

# ЛЕКЦИЯ 10

## *СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ*

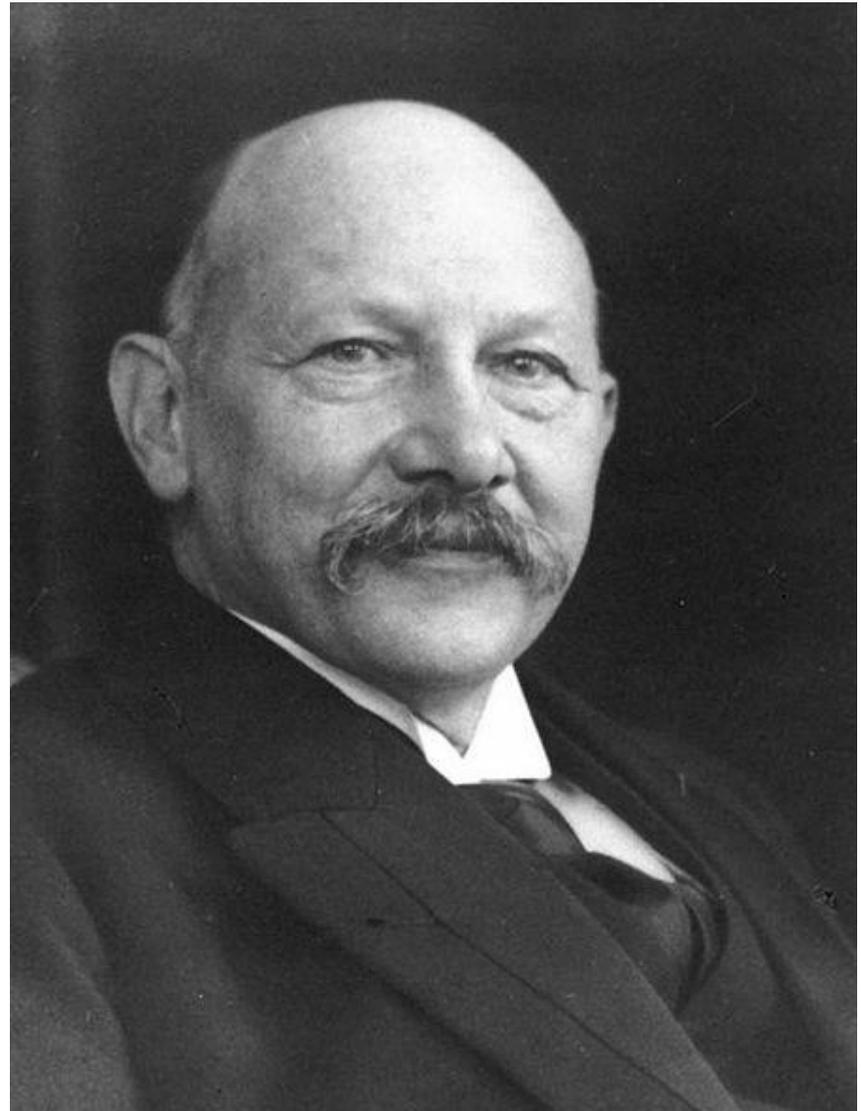
### ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Сверхпроводимость. Экспериментальные факты.
2. Понятие о теории сверхпроводимости.
3. Высокотемпературная сверхпроводимость.
4. Примеры использования сверхпроводящих материалов.

