

# \* **Физические основы сверхпроводимости**

Лекция № 4



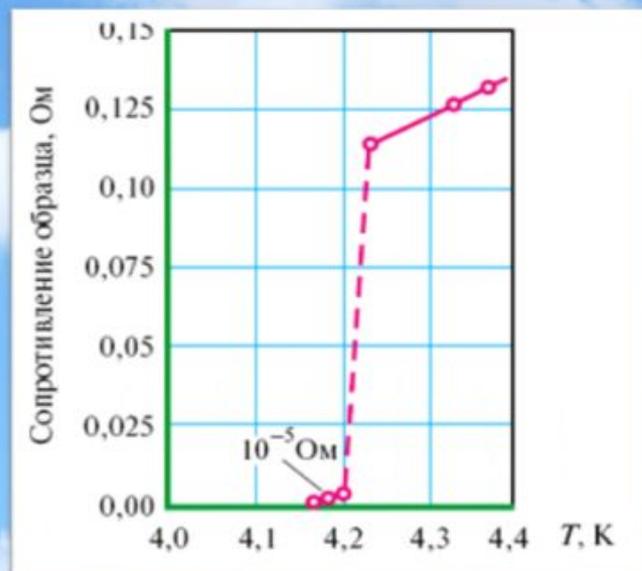
**Хейке Камерлинг-Оннес (21.09.1853-21.02.1926) – голландский физик и химик, лауреат Нобелевской премии по физике 1913 года «за исследования свойств вещества при низких температурах, которые привели к производству жидкого гелия».**

**В 1911 году обнаружил, что при 4,15 Кельвинах (около  $-270$  С) электрическое сопротивление ртути практически равно нулю.**

**Это явление получило название СВЕРХПРОВОДИМОСТИ. Камерлинг-Оннес заслужил у коллег почётное прозвище «Господин Абсолютного Нуля».**

- \* В 1911 году, в Голландии, в лаборатории низких температур Х. Камерлинг-Оннес открыл явление сверхпроводимости. Он замораживал в жидком гелии ртуть и пропускал через нее электрический ток.
- \* По мере снижения температуры, сопротивление ртути убывало. Как только температура опустилась до 4,12 К, ее сопротивление резко упало до нуля, оно совсем исчезло.
- \* Вот слова самого Камерлинг-Оннеса: «Таким образом, при 4,12 градусов выше абсолютного нуля, ртуть переходит в новое состояние, которое можно назвать «сверхпроводящим»».

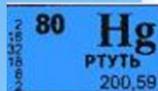
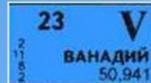
- \* Сверхпроводимость - это квантовое явление, при котором течение электрического тока в материале происходит без диссипации энергии.
- \* Характеризуется падением до нуля электрического сопротивления при охлаждении сверхпроводника ниже определенной температуры, которая называется температурой сверхпроводящего перехода ( $T_c$ ) и определяется для каждого конкретного материала



**Рисунок 1** – Рисунок скопирован с одной из первых работ Камерлинг–Оннеса, посвященной сверхпроводимости.

По современным данным, график надо сдвинуть на 0,05 К – у Камерлинг–Оннеса была неточная шкала температур.

\* По закону Джоуля - Ленца количество теплоты, выделяющееся при прохождении электрического тока по проводнику, возрастает пропорционально его длине и электрическому сопротивлению, что приводит к огромным потерям, например в сегодня используемых медных и алюминиевых проводах из-за существенного электрического сопротивления. Если сделать провода из сверхпроводящего материала, то можно минимизировать электрические потери.

