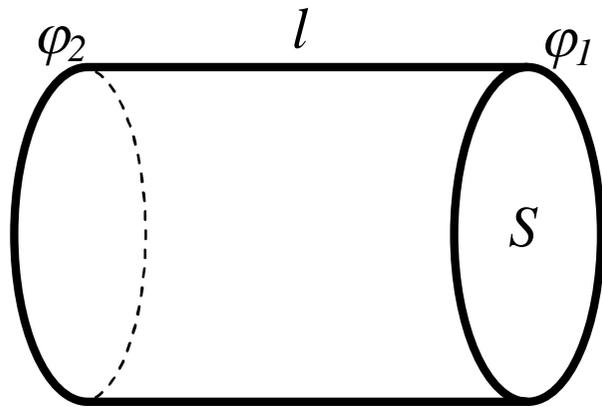


# Лекция 26

## *Классическая теория электропроводности металлов*

# Закон Ома в дифференциальной форме



$$U = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$I = \frac{U}{R}$$

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

$$I = \frac{US}{\rho l}$$

$$j = \frac{I}{S} = \frac{U}{\rho l} = \frac{1}{\rho} \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{1}{\rho} E$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

## Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

$$Q = I^2 R \Delta t \qquad R = \rho \frac{l}{S} \qquad j = \frac{I}{S}$$

$$Q = (jS)^2 \rho \frac{l}{S} \Delta t = j^2 \rho (lS) \Delta t \qquad V = lS$$

$$w = \frac{Q}{\Delta t V}$$

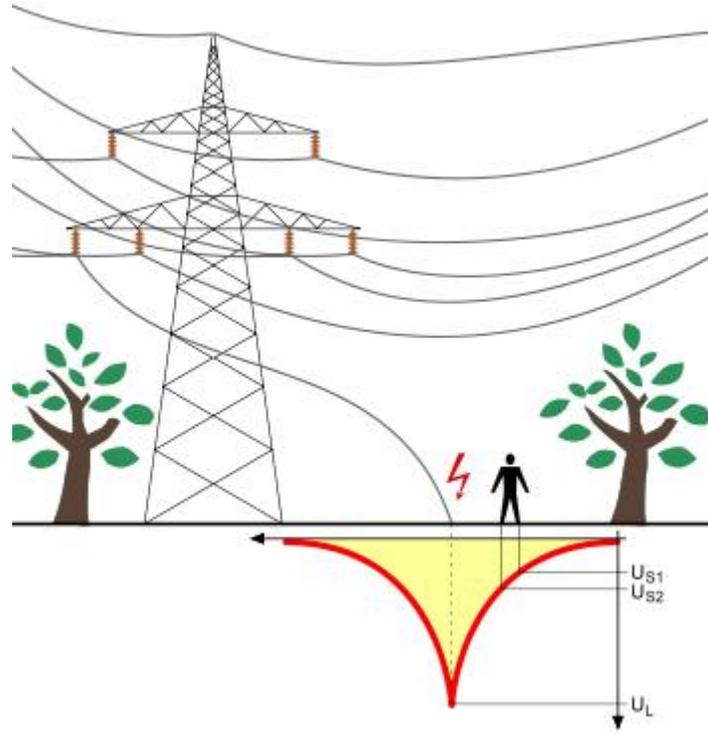
объемная плотность тепловой мощности тока

$$w = \rho j^2 = \sigma E^2$$



***Внимание: следующие кадры  
содержат натуралистичное  
изображение сцен жестокости и  
не рекомендованы для  
просмотра впечатлительными  
людьми.***





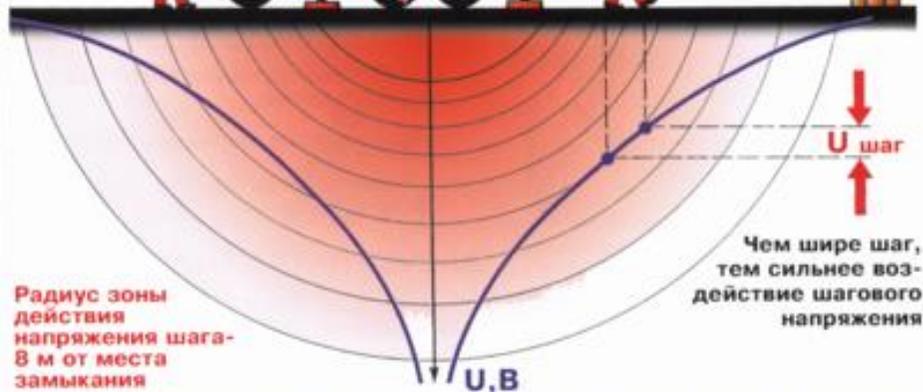
## ШАГОВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Возникает при отсутствии или неисправности переносного заземлителя, когда стрела крана или груз касается линии электропередач. Металлоконструкция крана оказывается под напряжением



