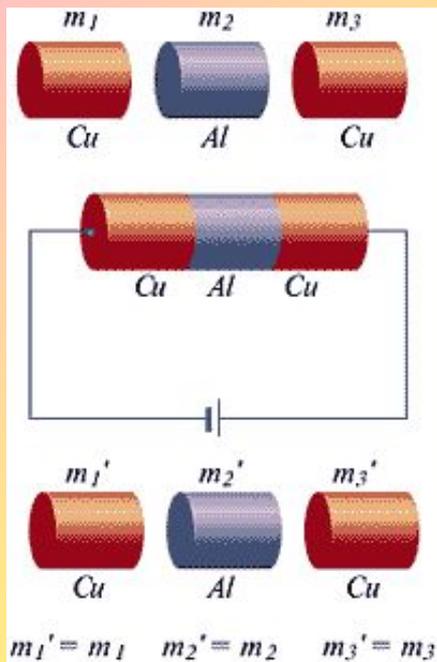


3.2.2. Электрический ток в металлах.

Что является носителем заряда в металлах?

Для выяснения природы тока в металлах был поставлен ряд специальных опытов

1) Опыт Рикке (1901 г.)

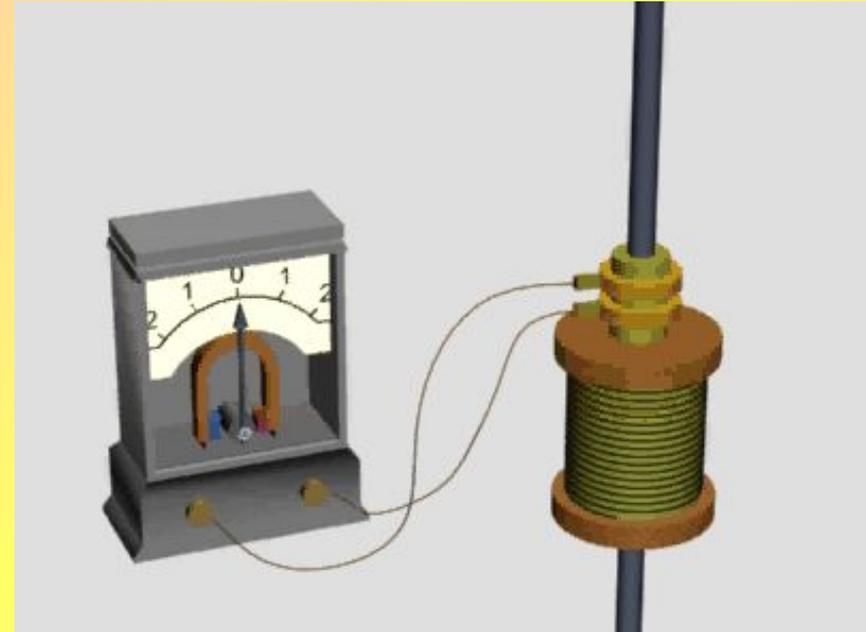
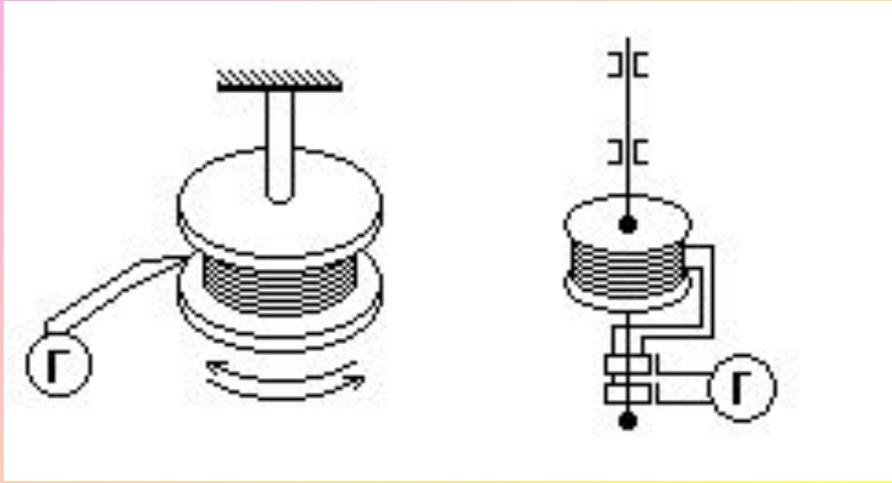


