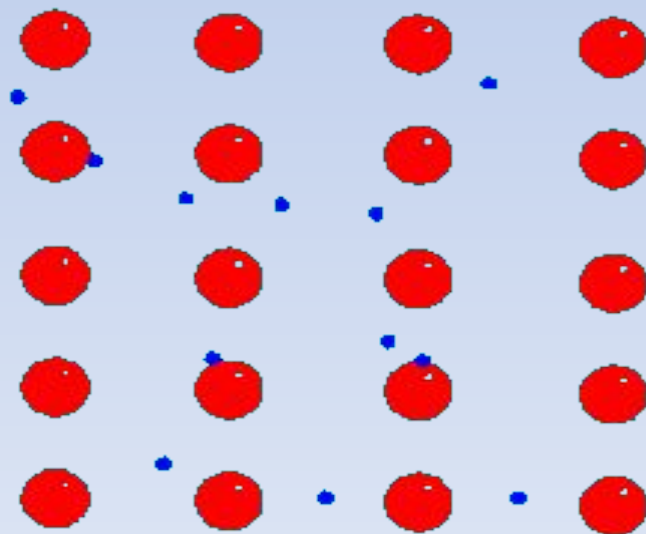


# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

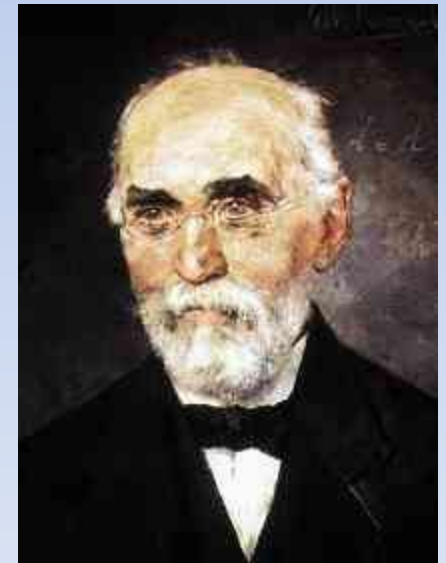


# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ ПРОВОДИМОСТИ

В начале XX века была создана классическая электронная теория проводимости металлов (П. Друде, 1900 г., Х. Лоренц, 1904 г.), которая дала простое и наглядное объяснение большинства электрических и тепловых свойств металлов.



**Пауль Друде**  
**Карл Людвиг** —  
немецкий физик



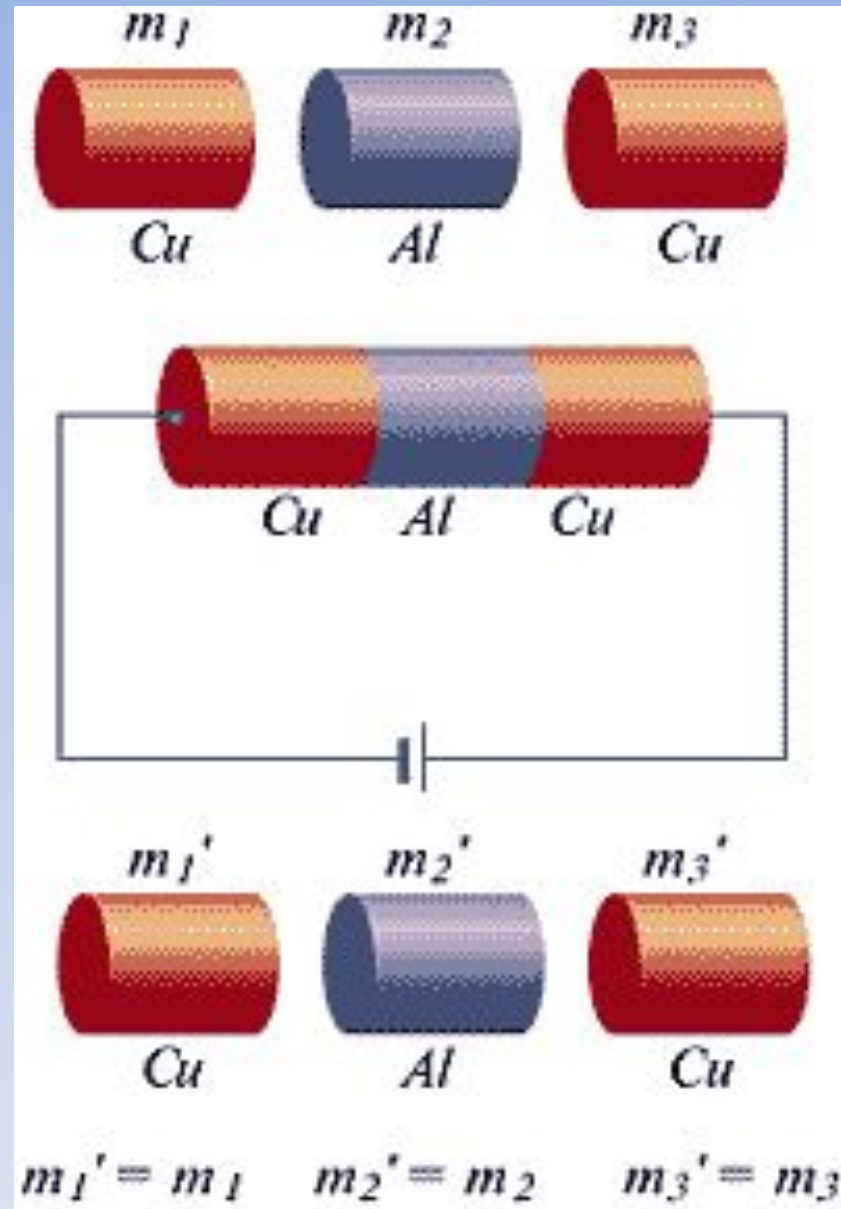
**Хендрик Антон**  
**Лоренц**- голландский  
физик

# Классическая электронная теория Друде - Лоренца.

- 1) *Движение электронов подчиняется законам классической механики.*
- 2) *Электроны друг с другом не взаимодействуют.*
- 3) *Электроны взаимодействуют только с ионами кристаллической решётки, взаимодействие это сводится к соударению.*
- 4) *В промежутках между соударениями электроны движутся свободно.*
- 5) *Электроны проводимости образуют «электронный газ», подобно идеальному газу. «Электронный газ» подчиняется законам идеального газа.*
- 6) *При любом соударении электрон передаёт всю накопленную энергию.*

## Электрический ток в металлах

Ионы кристаллической решетки металла не принимают участие в создании тока. Их перемещение при прохождении тока означало бы перенос вещества вдоль проводника, что не наблюдается. Например, в опытах Э. Рикке (1901 г.) масса и химический состав проводника не изменялся при прохождении тока в течение года.