### ЗАПРЕЩАЕТСЯ :

- прикасаться к машине
- спускаться (подниматься) с машины до снятия напряжения
- удаляться бегом или широким шагом

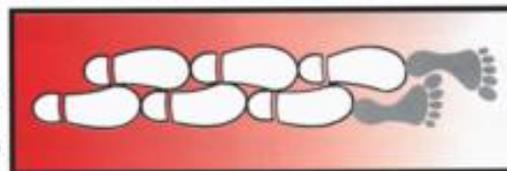


Радиус зоны действия напряжения шага - 8 м от места замыкания

Машинист крана обязан принять меры к быстрейшему разрыву возникшего контакта и отведению стрелы крана на безопасное расстояние, предупредив работников, что машина находится под напряжением

### ПРАВИЛА ВЫХОДА ИЗ ОПАСНОЙ ЗОНЫ

1. Идти короткими шагами
2. Не отрывать одну ногу от другой и от земли
3. Не спешить, чтобы не упасть
4. При возможности надеть электрозащитную обувь (боты, калоши)



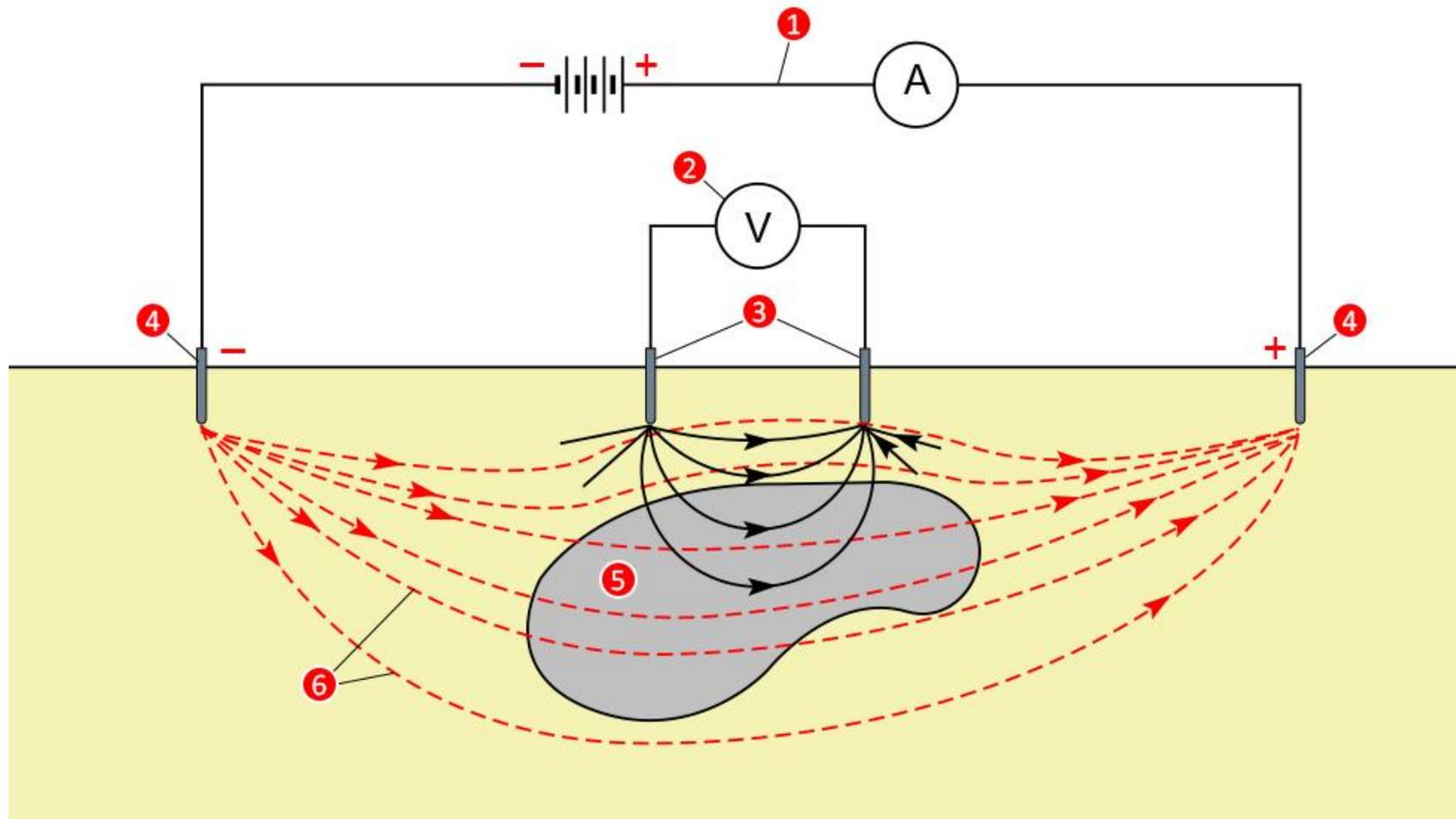
# Шаговое напряжение



$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