В течение длительного времени ($t > 1$ года) пропускался большой ток ($I = 10$ А)

Массы цилиндров не изменились

Ток в металлах не связан с переносом ионов кристаллической решетки

2) Опыт Толмэна-Стюарта (1916 г.)



Катушка из металлической проволоки приводилась в быстрое вращение (линейная скорость вращения составляла 300 м/с). К выводам катушки прикреплялся чувствительный гальванометр. При резком торможении катушки через гальванометр протекал кратковременный ток. По направлению отклонения стрелки определили, что ток в металлах образуется отрицательно заряженными частицами. По величине отклонения стрелки гальванометра определили прошедший через него заряд, а затем и удельный заряд частиц $\frac{q}{m}$, создающих ток.

Приращение кинетической энергии dW заряженных частиц, прошедших через гальванометр:

$$dW = d(0 - W_0) = -d\left(N \frac{mv^2}{2}\right) = -Nm \cdot d\left(\frac{v^2}{2}\right) = -Nm v \cdot dv$$

N - число заряженных частиц, прошедших через гальванометр;
 n - их концентрация.

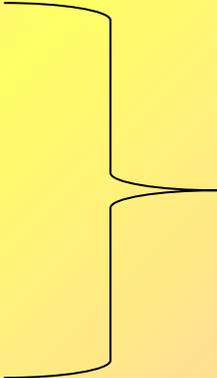
$$N = n \cdot V = n \cdot S \cdot l$$

S - площадь поперечного сечения проволоки;
 l - ее длина.

$$\delta Q = I^2 R dt$$

$$I dt = dq$$

$$I = jS = q_0 n \langle u \rangle S$$


$$\delta Q = q_0 n \langle u \rangle S R \cdot dq$$

Изменение энергии частиц идет на выделение джоулевого тепла в проводнике:

$$dW = \delta Q$$

Отсюда: $-ml \cdot dv = q_0 R \cdot dq$

где $dv = 0 - v$; $dq = q - 0 = q$

$$\frac{q_0}{m} = \frac{vl}{qR} = 1,55 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

Что практически совпадает с удельным зарядом электрона:

$$\frac{|e|}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

Вывод: электрический ток в металлах представляет собой направленное движение электронов проводимости под действием электрического поля.

Классическая Электронная Теория электрорпроводимости металлов (теория Друде-Лоренца)

КЭТ



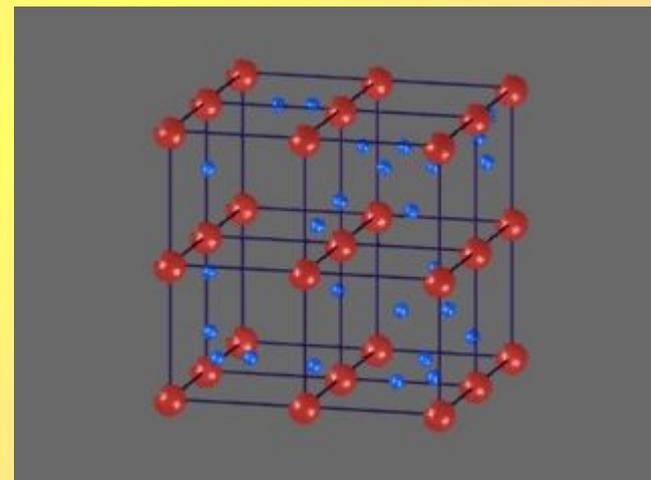
Пауль Друде Карл Людвиг
(1863 — 1906)
немецкий физик

Основные труды по приложениям классической электронной теории: дал теорию электронной проводимости металлов, теорию поляризации света, отражённого от металлической поверхности, теорию дисперсии света.