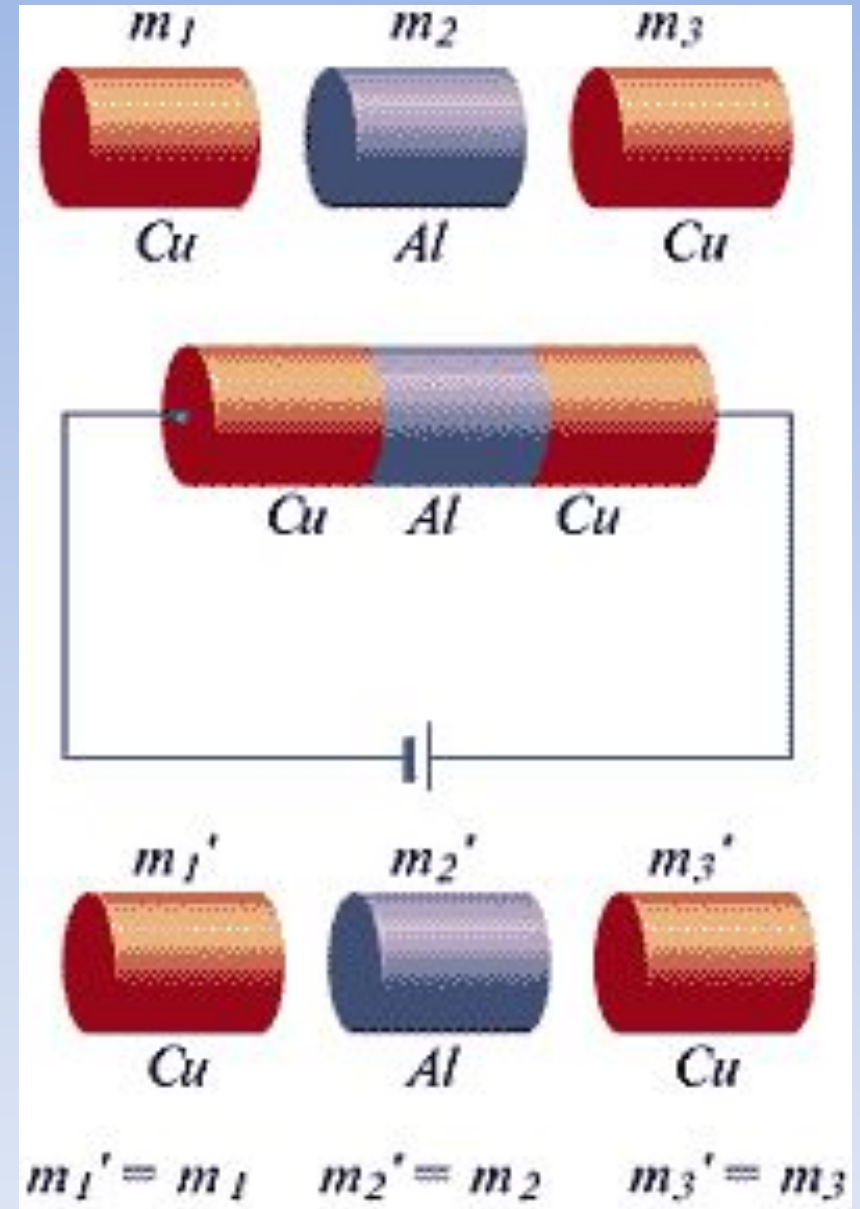
# Опыт Рикке

## 1901 г.

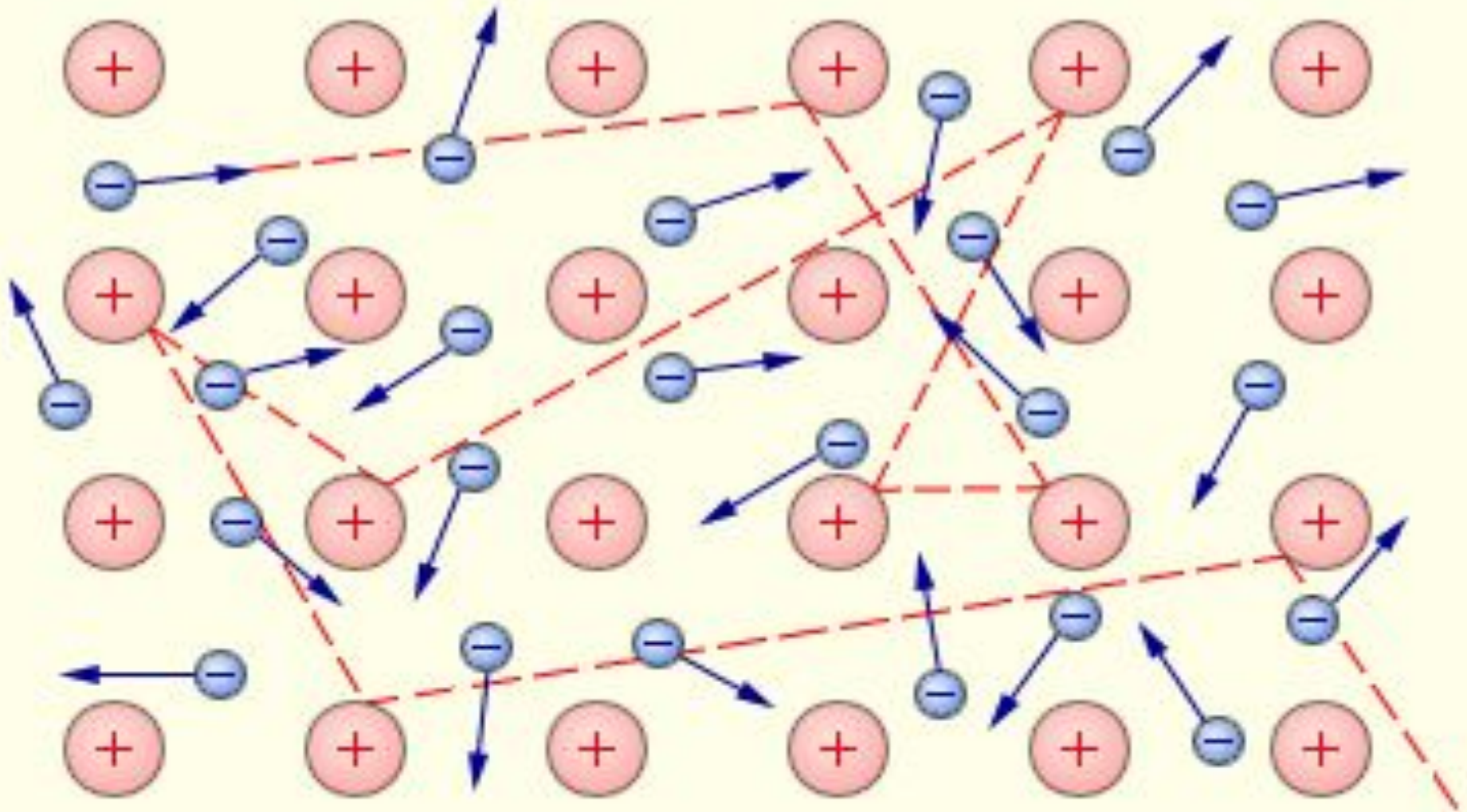
**Вывод:**

Не происходит переноса вещества =>

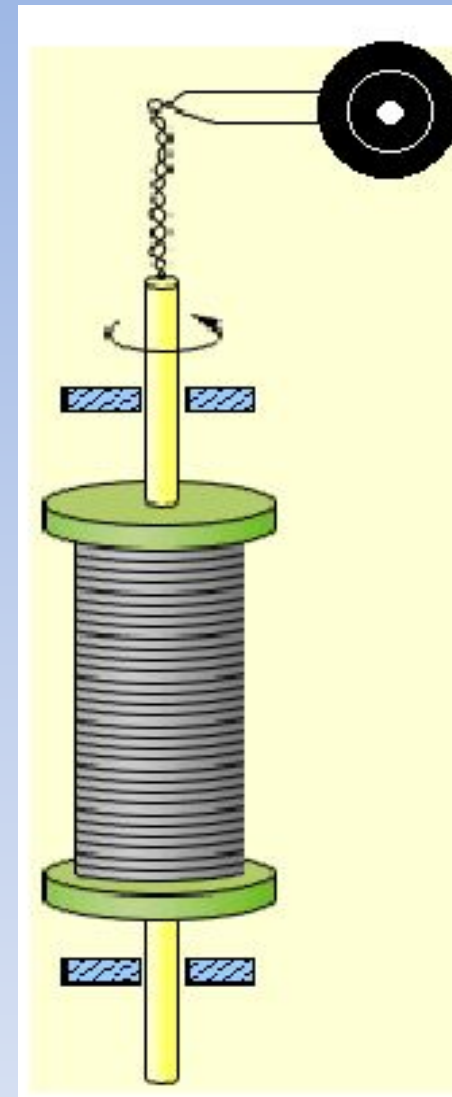
- 1) Ионы металла не принимают участия в переносе электрического заряда.
- 2) Носители заряда - частицы, входящие в состав всех металлов



**Электроны взаимодействуют не друг с другом, а с ионами кристаллической решётки. При каждом соударении электрон передаёт свою кинетическую энергию.**

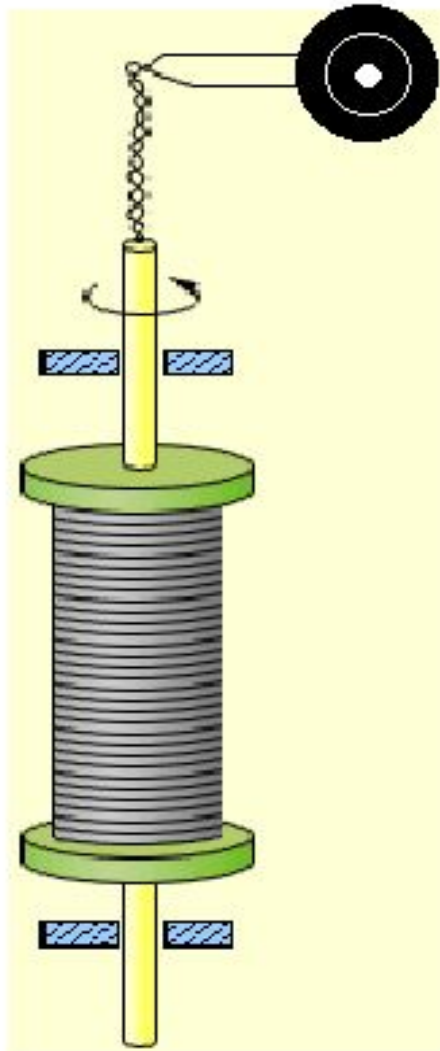


**Экспериментальное доказательство того, что ток в металлах создается свободными электронами, было дано в опытах Л.И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси (1913 г., результаты не были опубликованы), а также Т. Стюарта и Р. Толмена (1916 г.). Они обнаружили, что при резкой остановке быстро вращающейся катушки в проводнике катушки возникает электрический ток, создаваемый отрицательно заряженными частицами — электронами.**



# Опыт Мандельштама и Папалекси

1913 г.