# Электроразведка

Электроразведка – метод изучения строения земной коры, основанный на измерении естественных или искусственно возбуждаемых электромагнитных полей.



1 — питающая линия; 2 — измерительная линия; 3 — измерительные заземления; 4 — питающие заземления; 5 — область исследования; 6 — линии тока

# Электропрогрев бетона

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

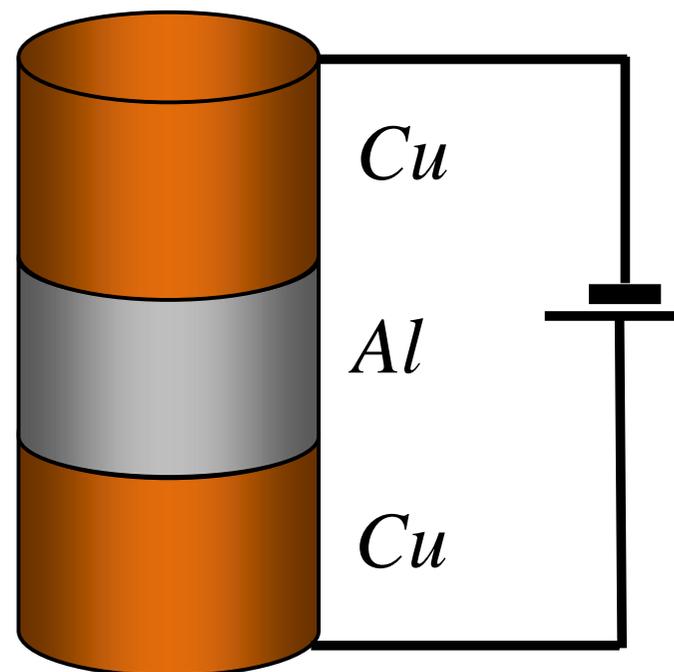
$$w = \rho j^2 = \sigma E^2$$

*Электропрогрев бетона применяется при бетонировании конструкций при ожидаемой среднесуточной температуре наружного воздуха ниже 5°C и минимальной суточной температуре ниже 0°C.*

# Природа носителей тока в металлах

## Опыт Рикке

В течение года через цилиндры пропусклся электрический ток. За это время через них прошел заряд, равный 3,5 МКл. Когда цилиндры разъединили, оказалось, что массы цилиндров не изменились.

