

Тема 3. Классическая теория электропроводности металлов

3.1. Электрический ток. Уравнение непрерывности

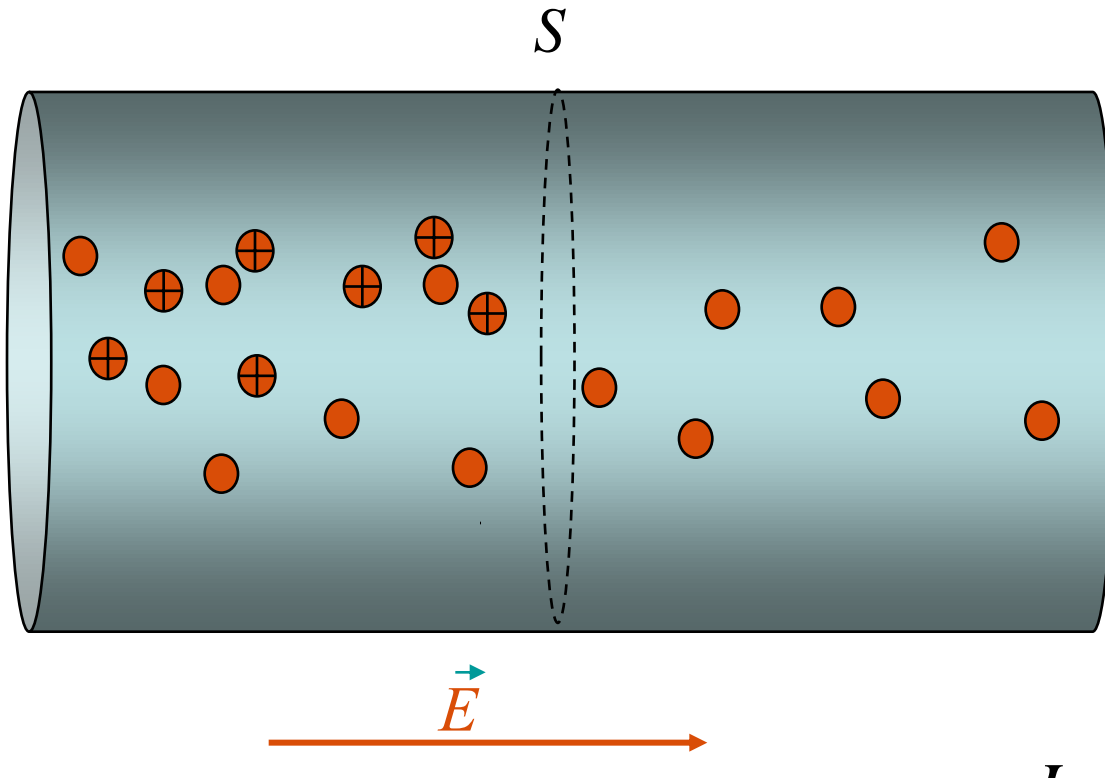


Друде, Пауль
(12.VII.1863–5.VII.1906)



Лоренц (Lorentz), Хендрик
(18.VII.1853–4.II.1928)