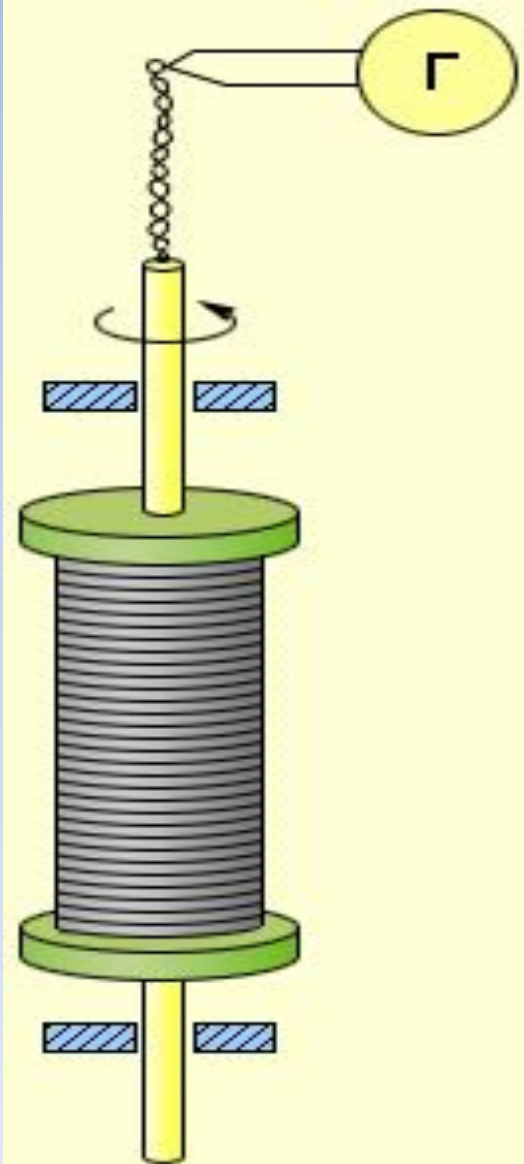
T

- **Вывод:**
- Носители электрического заряда движутся по инерции



# Опыт Толмена и Стюарта

1916 г.



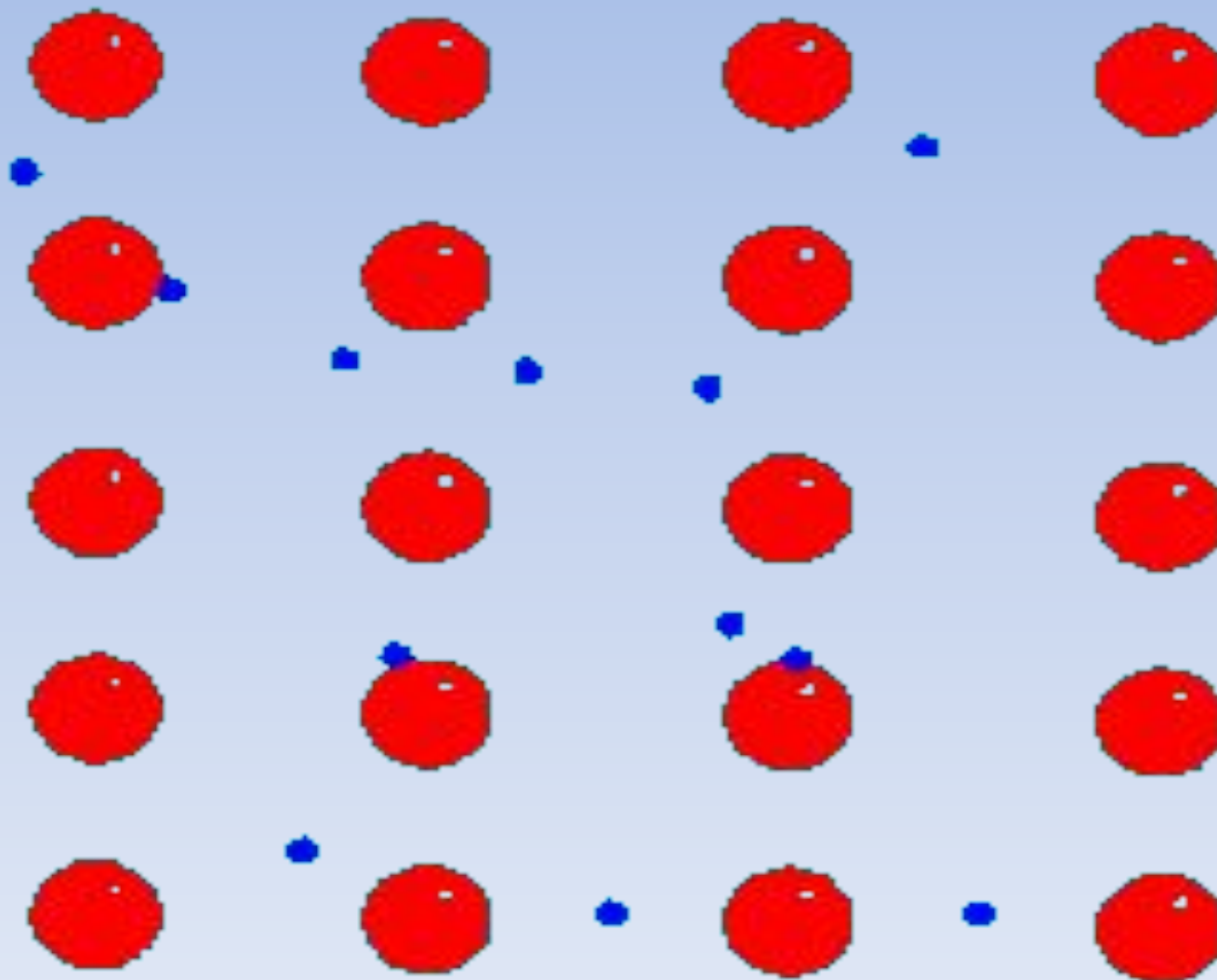
- **Выводы:**

1. Носителями заряда в металле являются отрицательно заряженные частицы.