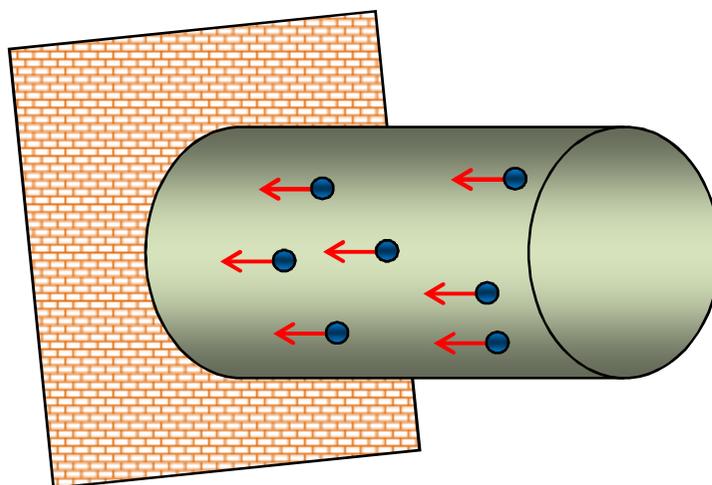


Опыт доказал, что при прохождении по металлу электрического тока ионы не перемещаются. Носителями тока могут быть только одинаковые для всех металлов частицы. Такими частицами могли быть электроны, открытые в 1897г. Томсоном в опытах с катодными лучами.

# Природа носителей тока в металлах

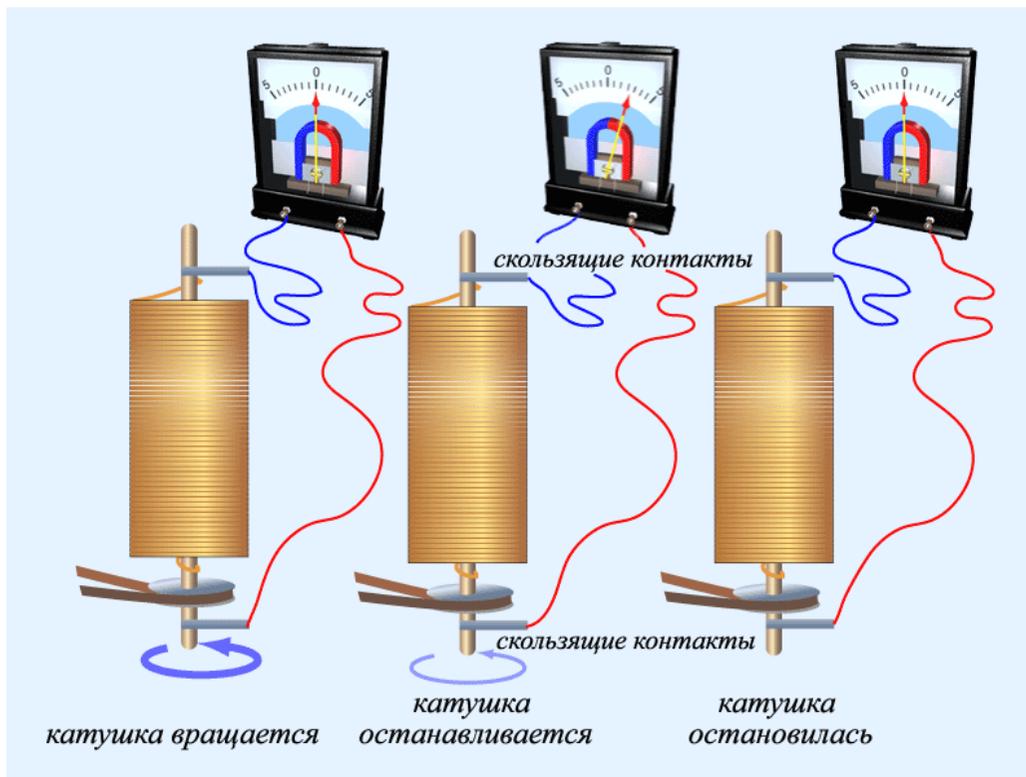
## Опыт Толмена и Стюарта

Обладает ли массой носитель тока в металле? Если обладает, то при резком торможении проводника, подчиняясь законам механики, он некоторое время будет двигаться в том же направлении по инерции. Мандельштам и Папалекси в 1913 году предложили эксперимент по проверке этой гипотезы, а Стюарт и Толмен в 1916 г. осуществили его.