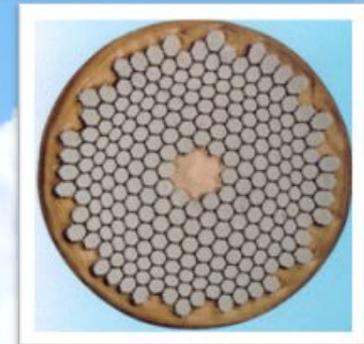
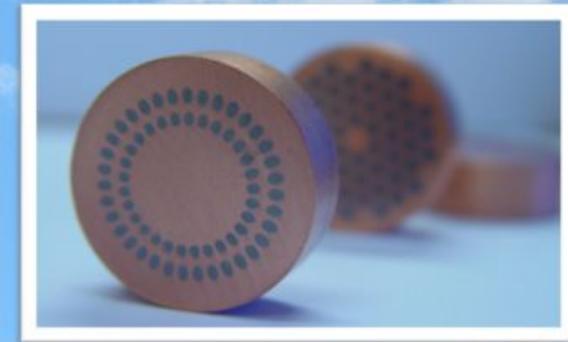


Известны несколько сотен соединений, чистых элементов, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние.

Например, к сверхпроводникам относятся: алюминий, свинец, ртуть, тантал, ванадий, ниобий, олово, сплав ртути с золотом и оловом и т.д..

## Классификация сверхпроводящих материалов

- 1. По отклику на магнитное поле:** сверхпроводники I рода (это чистые вещества, у которых наблюдается полный эффект Мейснера); сверхпроводники II рода (это вещества, в которых эффект Мейснера проявляется частично);
- 2. По их критической температуре:** низкотемпературные (ниже температуры кипения азота) и высокотемпературные;
- 3. По материалу:** чистый химический элемент, сплавы, керамика, сверхпроводники на основе железа, органические сверхпроводники и т. п.



- \* Температура перехода проводника в сверхпроводящее состояние  $T_c$  у каждого вещества своя. Например: алюминий (1,18 К), свинец (7,26 К), ртуть (4,15 К), тантал (4,38 К), ванадий (5,30 К), ниобий (9,20 К), олово (3,69 К).
- \* Для наблюдения явления сверхпроводимости нужно охлаждать металлы до низких температур. Причем образец должен охлаждаться постоянно, для чего его необходимо поместить в охлаждающую жидкость.
- \* Все жидкости при низких температурах замерзают, поэтому в качестве охладителя применяют сжиженные газы (гелий, водород

- \* По температуре перехода в сверхпроводящее состояние
- \* А) Низкотемпературные ( $T_c$  ниже 77 К).
- \* В низкотемпературных сверхпроводниках электроны взаимодействуют через фононы - кванты тепловых колебаний положительно заряженных ионов, составляющих кристаллическую решетку металла.
- \* Ее искажение, возникающее при прохождении одного электрона, через несколько микросекунд оказывает влияние на его партнера. Таким образом, при испускании и поглощении фононов между электронами возникает слабое взаимное притяжение

## \* Виды сверхпроводников и их свойства

- \* Б) Высокотемпературные ( $T_c$  от 77 до 135 К).
- \* Все известные в настоящее время высокотемпературные сверхпроводники являются оксидами, большинство из которых содержат медь, но имеются также и соединения без меди.
- \* Особое значение в оксидных высокотемпературных сверхпроводниках имеет состояние кислородной подрешетки, т.е. концентрация, структурное положение и подвижности атомов кислорода в кристаллической структуре. Это вызвано тем, что с кислородом в оксидных сверхпроводниках связывают как понимание природы высокотемпературной сверхпроводимости, так и объяснение нестабильности свойств высокотемпературных сверхпроводящих материалов.

# \* Виды сверхпроводников и их свойства

\* В) Комнатные (293 К).

\* Отдельные зерна графита могут проявлять сверхпроводящие свойства при комнатной температуре после обработки водой и выпекания в печи, что говорит о возможности достижения сверхпроводимости в нормальных условиях на практике. Но пока что в этой области сделано очень мало открытий.

\* 2. По магнитным свойствам: (см. Приложение 2)

\* А) Сверхпроводники I рода.

\* Сверхпроводниками I рода являются все чистые металлы, кроме переходных. Для сверхпроводников I рода характерны скачкообразный переход в сверхпроводящее состояние и наличие одной критической напряженности магнитного поля, при которой наблюдается этот переход. Значения критической температуры и критической напряженности магнитного поля у них малы, что затрудняет их практическое применение.