2. Отношение  $\frac{q}{m} \approx \frac{e}{m}$

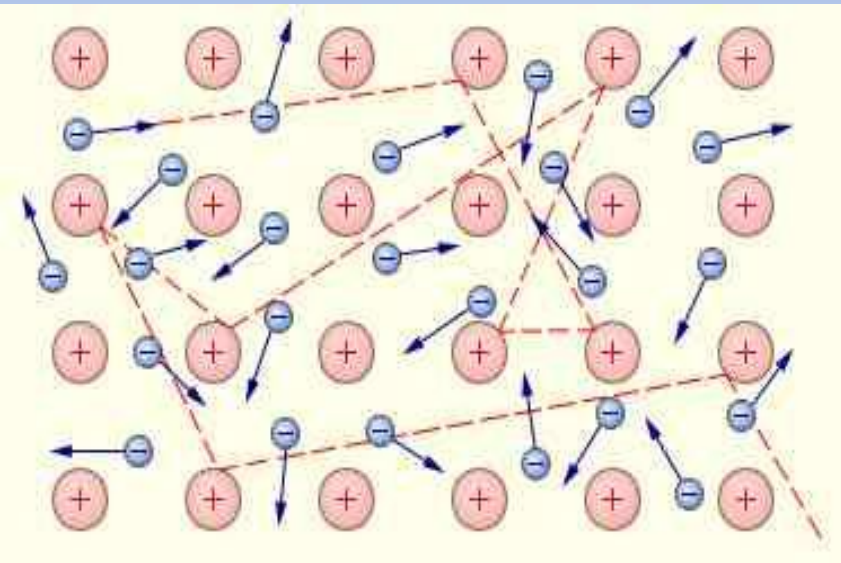
=> **Электрический ток в металлах обусловлен движением электронов**

***Ионы совершают тепловые колебания, вблизи положения равновесия – узлов кристаллической решётки. Свободные электроны движутся хаотично и при своём движении сталкиваются с ионами кристаллической решётки***



**Металлический проводник состоит из:**

- 1) положительно заряженных ионов, колеблющихся около положения равновесия, и**
- 2) свободных электронов, способных перемещаться по всему объему проводника.**



**В металле в отсутствие электрического поля электроны проводимости хаотически движутся и сталкиваются, чаще всего с ионами кристаллической решетки. Совокупность этих электронов можно приблизительно рассматривать как некий электронный газ, подчиняющийся законам идеального газа. Средняя скорость теплового движения электронов при комнатной температуре составляет примерно 105 м/с.**

**Зависимость сопротивления проводника R от температуры:**

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

**При нагревании размеры проводника меняются мало, а в основном меняется удельное сопротивление.**

**Удельное сопротивление проводника зависит от температуры**

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

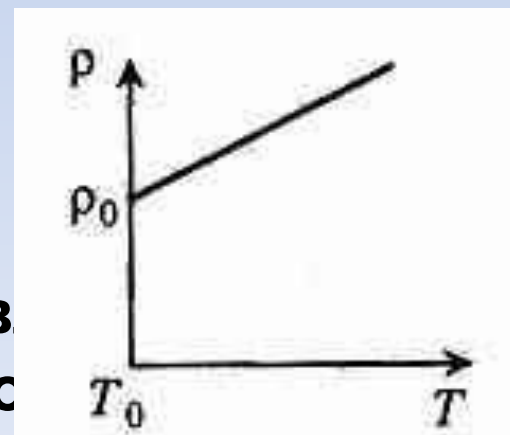
**где  $\rho_0$  - удельное сопротивление при 0 градусов,**

**t - температура,**

**$\alpha$  - температурный коэффициент сопротивл.**

**( т.е. относительное изменение удельного**

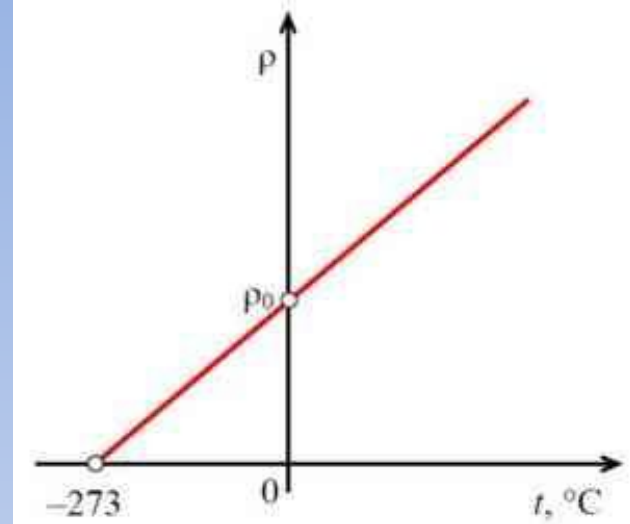
**сопротивления проводника при нагревании**



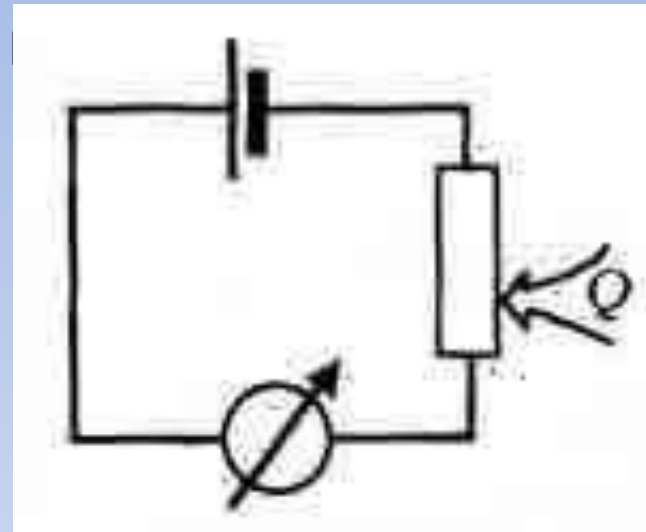
Для всех металлических проводников  $\alpha > 0$  и слабо изменяется с изменением температуры. Для большинства металлов в интервале температур от  $0^\circ$  до  $100^\circ\text{C}$  коэффициент  $\alpha$  изменяется от  $3,3 \cdot 10^{-3}$  до  $6 \cdot 10^{-3}$  (таблица 1).  
У химических металлов

$$\alpha = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$$

Существуют специальные сплавы, сопротивление которых практически не изменяется при нагревании, например, манганин и константан. Их температурные коэффициенты сопротивления очень малы и равны соответственно  $1 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$  и  $5 \cdot 10^{-5}$