## Опыт Толмена и Стюарта

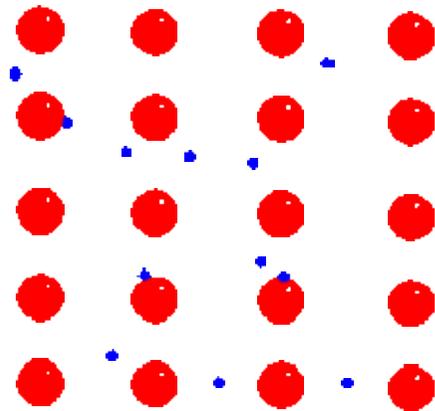
Катушка, состоящая из большого числа витков проволоки, приводилась в быстрое вращение и затем резко останавливалась. В гальванометре возникал электрический ток. Направление этого тока соответствовало движущимся по инерции отрицательным зарядам.



Измерения показали, что удельный заряд (отношение заряда к массе) носителя тока равняется  $1,8 \cdot 10^{11}$  Кл/кг. Это значение хорошо согласуется с удельным зарядом свободных электронов.

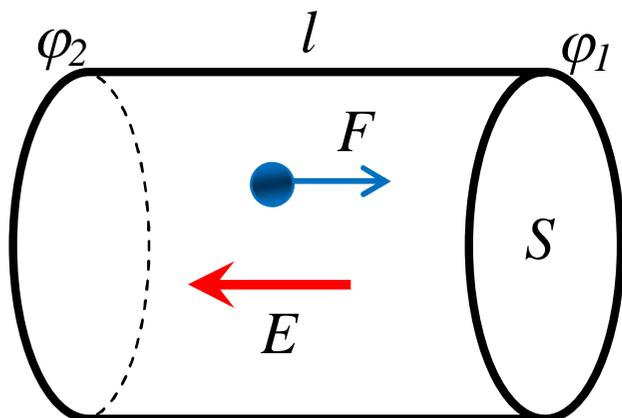
# Металлы

Атом металла состоит из положительного ядра, вокруг которого вращаются электроны. Количество внешних (валентных) электронов невелико, и они слабо связаны с ядром.



При переходе из жидкого состояния в твердое атомы металла образуют кристаллическую решетку. Валентные электроны обобществляются, становятся свободными. Совокупность свободных электронов образует электронный газ.

# Теория Друде-Лоренца



Электрон участвует в двух движениях: хаотичном тепловом и упорядоченном (дрейфовом).