## *Сверхпроводимость. Экспериментальные факты.*

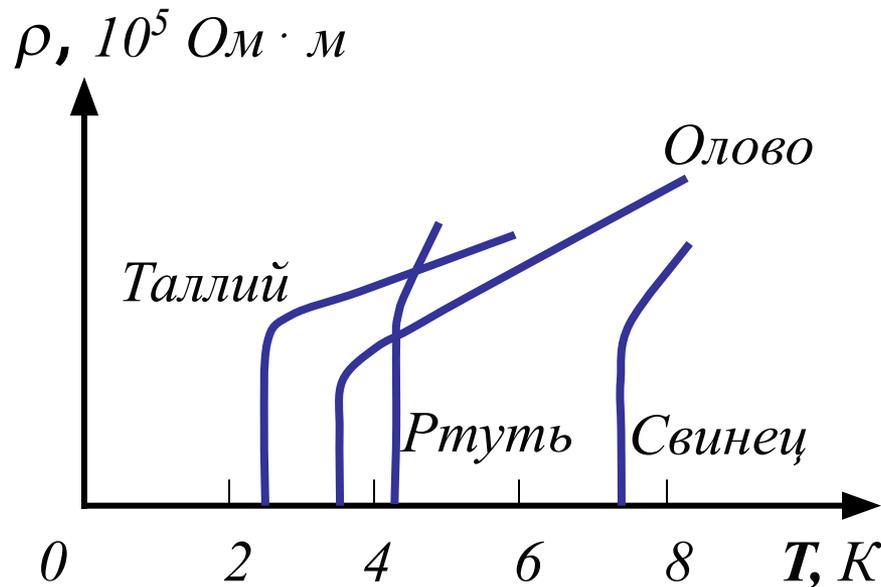
Первые наблюдения сверхпроводящего состояния - голландский физик Камерлинг-Оннес (1911г.). Предельно очищенная ртуть, температура меньше 4,15 К.

1913г. - **Нобелевская премия** по физике «за исследования свойств вещества при низких температурах, которые привели к производству жидкого гелия».



## Сверхпроводимость. Экспериментальные факты.

Температура  $T_c$  перехода в сверхпроводящее состояние — критическая температура перехода.



Таллий - 2,35К,  
олово - 3,73К,  
свинец - 7,19К.

Рисунок. Температурная зависимость удельного сопротивления проводников вблизи  $T_c$ .

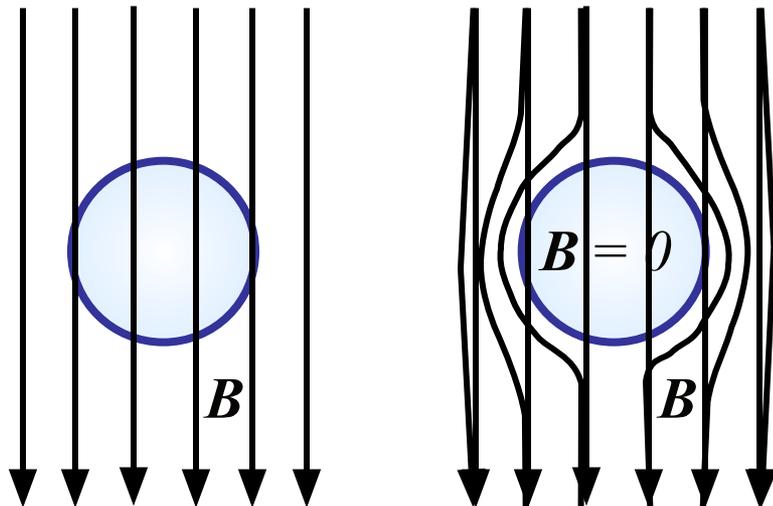
## Сверхпроводимость. Экспериментальные факты.

Свойства сверхпроводников:

1. Из закона Ома: напряженность электрического поля в любой точке сверхпроводника равна нулю.
2. Магнитное поле не проникает в толщу сверхпроводника, если  $B < B_c$ .  $B_c(T)$  - критическое значение магнитного поля.

Нормальное состояние  $T > T_c$

Сверхпроводящее состояние  $T < T_c$



3. Если металл поместить в магнитное поле с индукцией  $B < B_c$ , и понизить его температуру, то при переходе металла в сверхпроводящее состояние поле  $B$  выталкивается из образца.

Рисунок. Поведение магнитного поля с индукцией  $B < B_c$  в нормальном состоянии и в состоянии сверхпроводимости.

## ***Сверхпроводимость. Экспериментальные факты.***

Эффект «выталкивания» магнитного поля из объема сверхпроводника был открыт В.Мейсснером и Р.Оксенфельдом в 1933 году и называется *эффектом Мейсснера*.

Объяснение: при переходе металла в сверхпроводящее состояние в поле с индукцией  $B < B_c$  в поверхностном слое образца появляется незатухающий ток.

Ток создает собственное магнитное поле, компенсирующее внешнее поле.