Таким образом, для металлических проводников с ростом температуры увеличивается удельное сопротивление, увеличивается сопротивление проводника и уменьшается эл.ток в



Сопротивление проводника при изменении температуры можно рассчитать по формуле:  $R = R_0 (1 + \alpha t)$

где  $R_0$  - сопротивление проводника при 0 градусов Цельсия

$t$  - температура проводника

$\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления

# Сопротивление проводника

- Сопротивление - это физическая величина, характеризующая степень противодействия проводника направленному движению зарядов.
- Удельное сопротивление – это сопротивление цилиндрического проводника единичной длины и единичной площади поперечного сечения.
- Сверхпроводимость – физическое явление, заключающееся в скачкообразном падении сопротивления до нуля при некоторой критической температуре ( $T_{кр}$ )

$$R = \frac{\rho \square}{S}$$

$\rho$  – удельное сопротивление,

$\square$  – длина проводника,  
 $S$  – площадь поперечного сечения

$$[R] = Ом$$

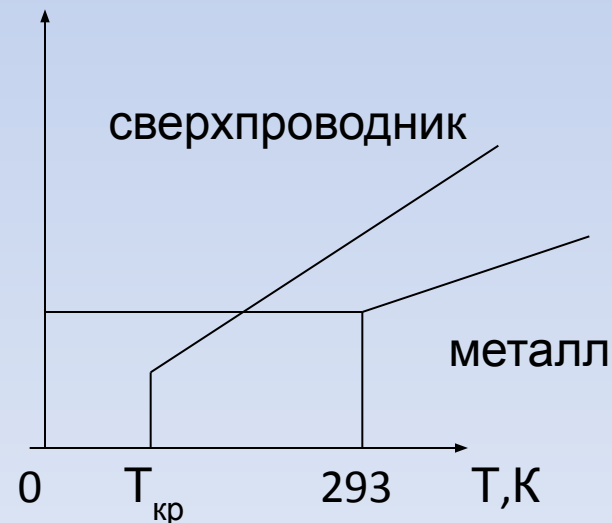
$$\rho_t = \rho_0 \alpha (1 + \Delta T / T_0)$$

$\rho_0$  – удельное сопротивление при  $t = 20^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления  
 $= 1 / 273 \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$

$\Delta T$  – изменение температуры

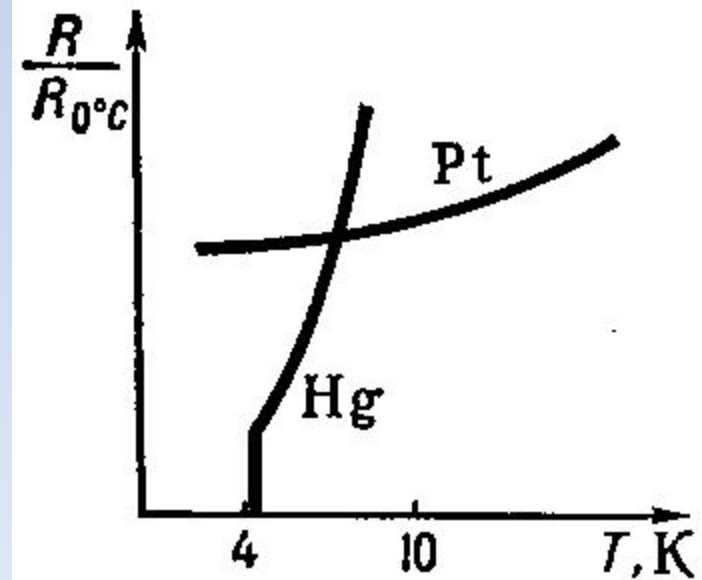
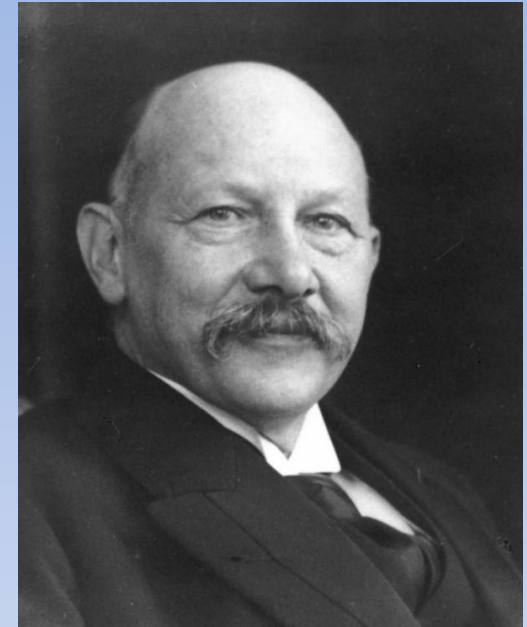
$$[\rho] = \frac{Ом \cdot мм^2}{м}$$



**Сверхпроводимость**, свойство многих проводников, состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при охлаждении ниже определённой критической температуры  $T_k$ , характерной для данного материала. С. обнаружена у более чем 25 металлических элементов, у большого числа сплавов и интерметаллических соединений, а также у некоторых полупроводников.



В 1911 году голландский физик Камерлинг-Оннес обнаружил, что при охлаждении ртути в жидком гелии её сопротивление сначала меняется постепенно, а затем при температуре 4,2 К резко падает до нуля.