\* Для сверхпроводников I рода характерным является проявление эффекта Мейснера.

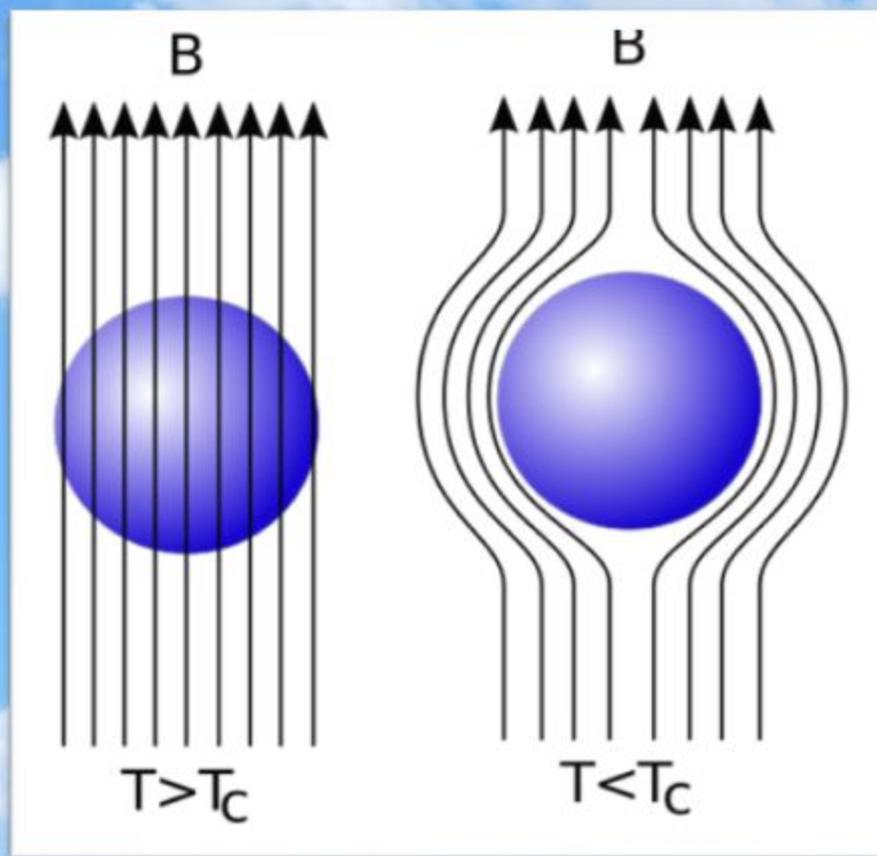
- \* Б) Сверхпроводники II рода.
- \* Все интерметаллические соединения и сплавы относятся к сверхпроводникам II рода. Они переходят в сверхпроводящее состояние в некотором интервале температур. Значения критической температуры и напряженности у них меньше. В таких сверхпроводниках токи не вытесняются на поверхность образца, а образуют цилиндрические каналы, пронизывающие весь объем. В центре канала куперовских пар нет, и сверхпроводимость отсутствует. При возрастании магнитного поля нити, расширяясь, сближаются и сверхпроводящее состояние разрушается. Достаточно сильные магнитные поля, которые способны выдерживать эти сверхпроводники, позволяют использовать их в различного типа устройствах для создания сильного магнитного поля.

## \* Виды сверхпроводников и их свойства

- \* Для постоянного электрического тока электрическое сопротивление сверхпроводника равно нулю;
- \* Постоянный ток в сверхпроводнике не нуждается в присутствии электрического поля, электрическое поле в сверхпроводнике равно нулю;
- \* В сверхпроводниках магнитное поле ослабляется до нуля, они являются идеальными диамагнетиками;
- \* Постоянное не слишком сильное магнитное поле выталкивается из сверхпроводящего образца (эффект Мейснера).

## \* Основные свойства сверхпроводников

\* Наиболее важным свойством сверхпроводникового материала является так называемый эффект Мейснера (рисунок 2), заключающийся в вытеснении постоянного магнитного поля из сверхпроводника.