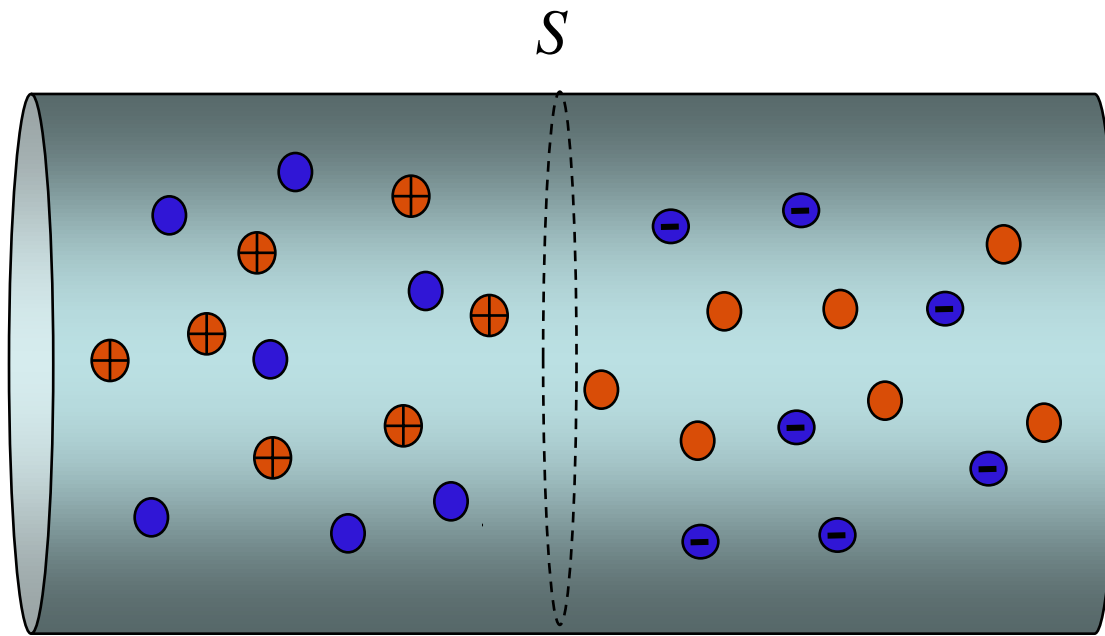
Электрический ток через площадку S :



$$I = \frac{Q}{\Delta t} \quad - \text{ сила тока, А = Кл/с}$$

$$I = \left. \frac{dq}{dt} \right|_S$$

Электрический ток через площадку S :



$$I = \frac{Q}{\Delta t} \quad - \text{ сила тока, А = Кл/с}$$

$$I = \left. \frac{dq}{dt} \right|_S$$

$$I = \frac{dq^+}{dt} + \left| \frac{dq^-}{dt} \right|$$

Опыт Рикке (1901 г.)