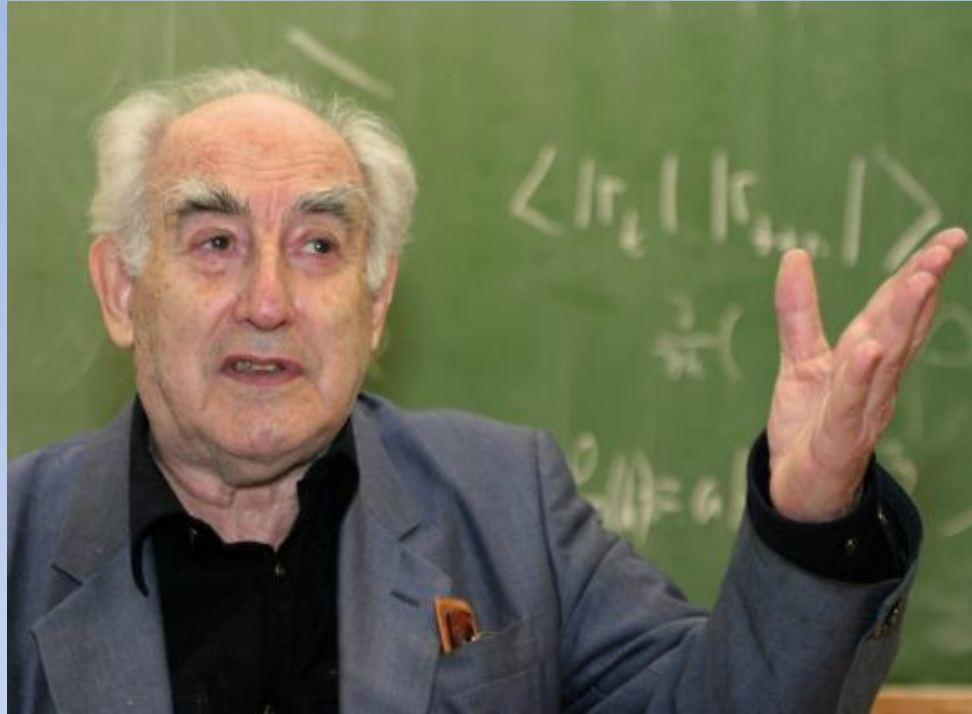
Г. Камерлинг-Оннес был удостоен Нобелевской премии по физике 1913 г. «за исследования свойств вещества при низких температурах».

В дальнейшем было выяснено, что более **25 химических элементов — металлов** при очень низких температурах становятся сверхпроводниками. У каждого из них своя критическая температура перехода в состояние с нулевым сопротивлением. Самое низкое значение ее у вольфрама — 0,012 К, самое высокое у ниобия — 9 К.

Сверхпроводимость наблюдается не только у чистых металлов, но и у многих **химических соединений и сплавов**. При этом сами элементы, входящие в состав сверхпроводящего соединения, могут и не являться сверхпроводниками. Например, NiBi, Au<sub>2</sub>Bi, PdTe, PtSb и другие.

До 1986 г. были известны сверхпроводники, обладающие этим свойством при очень низких температурах — ниже  $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В 1986-1987 годах были обнаружены материалы с температурой перехода в сверхпроводящее состояние около  $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это явление получило название высокотемпературной сверхпроводимости, и для его наблюдения можно использовать вместо жидкого гелия жидкий азот.

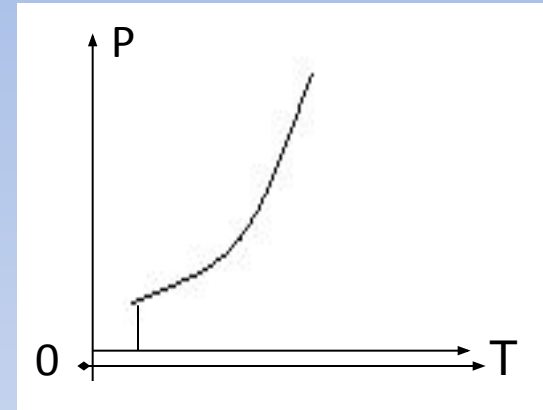
# Сверхпроводимость



- Академик В.Л. Гинзбург, нобелевский лауреат за работы по сверхпроводимости

# Сверхпроводимость металлов и сплавов

- У многих металлов и сплавов при температурах, близких с  $T=0$  К, наблюдается резкое уменьшение удельного сопротивления – это явление называется сверхпроводимостью металлов.



Оно было обнаружено голландским физиком Х.Камерлингем – Онессом в 1911 году у ртути ( $T_{кр} = 4,2^{\circ}\text{К}$ ).

# Общие сведения

- Свойством сверхпроводимости обладают около половины металлов и несколько сотен сплавов.
- Сверхпроводящие свойства зависят от типа кристаллической структуры. Изменение её может перевести вещество из обычного в сверхпроводящее состояние.
- Критические температуры изотопов элементов, переходящих в сверхпроводящее состояние, связаны с массами изотопов соотношением:

$$T_c(M_c)^{1/2} = \text{const} \quad (\text{изотопический эффект})$$

Сильное магнитное поле разрушает эффект сверхпроводимости. Следовательно, при помещении в магнитное поле свойство сверхпроводимости может исчезнуть.

# Реакция на примеси

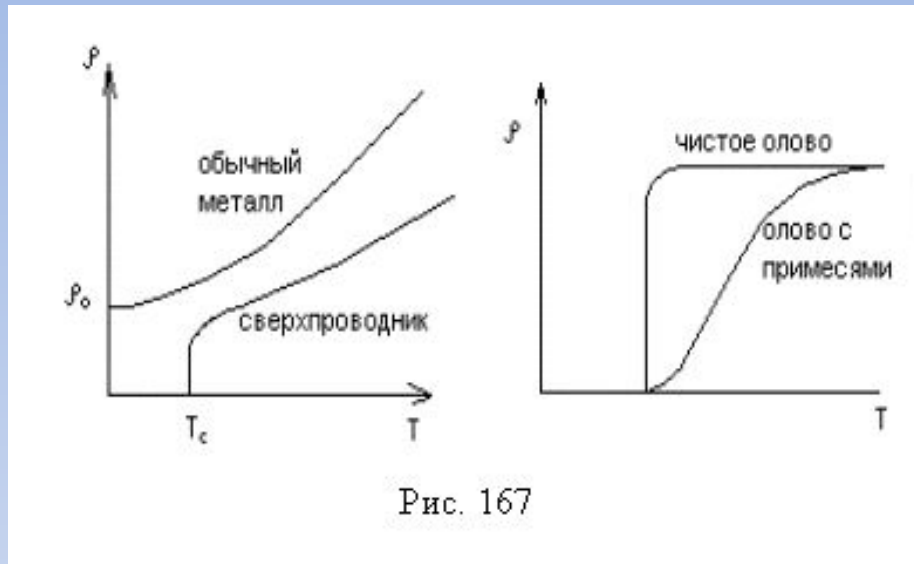


Рис. 167

- Введение примеси в сверхпроводник уменьшает резкость перехода в сверхпроводящее состояние.
- В нормальных металлах ток исчезает примерно через  $10^{-12}$  с. В сверхпроводнике ток, может циркулировать годами (теоретически 105 лет!).