*Впервые обнаружил и объяснил аномальную дисперсию диэлектрической проницаемости). Предложил методы измерения диэлектрической проницаемости и показателя поглощения жидких диэлектриков в метровом и дециметровом диапазонах электромагнитных волн.
Член Берлинской АН*

КЭТ

При образовании кристаллической решетки в металлах атомы сближаются так, что валентные оболочки перекрываются. Внешние электроны, наиболее слабо связанные с атомом, при этом отщепляются и становятся свободными. Атом становится положительным ионом. Переходя от атома к атому, электрон становится собственностью уже не отдельного атома, а всего кристалла в целом. Положительные ионы кристаллической решетки удерживаются вместе за счет взаимодействия со всеми свободными электронами. Такой вид связи атомов называется металлической связью.



Согласно КЭТ свободные электроны в металлах движутся и взаимодействуют с ионами кристаллической решетки подобно молекулам идеального газа. Они образуют электронный газ. Для электронного газа справедливы те же статистические закономерности, что и для идеального газа.

Пользуясь представлениями КЭТ, можно получить основные законы электрического тока для металлических проводников.

1. Закон Ома.

Средняя скорость направленного движения электронов в металле равна его средней арифметической скорости за время свободного пробега τ :

$$\left. \begin{aligned} \langle u \rangle &= \frac{u_0 + u_{\max}}{2} = \frac{0 + u_{\max}}{2} = \frac{u_{\max}}{2} \\ u_{\max} &= a\tau = \frac{F\tau}{m} = \frac{|e|E\tau}{m} \end{aligned} \right\} \langle u \rangle = \frac{|e|E\tau}{2m}$$

Время свободного пробега электрона $\tau = \frac{\langle l \rangle}{\langle v_T \rangle}$

$$j = en\langle u \rangle = \frac{ne^2\tau}{2m} E = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\langle v_T \rangle} E$$

Обозначим удельную проводимость вещества γ

$$\gamma = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\langle v_T \rangle}$$

Тогда

$$j = \gamma E$$

2. Закон Джоуля-Ленца.

При каждом столкновении с ионами кристаллической решетки электрон отдает всю энергию, приобретенную им за время свободного пробега:

$$\Delta W_k = W_k - W_{k0} = \frac{m u_{\max}^2}{2} - 0 = \frac{m u_{\max}^2}{2}$$

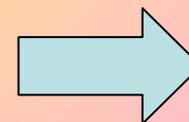
С учетом $u_{\max} = \frac{|e|E\tau}{m}$

$$\Delta W_k = \frac{m e^2 \tau^2}{2m^2} E^2 = \frac{e^2 \tau^2}{2m} E^2 = \frac{e^2 \langle l \rangle^2}{2m \langle v_T \rangle^2} E^2$$

Выделяющаяся в проводнике теплота определяется потерями кинетической энергии всеми N электронами проводимости: $Q = N \Delta W_k = nV \Delta W_k$

Удельная тепловая мощность:

$$w = \frac{Q}{Vt} = \frac{n \langle v_T \rangle}{\langle l \rangle} \Delta W_k = n \frac{\langle v_T \rangle}{\langle \lambda \rangle} \frac{e^2 \langle l \rangle^2}{2m \langle v_T \rangle^2} E^2 = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m \langle v_T \rangle} E^2$$



$$w = \gamma E^2$$

3. Закон Видемана–Франца (1853 г.)