$$\vec{V} = \vec{u} + \vec{v}$$

$\langle v \rangle$  – средняя дрейфовая скорость

$$dl = \langle v \rangle dt$$

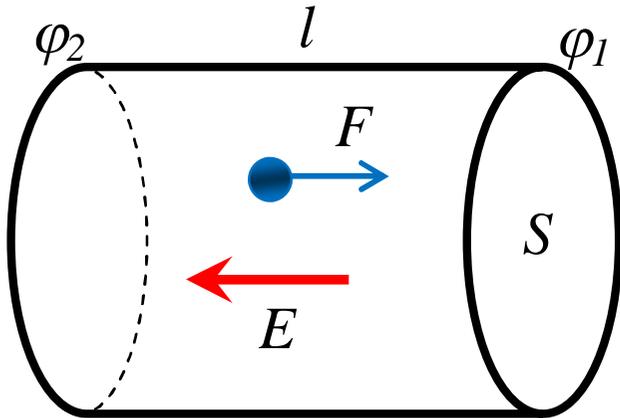
$$dN = nSdl = nS \langle v \rangle dt$$

$$dq = edN = en \langle v \rangle S dt$$

$$j = \frac{1}{S} \frac{dq}{dt}$$

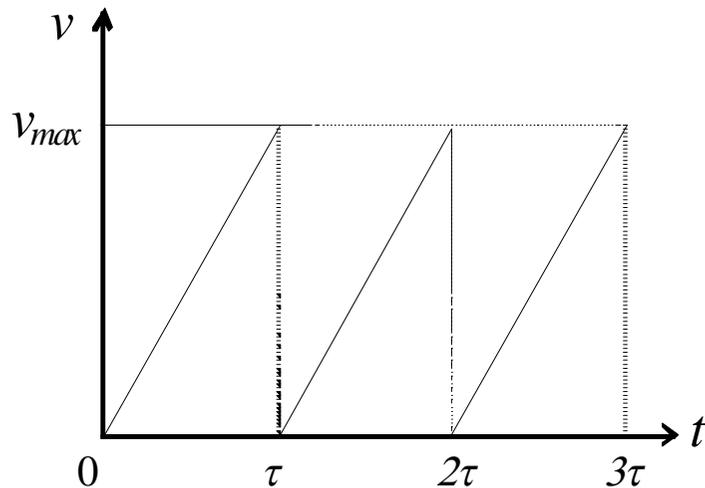
$$j = en \langle v \rangle$$

# Теория Друде-Лоренца



$$F = am = eE$$

$$v_{\max} = a\tau = \frac{e\tau}{m} E$$



$$\langle v \rangle = \frac{v_{\max} + 0}{2} = \frac{e\tau}{2m} E$$

$$j = \frac{ne^2\tau}{2m} E$$

# Теория Друде-Лоренца

$$\left\langle \frac{mu^2}{2} \right\rangle = \frac{3}{2} kT$$

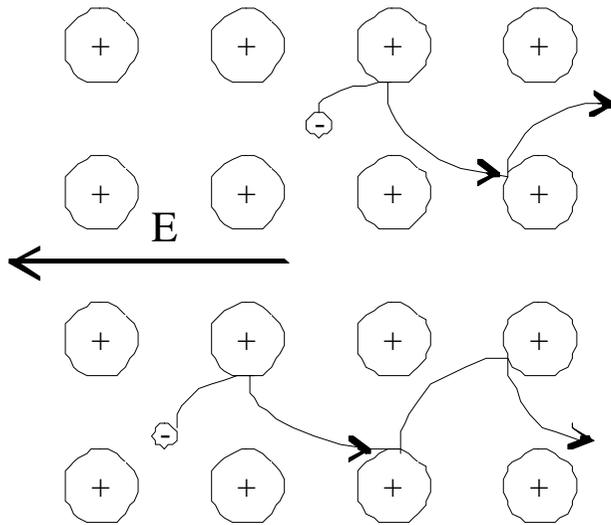
$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

$$T=300K$$

$$\langle u \rangle \approx 10^5 \text{ м/с}$$

$$j = en \langle v \rangle$$

Если  $j \sim 10^7 \text{ А/м}^2$ , а  $n \sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$ , то  $\langle v \rangle \approx 1 \text{ мм/с}$



$$\langle u \rangle \gg \langle v \rangle$$

$$\lambda = \tau \langle u \rangle$$

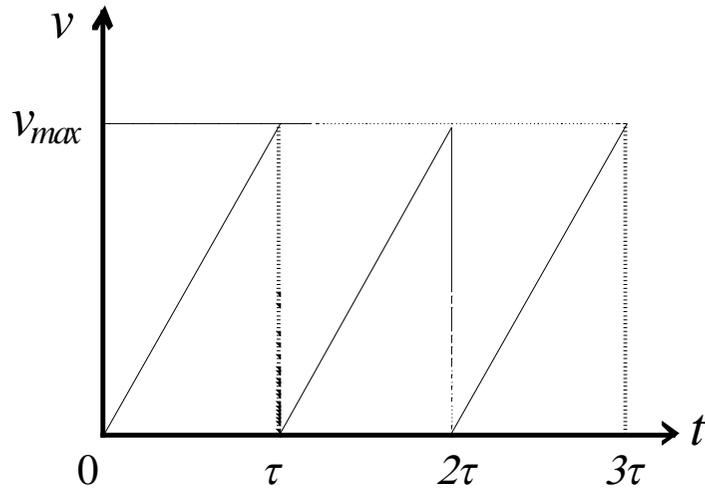
$$j = \frac{ne^2 \tau}{2m} E$$

$$j = \frac{ne^2 \lambda}{2m \langle u \rangle} E$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$\sigma = \frac{ne^2 \lambda}{2m \langle u \rangle}$$

# Теория Друде-Лоренца



$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{e^2 \tau^2}{2m} E^2$$

$$w = \frac{n \langle \varepsilon \rangle}{\tau} = \frac{ne^2 \tau}{2m} E^2 = \sigma E^2$$

## Объяснение закона Видемана–Франца

Экспериментально установлено, что для металлов отношение коэффициента теплопроводности к коэффициенту электропроводности пропорционально температуре, а коэффициент пропорциональности одинаков для всех металлов.