4. Если металл перевести в сверхпроводящее состояние, а затем включить магнитное поле  $B < B_c$ , то поле не проникает в глубь металла.

Объяснение: Если бы в момент включения магнитного поля оно бы изменилось на какую-нибудь величину внутри металла, то в металле возникла бы индукционная ЭДС.

Появился бы индукционный ток, направленный по правилу Ленца так, чтобы собственным магнитным полем компенсировать внешнее поле.

## ***Сверхпроводимость. Экспериментальные факты.***

При нулевом сопротивлении сверхпроводника даже бесконечно малая ЭДС приведет к появлению тока, достаточного для компенсации внешнего магнитного поля внутри образца.

Следовательно, в толще образца магнитного поля быть не может.

5. Сильное внешнее магнитное поле  $B > B_c$  разрушает сверхпроводящее состояние.

6. Если усиливать ток через сверхпроводник, то при некотором значении тока сверхпроводящее состояние разрушается. Этот ток называют *критическим током*. Значение критического тока зависит от температуры.

## *Понятие о теории сверхпроводимости.*

Создатели теории сверхпроводимости - американские физики Бардин, Купер и Шриффер, независимо от них советский математик и физик Боголюбов.

*Теория БКШ* интерпретирует сверхпроводимость как сверхтекучесть электронной жидкости через кристаллическую решетку.

Теория сверхпроводимости сложна. Некоторые идеи теории:

Почему проводники обладают электрическим сопротивлением?  
Из лекции 9: Свободные электроны в металле находятся в потенциальной яме, заполненной до уровня Ферми.

Электрическое поле вызывает дрейф свободных носителей заряда.

При постоянной напряженности электрического поля скорость дрейфа достигает постоянного значения.

Это возможно, если сила действия электрического поля на электрон компенсируется силой  $F_c$ .

## ***Понятие о теории сверхпроводимости.***

Иначе электропроводность была бы бесконечной.

Из-за дефектов кристаллической решетки происходит рассеяние электронов и проводимость оказывается конечной.

Для возникновения сверхпроводимости при низких температурах должен заработать механизм, который компенсировал бы или снял силы сопротивления, действующие на электроны со стороны кристаллической решетки.

Основная идея сверхпроводимости: свободные электроны в металле испытывают особый вид взаимного притяжения, которое в сверхпроводящем состоянии преобладает над отталкиванием.

В результате электроны проводимости объединяются в связанные пары (*куперовские пары*).

Объединение происходит следующим образом.

Электроны проводимости движутся в кристаллической решетке металла, которая образована положительно заряженными ионами.

## *Понятие о теории сверхпроводимости.*

При взаимодействии с ионами электроны как бы смещают ионы от положения равновесия, создавая за собой избыточный положительный заряд.

Смещение ионов сопровождается появлением поляризационной волны в кристалле.

Поляризационная волна своим электрическим полем действует на электроны. В итоге к электрону, вызвавшему локальную поляризацию кристалла, может быть притянут другой электрон.

Это притяжение происходит через промежуточную среду, роль которой играет кристаллическая решетка.

Такое взаимодействие наиболее сильно проявляется у электронов с противоположно направленными спинами.

В результате взаимодействия суммарный спин пары будет равен нулю, и она представляет собой бозон.

## *Понятие о теории сверхпроводимости.*

Бозоны стремятся накапливаться в основном энергетическом состоянии (не возбужденном).

Следовательно, куперовские пары, придя в согласованное движение, остаются в этом состоянии неограниченно долго. Такое согласованное движение пар и есть ток сверхпроводимости.

Наряду с парами всегда имеются электроны, движущиеся по кристаллу нормальным образом

Чем ближе температура к критической, тем больше становится доля нормальных электронов.

При критической температуре куперовские пары разрушаются.

## ***Высокотемпературная сверхпроводимость.***

Практическое использование сверхпроводимости: линии электропередач без джоулевых потерь, быстродействующие элементы ЭВМ, электромагниты со сверхпроводящими обмотками для создания сверхсильных магнитных полей и т.д.

Все преимущества экономически невыгодны и технически трудно реализуемы, если  $T_c$  ниже 25 К.

$T_c < 25$  К → жидкий гелий → *очень дорого*.  
Низкотемпературная сверхпроводимость.