**Рисунок 2 - Эффект Мейснера**

Эффект Мейснера заключается в вытеснении постоянного магнитного поля из сверхпроводника.

\* Объяснить явление сверхпроводимости с точки зрения классической электродинамики невозможно. Только с развитием квантовой физики в 1957 году (спустя 46 лет после открытия!) три американских физика - Бардин, Купер и Шриффер, объяснили сверхпроводимость спариванием электронов, то есть образованием куперовских пар, которое осуществляется за счет обмена колебаниями кристаллической ячейки - фононами.

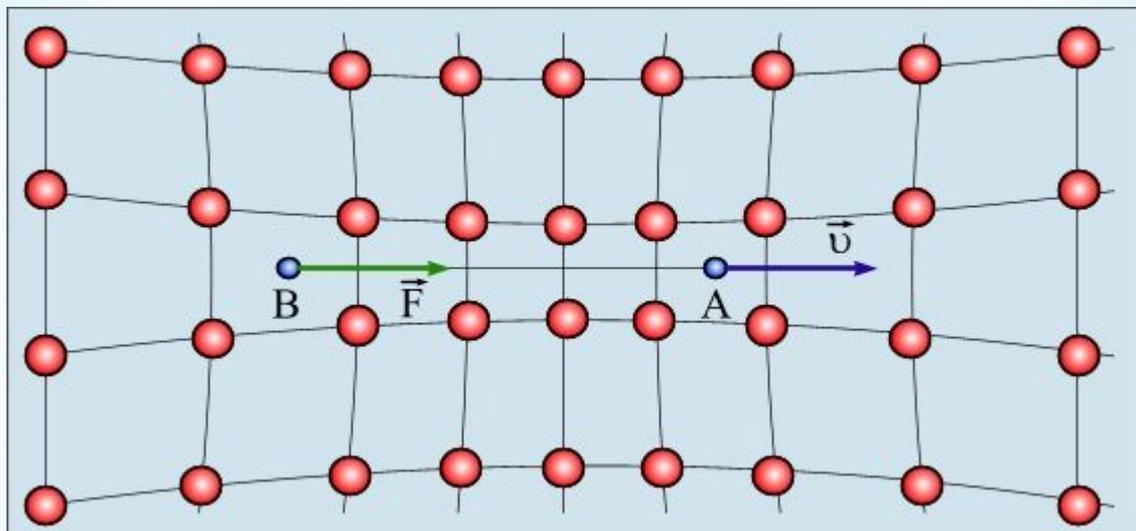
\* Главной причиной возникновения явления сверхпроводимости является взаимодействие пар электронов с ионами кристаллической решетки.

\* Квантовую теорию сверхпроводимости разработали в 1957 г. американские ученые Джон Бардин, Леон Купер и Джон Роберт Шриффер, за что в 1972 г. получили Нобелевскую премию по физике.

## \* Квантовая теория сверхпроводимости

\* В наше время в технике в качестве сверхпроводника чаще всего применяется сплав титана и ниобия, который переходит в состояние сверхпроводимости при 10 К. Но поиски более «высокотемпературных» сверхпроводников открывают новые перспективы. Японские ученые создали наиболее эффективный на сегодняшний день сверхпроводник, который со временем может стать основанием глобальной научно-технической революции. Они получили вещество — диборид магния (соединение магния с бором), которое становится сверхпроводимым при рекордно высокой температуре для металлов 43 К ( $-230^{\circ}\text{C}$ ).

- \* Прогресс в получении сверхпроводимых материалов возможен в таких направлениях:
- \* передача электроэнергии на большие расстояния без заметных потерь;
- \* создание транспорта больших скоростей на магнитной подушке;
- \* создание мощных магнитных систем;
- \* разработка сверхчувствительных диагностических приборов и др.
- \* Из примера исследования сверхпроводимости можно убедиться, что физика еще далеко не исчерпала своих возможностей в новой технике и технологиях.