$$\frac{\kappa}{\sigma} = AT \quad A = 2,21 \cdot 10^{-8} \text{ Bm/K}^2$$

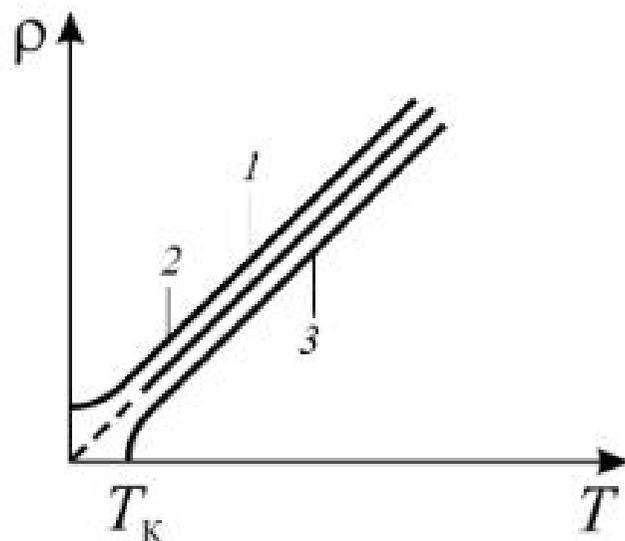
Пусть теплопроводность определяется электронами, тогда коэффициент теплопроводности

$$\kappa = \frac{1}{3} n \langle u \rangle \lambda \frac{i}{2} k$$

$$\frac{\kappa}{\sigma} = n \langle u \rangle \lambda \frac{1}{2} k \frac{2m \langle u \rangle}{ne^2 \lambda} = \frac{mk \langle u \rangle^2}{e^2} = \frac{3k^2}{e^2} T$$

$$A = \frac{3k^2}{e^2} \approx 2,23 \cdot 10^{-8} \text{ Bm/K}^2$$

# Трудности классической теории электропроводности металлов



Теория

Эксперимент

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

$$\alpha \approx 1/273 \text{ K}^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{2m \langle u \rangle}{ne^2 \lambda} = \frac{2\sqrt{3km}}{ne^2 \lambda} \sqrt{T}$$

# Трудности классической теории электропроводимости металлов

Теория:

молярная теплоемкость кристаллической решетки

$$C_V = 3R$$

молярная теплоемкость электронного газа

$$C_V = \frac{3}{2}R$$

Всего

$$C_V = 9/2R$$

Эксперимент.

Справедлив закон Дюлонга-Пти

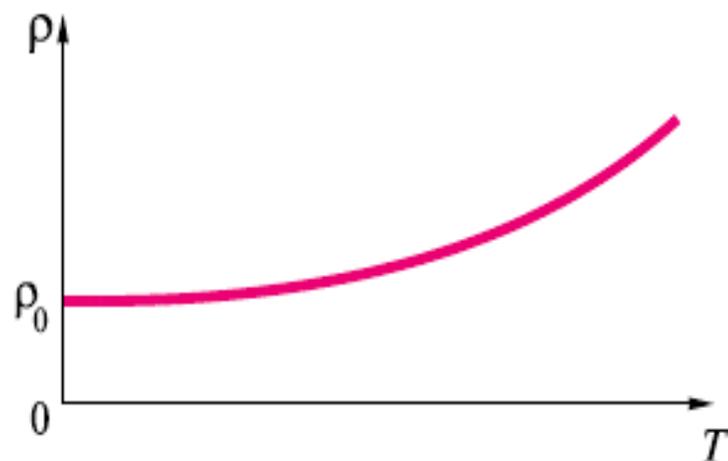
$$C_V = 3R$$

# Сверхпроводимость

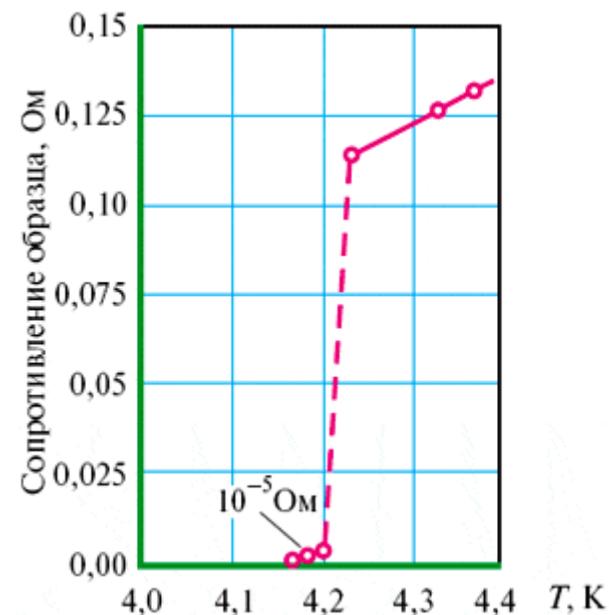
Сверхпроводимость — способность материала обладать строго нулевым электрическим сопротивлением при достижении температуры ниже критической.