$T_c > 25$  К → жидкий водород → *дорого*, но уже выгодно.  
Среднетемпературная сверхпроводимость.

$T_c > 90$  К → жидкий азот → *очень недорого* (в 1000 раз дешевле производства жидкого гелия). Очень выгодно.  
Высокотемпературная сверхпроводимость - ВТСП .

$T_c > 300$  К → вода → голубая мечта.

Комнатно-температурная сверхпроводимость - КТСП .

## ***Высокотемпературная сверхпроводимость.***

Анализ проблемы ВТСП как реальной физической проблемы - 1964 г. - Литтл и Гинзбург.

### Направления усилий физиков:

- попытки создания теорий ВТСП (преимущественно феноменологических);
- поиск и синтез материалов с высокими  $T_c$ . Купраты.

До 1986 г. - достигнута  $T_c=23,9$  К на соединении  $Nb_3Ge$ .

В 1986 г. - «прорывные» результаты в системе  $Ba - La - Cu - O$ . Созданы материалы с  $T_c=30$  К.

К 1990 г. - синтезированы материалы с  $T_c = 40$  К, 70 К и 125 К.

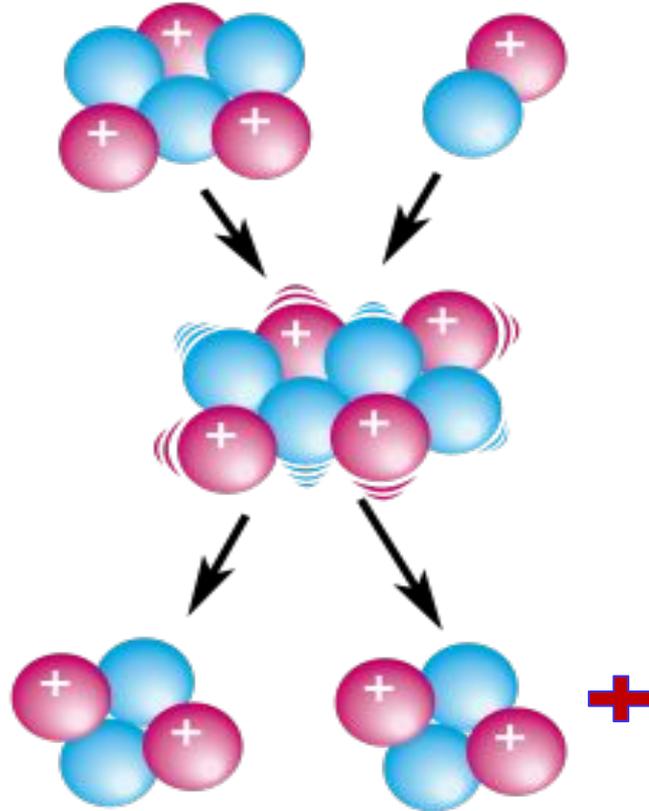
Настоящее время: выяснение механизмов сверхпроводимости в созданных сложных соединениях, стабилизация свойств сверхпроводников, практическое использование сверхпроводящих материалов.

# Примеры использования сверхпроводящих материалов

## Экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР

Термоядерная реакция:

### *Схема термоядерного синтеза*



*Дейтерий* (тяжелый водород)+ *Тритий*  
(сверхтяжелый водород):  ${}^2\text{H} + {}^3\text{H}$

Реакция, осуществимая при наиболее низкой температуре —  $10^7 \text{ K}$

Два ядра: дейтерия и трития сливаются, с образованием ядра гелия (альфа-частица) и высокоэнергетического нейтрона.

Плюс - значительный выход энергии.