# Физическая природа сверхпроводимости

- Явление сверхпроводимости можно понять и обосновать только с помощью квантовых представлений

Они были представлены в 1957 году американскими учеными Дж.Бардиным, Л. Купером, Дж.Шриффером и советским академиком Н.Н. Боголюбовым.

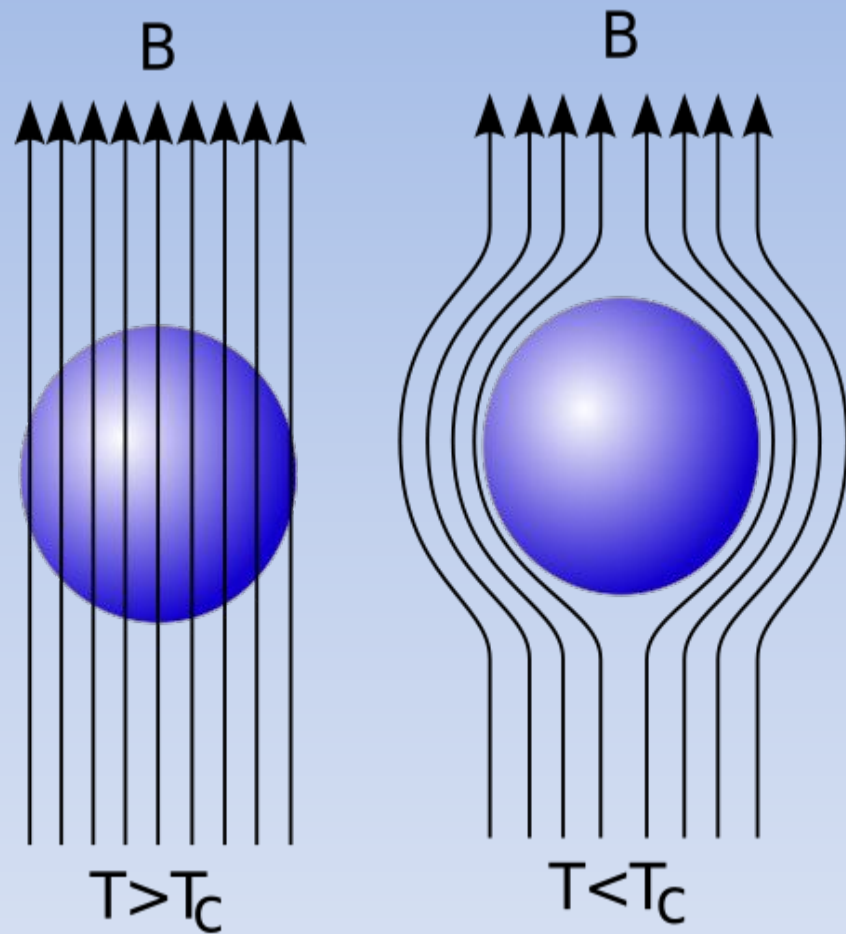
В 1986 году была открыта высокотемпературная сверхпроводимость соединений лантана, бария и др. элементов ( $T = 100^{\circ}\text{K}$  - это температура кипения жидкого азота).

Однако нулевое сопротивление — не единственная отличительная черта сверхпроводимости. Ещё из теории Друде известно, что проводимость металлов увеличивается с понижением температуры, то есть электрическое сопротивление стремится к нулю.





Одним из главных отличий сверхпроводников от идеальных проводников является эффект Мейснера, открытый в 1933 году, т.е. полное вытеснение магнитного поля из материала при переходе в сверхпроводящее состояние. Впервые явление наблюдалось в 1933 году немецкими физиками Мейснером и Оксенфельдом



# **Гроб Мухаммеда — опыт, демонстрирующий этот эффект в сверхпроводниках.**

**По преданию, гроб с телом пророка Магомета висел в пространстве без всякой поддержки, поэтому этот опыт называют экспериментом с «Магомедовым гробом».**

**Отталкиваясь от неподвижного сверхпроводника, магнит всплывает сам и продолжает парить до тех пор, пока внешние условия не выведут сверхпроводник из сверхпроводящей фазы. В результате этого эффекта магнит, приближающийся к сверхпроводнику, «увидит» магнит обратной полярности точно такого же размера, что и вызывает левитацию.**



# Применение сверхпроводимости



1. Сооружаются мощные электромагниты со сверхпроводящей обмоткой, которые создают магнитное поле без затрат электроэнергии на длительном интервале времени, т.к. выделения теплоты не происходит.

2. Сверхпроводящие магниты используются в ускорителях элементарных частиц, магнитогидродинамических генераторах, преобразующих энергию струи раскаленного ионизированного газа, движущегося в магнитном поле, в электрическую энергию.



3. Высокотемпературная сверхпроводимость в недалеком будущем приведет к технической революции в радиоэлектронике, радиотехнике.

4. Если удастся создать сверхпроводники при комнатной температуре, то генераторы и электродвигатели станут исключительно компактными и передавать электроэнергию будет возможно на большие расстояния без потерь.



# Используемые ресурсы:

- <http://www.physbook.ru/index.php/><http://www.physbook.ru/index.php/>[Т. Электронная проводимость металлов](#)
- [http://class-fizika.narod.ru/10\\_9.htm](http://class-fizika.narod.ru/10_9.htm)