$$Q=3,5 \cdot 10^6 \text{ Кл}$$

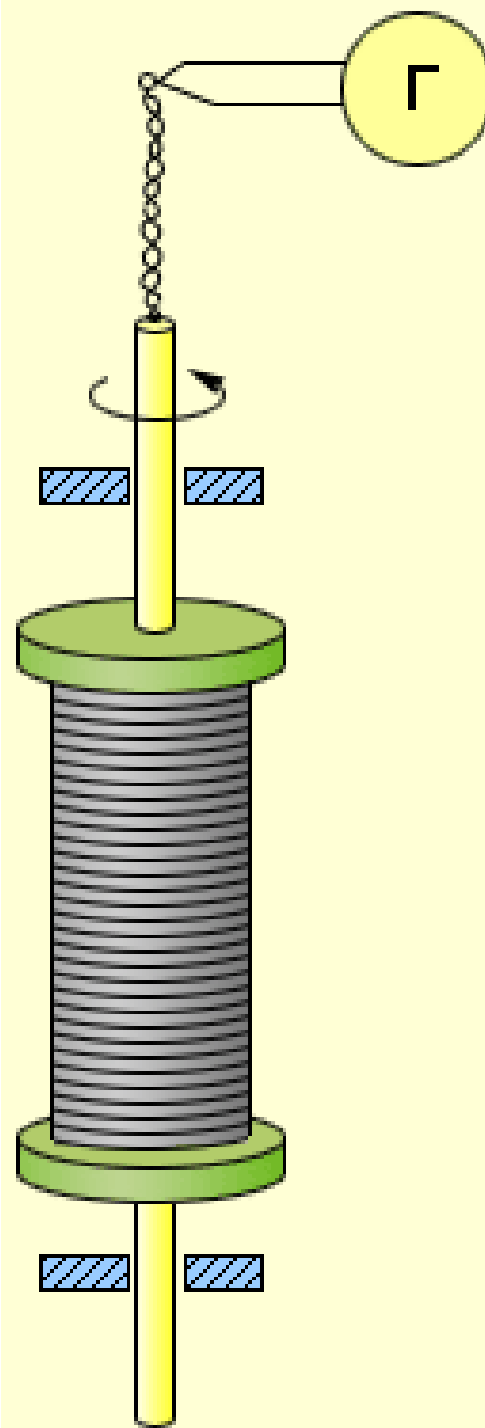


$$Q=2,2 \cdot 10^{25} e$$

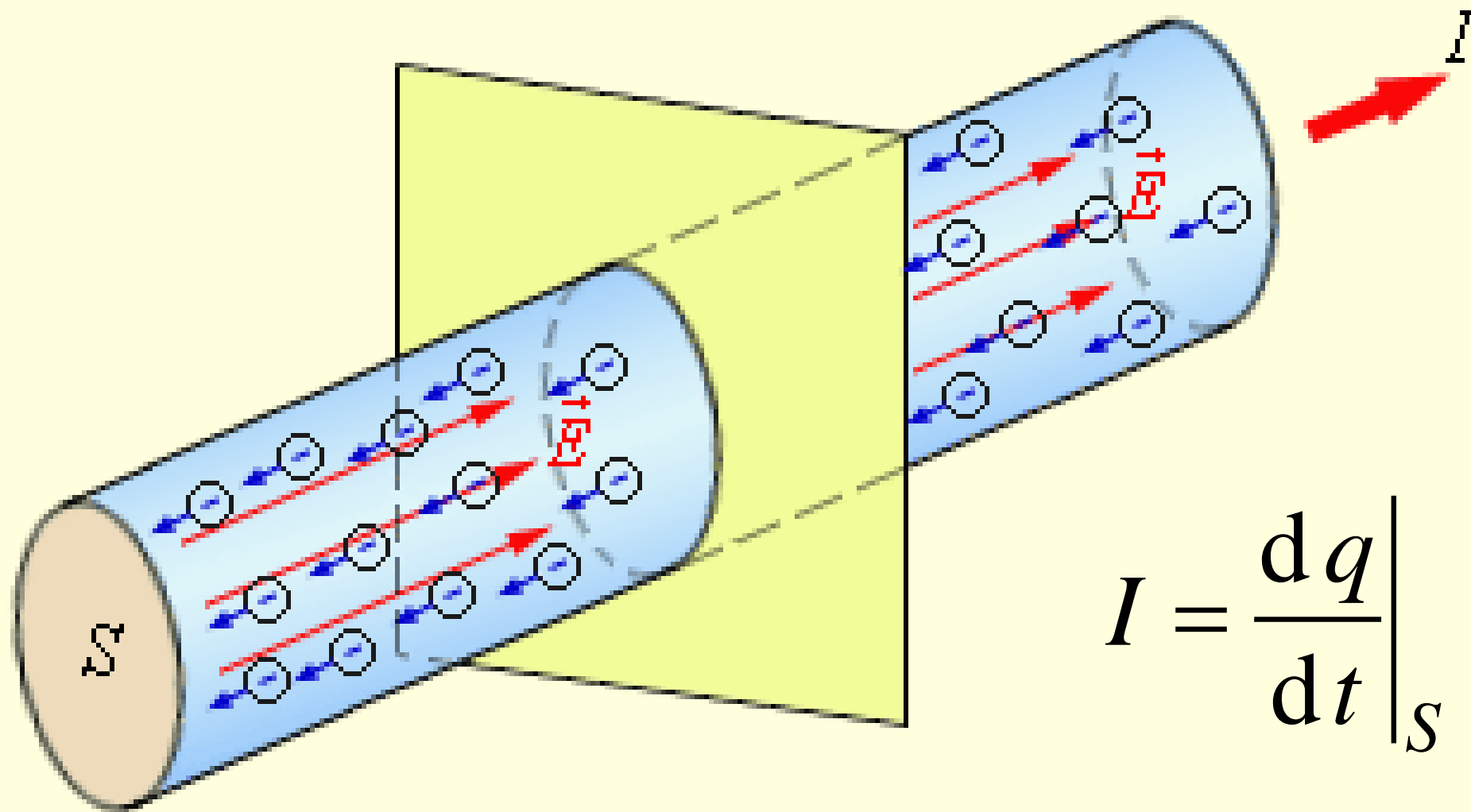