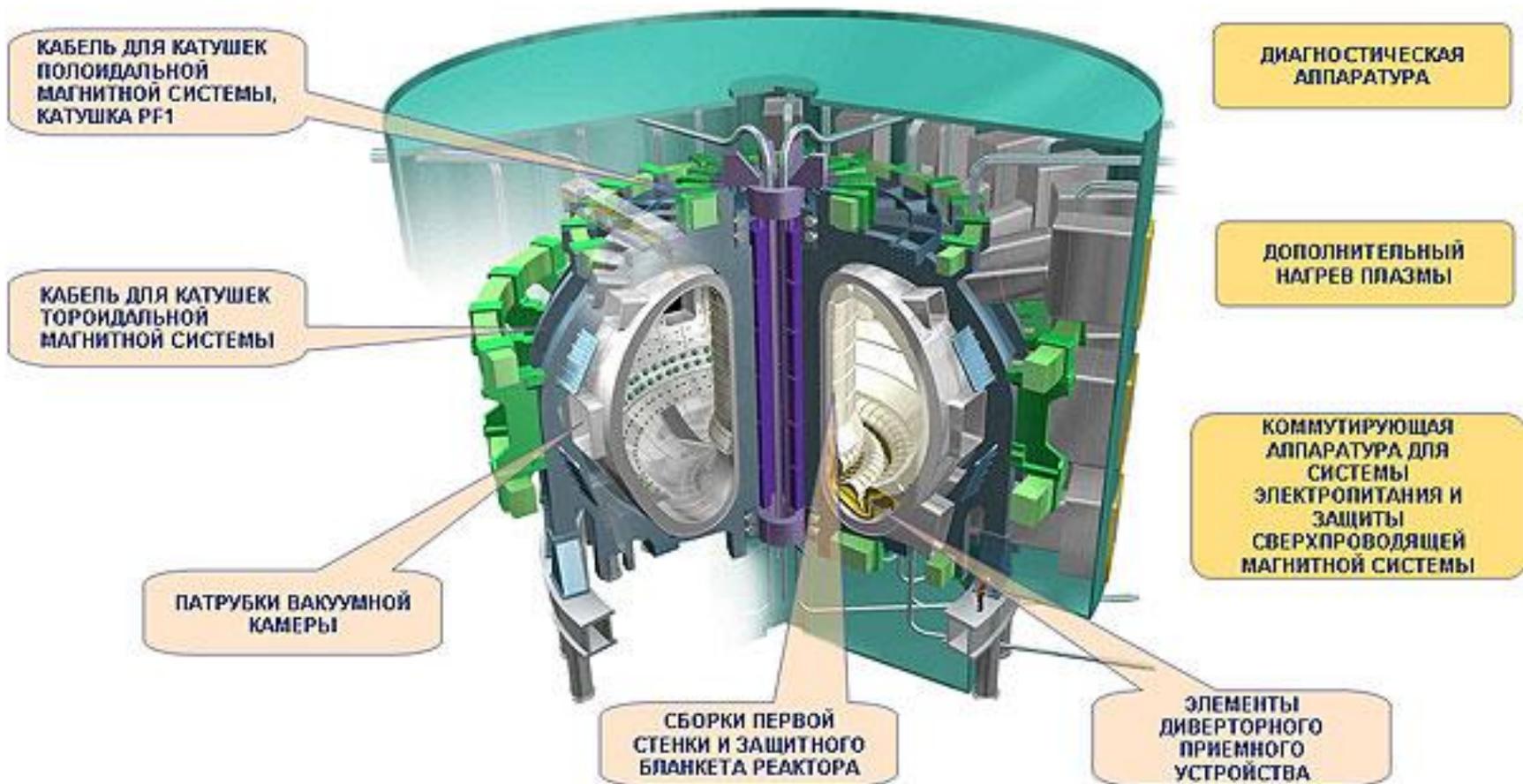
Недостатки — высокая цена трития, выход нежелательной нейтронной радиации/



# Примеры использования сверхпроводящих материалов

## Экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР

Тип реактора - **ТОКАМАК** (ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками)



# Примеры использования сверхпроводящих материалов

## Экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР

Основные технические характеристики реактора:

Полная термоядерная мощность, МВт	500 (700)
Отношение термоядерной мощности к мощности дополнительного нагрева, Q	$\geq 10$
Средняя нейтронная нагрузка на стенку, МВт/м <sup>2</sup>	0,57 (0,8)
Время горения плазмы в индуктивном режиме работы, сек	$\geq 400$
Большой радиус плазмы, м	6,2
Малый радиус плазмы, м	2,0
Ток плазмы, МА	15 (17)
Вертикальная вытянутость плазмы - отношение вертикального размера к горизонтальному (верх/низ)	1,7 / 1,85
Треугольность плазмы (верх/низ)	0,33 / 0,49
Тороидальное магнитное поле на оси, Т	5,3
Объем плазмы, м <sup>3</sup>	837
Площадь поверхности плазмы, м <sup>2</sup>	678
Мощность дополнительного нагрева, МВт	73

Токамак - тороидальная установка для магнитного удержания плазмы.