Отношение коэффициента теплопроводности λ к удельной проводимости γ вещества прямо пропорционально температуре:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = CT$$

Закон Фурье для теплопроводности: $j_Q = \frac{Q}{St} = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \frac{dT}{dx}$

$$\lambda = \frac{1}{3} c_V \langle l \rangle \langle v_T \rangle \rho$$

$$c_V = \frac{C_V}{M} = \frac{3R}{2M} = \frac{3R}{2mN_A} = \frac{3k}{2m}$$

$$\gamma = \frac{ne^2 \langle l \rangle}{2m \langle v_T \rangle}$$

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \frac{\langle l \rangle \langle v_T \rangle \rho 3km^2 \langle v_T \rangle}{3 \cdot 2mne^2 \langle l \rangle} = \frac{\langle v_T \rangle^2 \rho k}{ne^2}$$

Полагая

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

Плотность электронного газа можно рассчитать как

$$\rho = \frac{m_\Sigma}{V} = \frac{mN}{V} = mn$$

Подставляя, получим

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \frac{3kTmnk}{mne^2} = \frac{3k^2}{e^2} T = CT$$

$$\text{где } C = \frac{3k^2}{e^2} = \text{const}$$

Затруднения КЭТ

Классическая электронная теория испытывает затруднения в объяснении этих вопросов.

1. Температурная зависимость сопротивления.

По КЭТ должно быть $\gamma \sim \frac{1}{\langle v_T \rangle}$

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

$$\langle v_T \rangle \sim \sqrt{T}$$

$$\rho \sim \langle v_T \rangle \sim \sqrt{T}$$

КЭТ

Однако из опыта известно, что $\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T)$

$$\rho \sim T$$

ОПЫТ!

2. Закон Дюлонга-Пти.

Обладая тепловой энергией, электронный газ должен вносить вклад в теплоемкость кристалла. Теплоемкость металла складывается из теплоемкости кристаллической решетки и теплоемкости электронного газа.

$$C = \frac{i}{2} R$$

$$C_{Me} = C_{реш} + C_e = \frac{6}{2} R + \frac{3}{2} R = 4,5R$$

Но согласно эмпирическому закону Дюлонга-Пти:

Молярная теплоемкость химически простых веществ при комнатных температурах равна: $C_m = 3R$

Следовательно, наличие электронного газа никак не сказывается на значении теплоемкости металлов, что необъяснимо в рамках классической теории

3. Средняя длина свободного пробега электронов.

Чтобы расчетное значение γ согласовалось с экспериментальным значением, необходимо допустить, что средняя длина свободного пробега в сотни раз превышает постоянную решетки. Для этого электроны должны проходить сотни междоузельных расстояний, не сталкиваясь с ионами. Это противоречит основным положениям классической электронной теории электропроводности металлов.

4. Коэффициент в законе Видемана-Франца.

Значение коэффициента $C = \frac{3k^2}{2e^2}$, полученного Друде, оказалось близким к экспериментальным данным.

Лоренц попробовал уточнить его, учтя максвелловское распределение молекул по скоростям и получил что еще хуже согласуется с опытом.

$$C = \frac{2k^2}{e^2}$$

Сейчас мы знаем, что истинное значение $C = \frac{\pi^2 k^2}{3e^2}$

Описанные затруднения связаны с тем, что классическая теория не учитывает ряд специфических свойств электронов. Эти свойства были установлены позднее, и на их основе была создана новая теория движения элементарных частиц – квантовая механика.

Все затруднения КЭТ снимаются в рамках квантовой теории электропроводности металлов.

Тем не менее, в большинстве случаев классическая электронная теория электропроводности металлов дает правильные результаты, являясь в то же время более простой и наглядной, чем квантовая механика.

3.2.4. Электрический ток в жидкостях.

1. Электролиты.
2. Электролитическая диссоциация. Степень диссоциации.
3. Подвижность ионов. Закон Ома для электролитов.
4. Электролиз. Законы электролиза.
5. Применение электролиза.

3.2.5. Электрический ток в газах.

1. Электропроводность газов. ВАХ газового разряда.
2. Несамостоятельный газовый разряд. Ток насыщения.
3. Самостоятельный газовый разряд.
4. Виды самостоятельного разряда (условия, механизм возникновения, применение):
 - 4.1. Тлеющий разряд.
 - 4.2. Искровой разряд.
 - 4.3. Коронный разряд.
 - 4.4. Дуговой разряд.
5. Плазма.