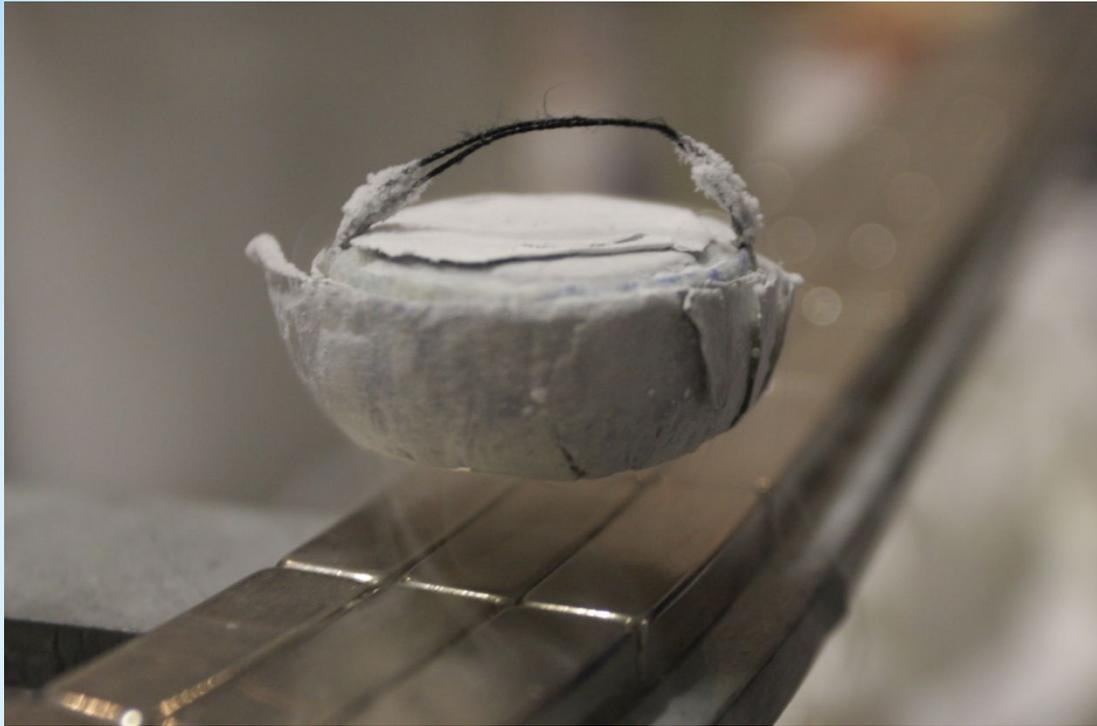


Чтобы понять, как образуются куперовские пары, рассмотрим очень упрощенную модель прохождения тока в сверхпроводнике.

Красными кружками обозначены положительные ионы кристаллической решетки.

\* Когда электрон А под действием электрического поля движется в пространстве решетки, он немного искривляет её. В результате концентрация положительных ионов за ним возрастает. Скопление положительных ионов притягивает отрицательный электрон В с силой  $F$ . В результате энергия, которую потратил электрон А на прохождение ионной кристаллической решетки, передается через колебания решетки электрону В. Получается, что электроны А и В связаны между собой через ионную решетку, образуют пару и вместе не тратят энергии при движении. Сопротивление току в этом случае равно нулю.

\*Сверхпроводимость характеризуется также эффектом Мейснера, заключающемся в полном вытеснении магнитного поля из объема сверхпроводника. В результате образец, как видно на фото, зависает над магнитом.



\* Сверхпроводимость характеризуется также эффeктом Мейснера, заключающeмся в полном вытеснении магнитного поля из объема сверхпроводника. В результате образец, как видно на фото, висит над магнитом ●

На основе этого явления уже созданы поезда на магнитной подушке, которые могут разогнаться до скорости 500 км/ч.



\* Современная квантовая теория сверхпроводимости принципиально не ограничивает значение температуры, при которой наблюдается этот эффект. Значит дело за созданием новых материалов и соединений, которые, возможно, в скором будущем откроете вы.