Эксперименты, проводимые Камерлинг-Оннесом (1911 г.), показали резкий спад до нуля электрического сопротивления ртути при температуре около 4,2 К.

Медь



Ртуть



# Сверхпроводимость

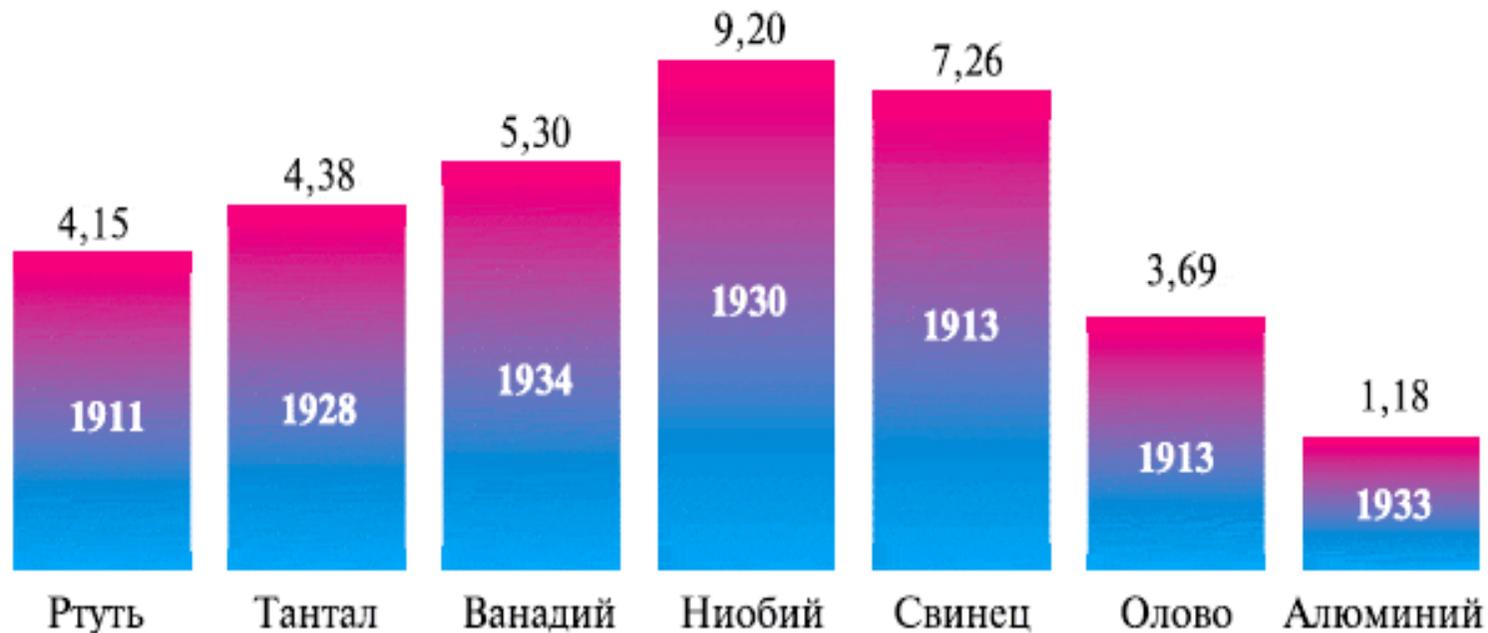
Эффект Мейснера — магнитное поле вытесняется из объема сверхпроводника.



Главные свойства сверхпроводимости:

- ✓ в сверхпроводнике обращается в нуль электрическое сопротивление;
- ✓ из сверхпроводника выталкивается магнитное поле.

# Сверхпроводимость



Высокотемпературная сверхпроводимость (1986 г.) — сверхпроводимость при относительно больших температурах с критической температурой выше точки кипения азота (77 К или  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).