Схема опыта Толмена и Стюарта

$$\frac{q}{m} = -1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

$$q = -e$$

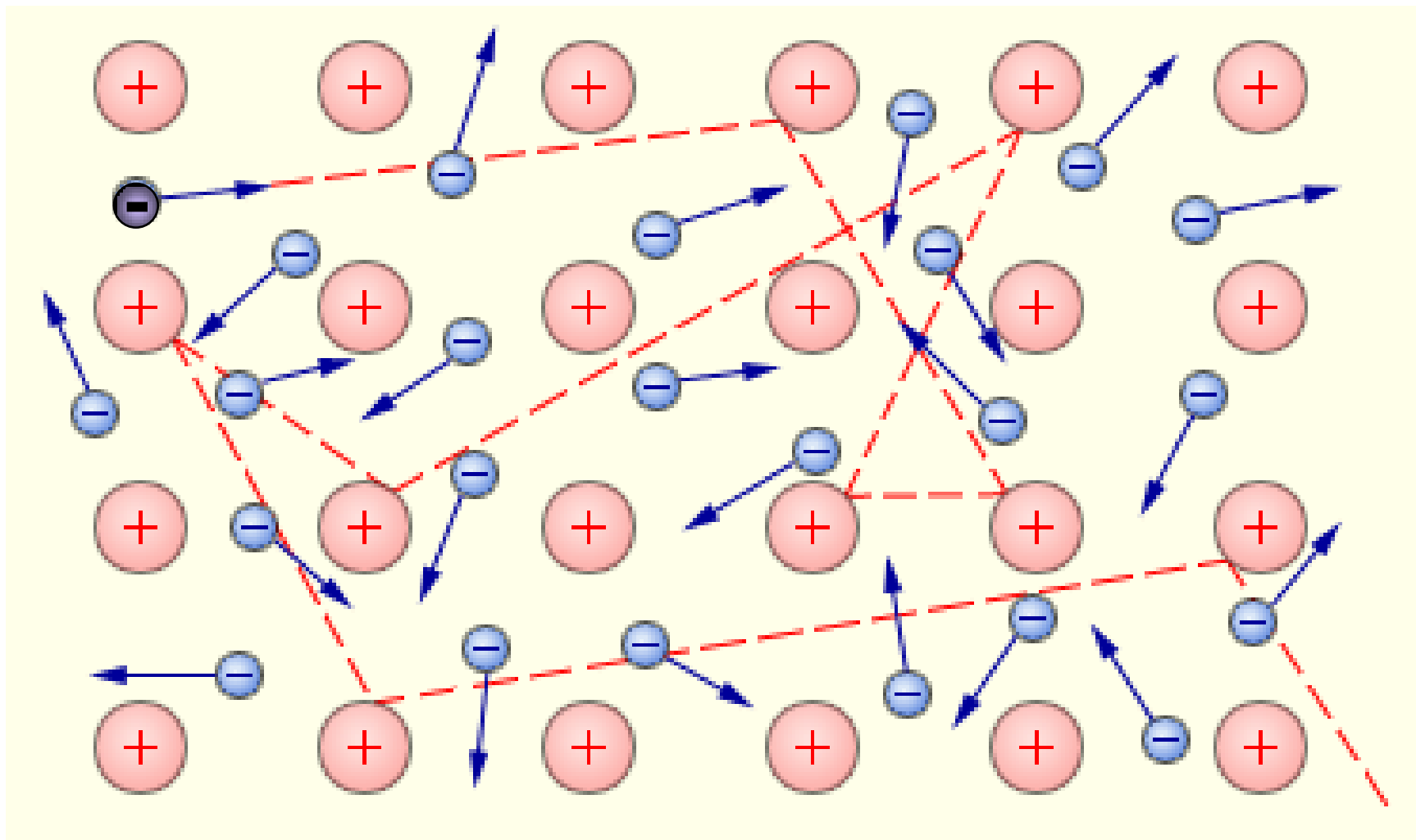