Первый токамак - 1955 г.

1968г. - в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова достигнута температура плазмы 10 млн. градусов.

В настоящее время токамак считается наиболее перспективным устройством для осуществления управляемого термоядерного синтеза.

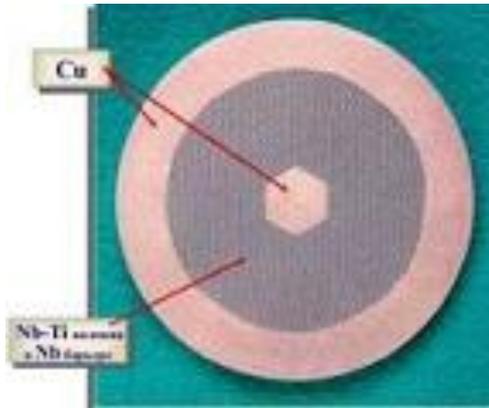
Первоначальная стоимость (оценки) - 5 миллиардов евро, окончание - 2016 г.

Настоящее время - 19 миллиардов, срок начала экспериментов - 2025 г.

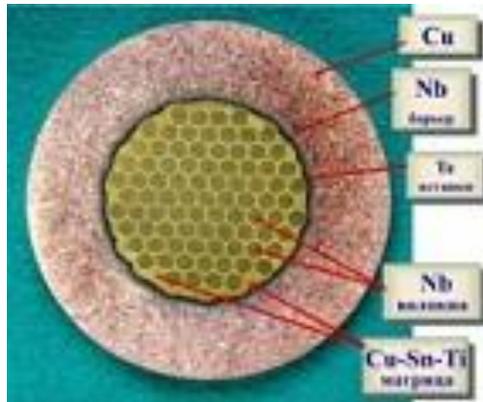
# Примеры использования сверхпроводящих материалов

## Экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР

Сверхпроводящий кабель из NbTi и Nb<sub>3</sub>Sn производится в России.



Свойства NbTi сверхпроводника для ИТЭР:  
 Диаметр сверхпроводника:  $0.730 \pm 0.005$  мм  
 Длина единичного куска: не менее 1000 м  
 Количество волокон: 4488  
 Критический ток:  $>306$  А



Свойства Nb<sub>3</sub>Sn сверхпроводника для ИТЭР:  
 Диаметр сверхпроводника:  $0.820 \pm 0.005$  мм  
 Длина единичного куска: не менее 1000 м  
 Количество сдвоенных волокон: 9540  
 Критический ток:  $>190$  А

## Примеры использования сверхпроводящих материалов

### Экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР

Сварочные электронные пушки с плазменным катодом для дегазации и герметизации изделий.



Ниобий - титановый сплав с оболочкой из меди.

Общая физика. ЯВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ.

## **Примеры использования сверхпроводящих материалов**

### **Большой адронный коллайдер (БАК)**

БАК - ускоритель заряженных частиц на встречных пучках протонов и тяжёлых ионов (ионов свинца).

Коллайдер построен на границе Швейцарии и Франции, недалеко от Женевы.

БАК - самая крупная экспериментальная установка в мире.

Длина основного кольца - 26 659 м.

Пучки частиц ускоряются в противоположных направлениях и сталкиваются в специальных точках столкновения.

