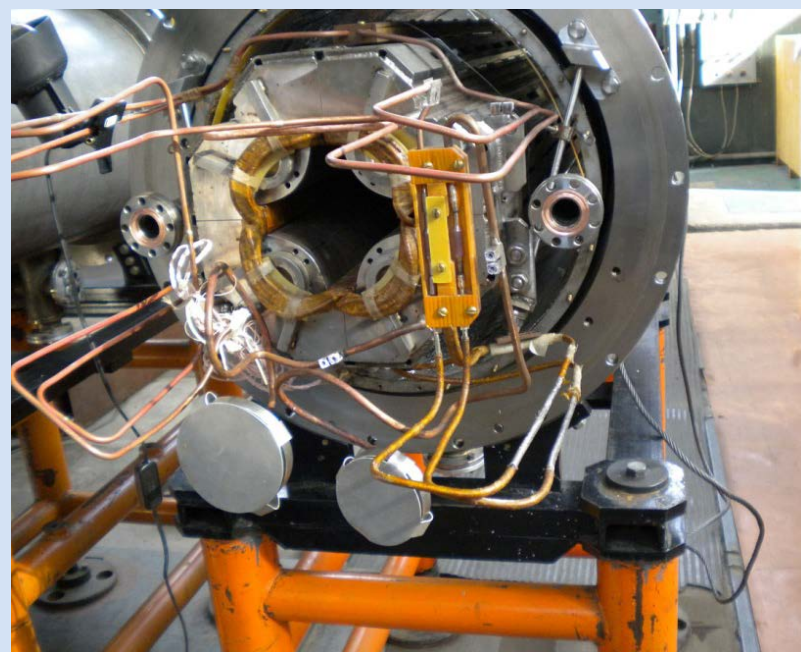
Приемный барабан готового кабеля.

Подготовка к криогенным испытаниям дипольного магнита для Бустера NICA



Монтаж магнита в криостат

Подготовка к криогенным испытаниям квадрупольного магнита для SIS100

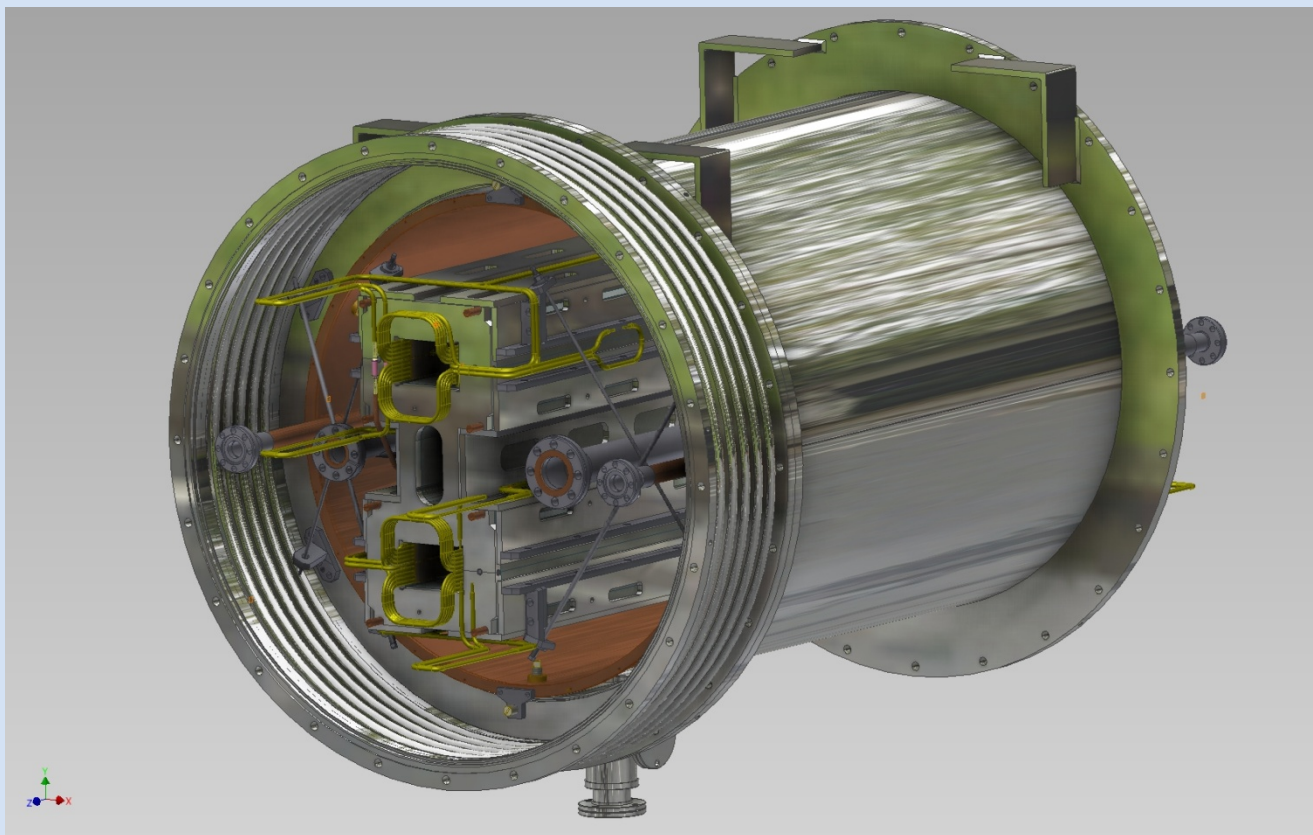


Магниты для Коллайдера NICA



Ярмо дипольного магнита Коллайдера NICA на стенде для вакуумных испытаний

Магниты для Коллайдера NICA



Дипольный магнит Коллайдера NICA в криостате

Какова роль научных исследований:

- Разработка теории ВТСП
- Новые идеи для реализации КТСП
- Создание новых ВТСП материалов с высокими T_c и H_c
- Изучение их свойств для проверки теор. моделей
- Разработка и исследование ВТСП и СП наноструктур (как для приборных применений, так и для изучения фундаментальных свойств квантовых материалов)
- Разработка новых, более дешевых технологий создания ВТСП материалов

Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов в ФИАН

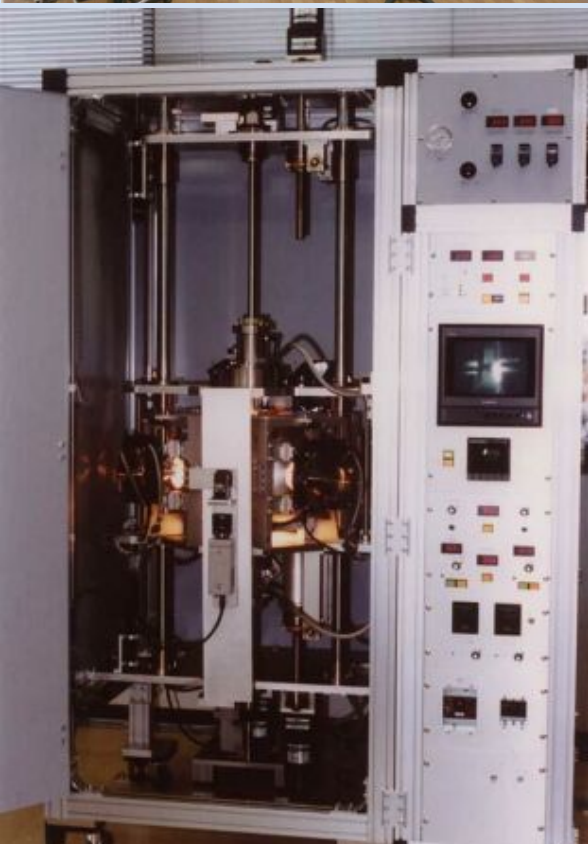
Глобальная цель исследований:



Важной, быть может, одной из самых важных проблем в области науки и технологии является создание **комнатно-температурных сверхпроводников.**

Академик, В.Л.Гинзбург,
Нобелевский лауреат

Центр ВСКМ ФИАН: синтез новых материалов, рост объемных монокристаллов, пленочные технологии Создание пленочных структур

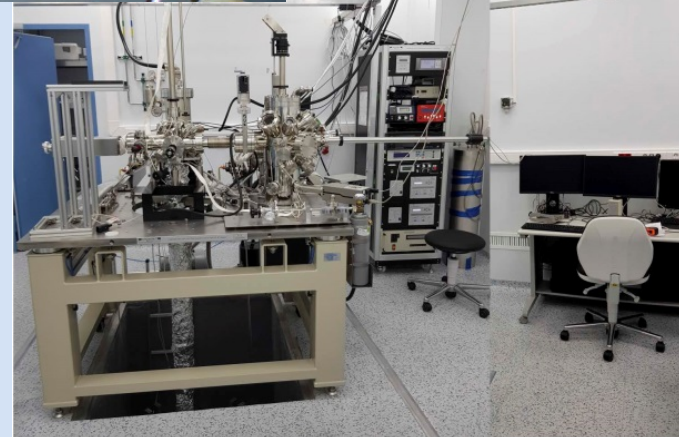


Печь для
бестигельного
роста кристаллов
с оптическим
нагревом до
2000С

Магнетронное напыление,



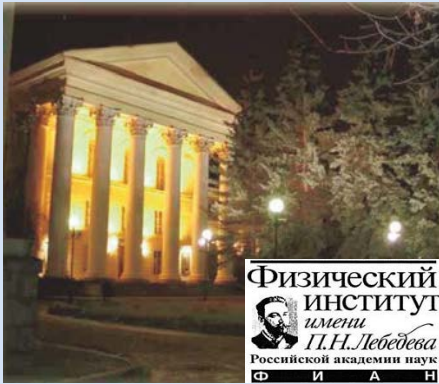
Исследования физических свойств



Иной путь к созданию КТСП



Создание ВТСП структур с помощью атомно-послойной укладки атомов методами Ван-дер Ваальсовой сборки, МПЭ и импульсного лазерного напыления



Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов ФИАН