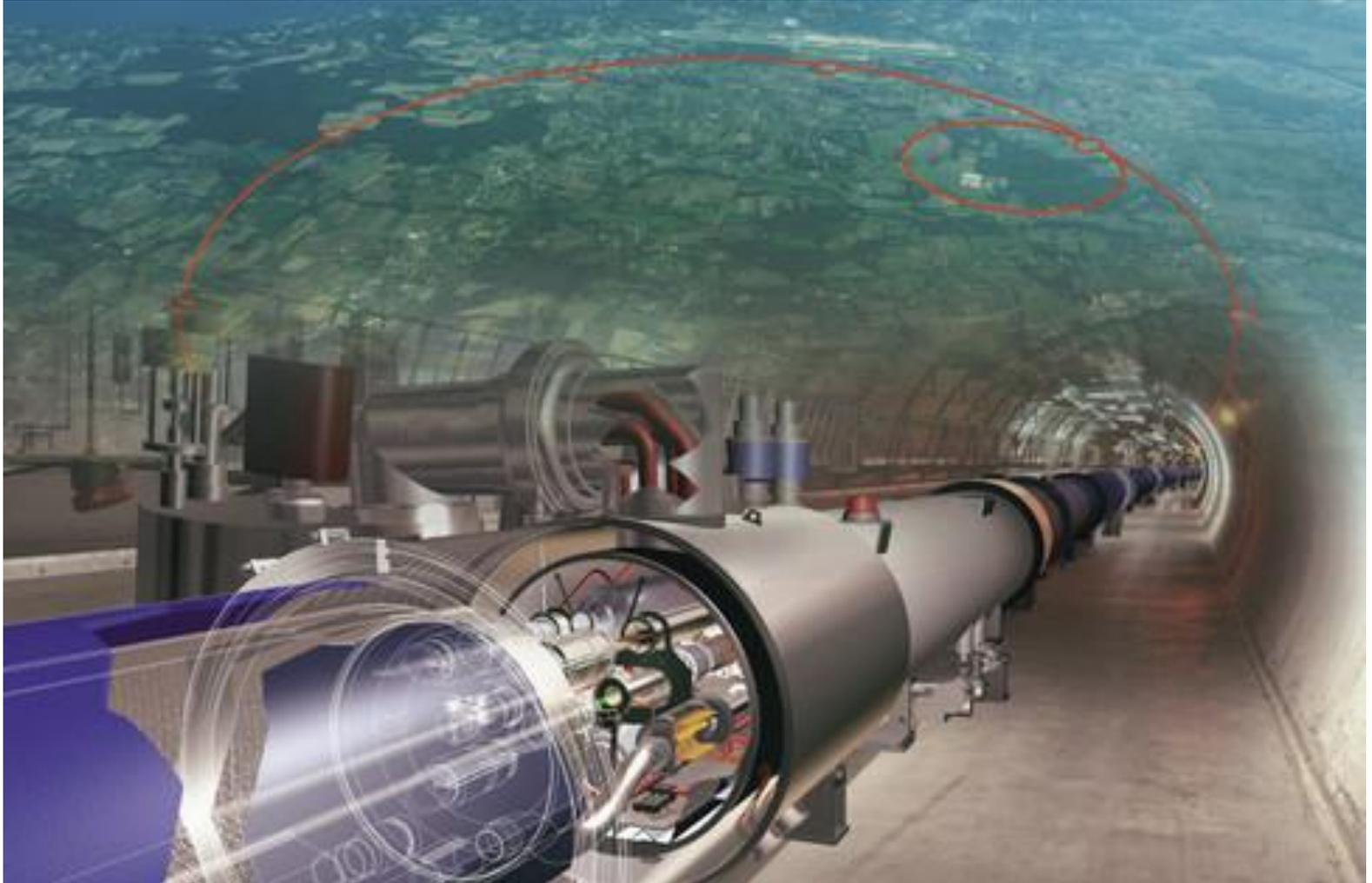
Стоимость проекта €3.2–6.4 млрд. Коллайдер расположен в туннеле длиной 26,7 км, который проложен на глубине ста метров под землёй в горах.

Для удержания протонных пучков используются 1 624 сверхпроводящих магнита, общая длина которых превышает 22 км.

Для охлаждения магнитов проложена специальная криогенная линия.

# Примеры использования сверхпроводящих материалов

## Большой адронный коллайдер (БАК)



## **Примеры использования сверхпроводящих материалов** **Большой адронный коллайдер (БАК)**



**Общая физика. ЯВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ.**

# Примеры использования сверхпроводящих материалов

## Большой адронный коллайдер (БАК)



# Примеры использования сверхпроводящих материалов

## Большой адронный коллайдер (БАК)

Авария – 2008г. Выброс жидкого гелия в тоннель ускорителя. Ремонт – 1 год