Электрический ток в металлах- упорядоченное движение электронов



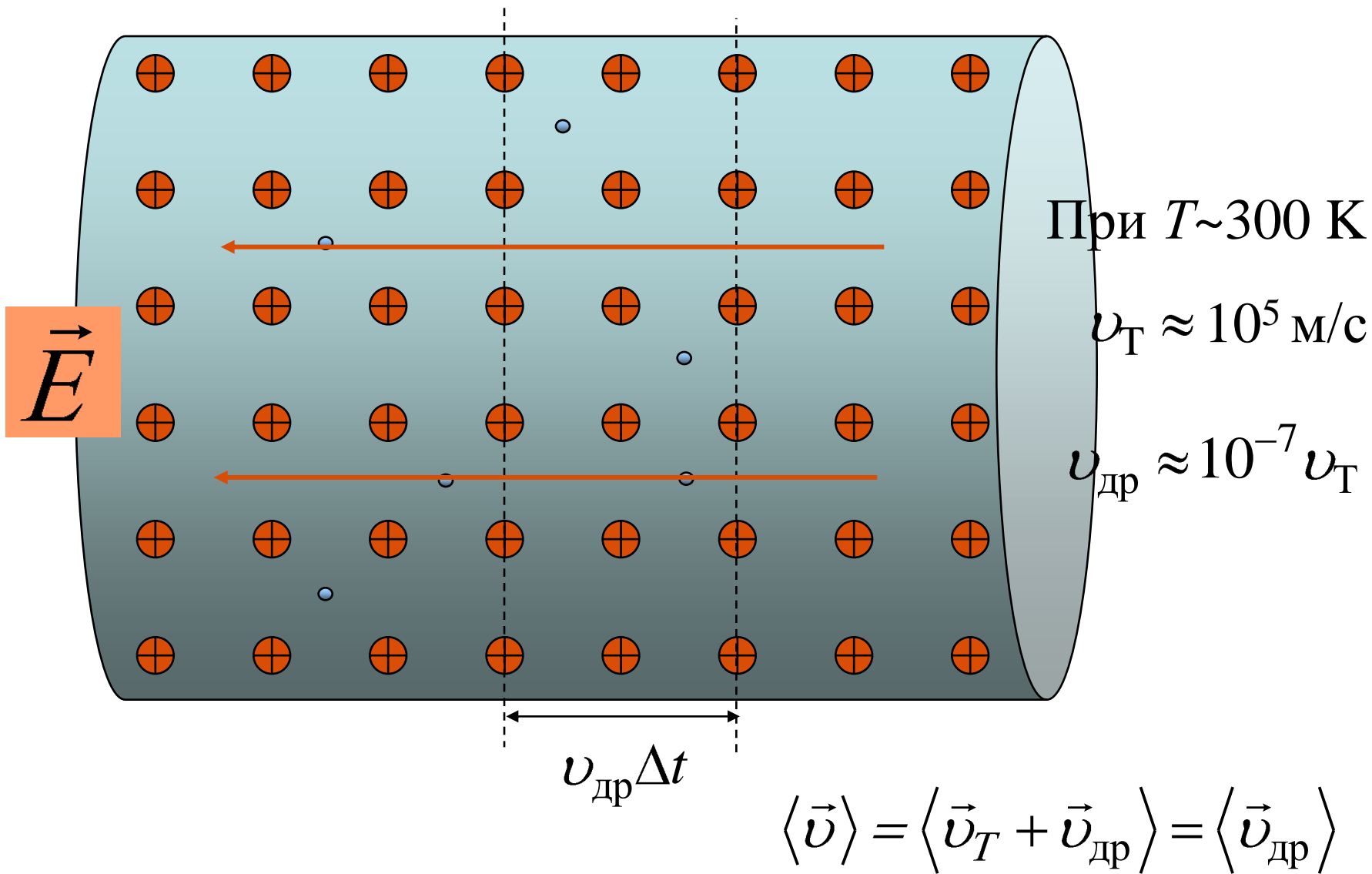
$$I = \left. \frac{dq}{dt} \right|_S$$

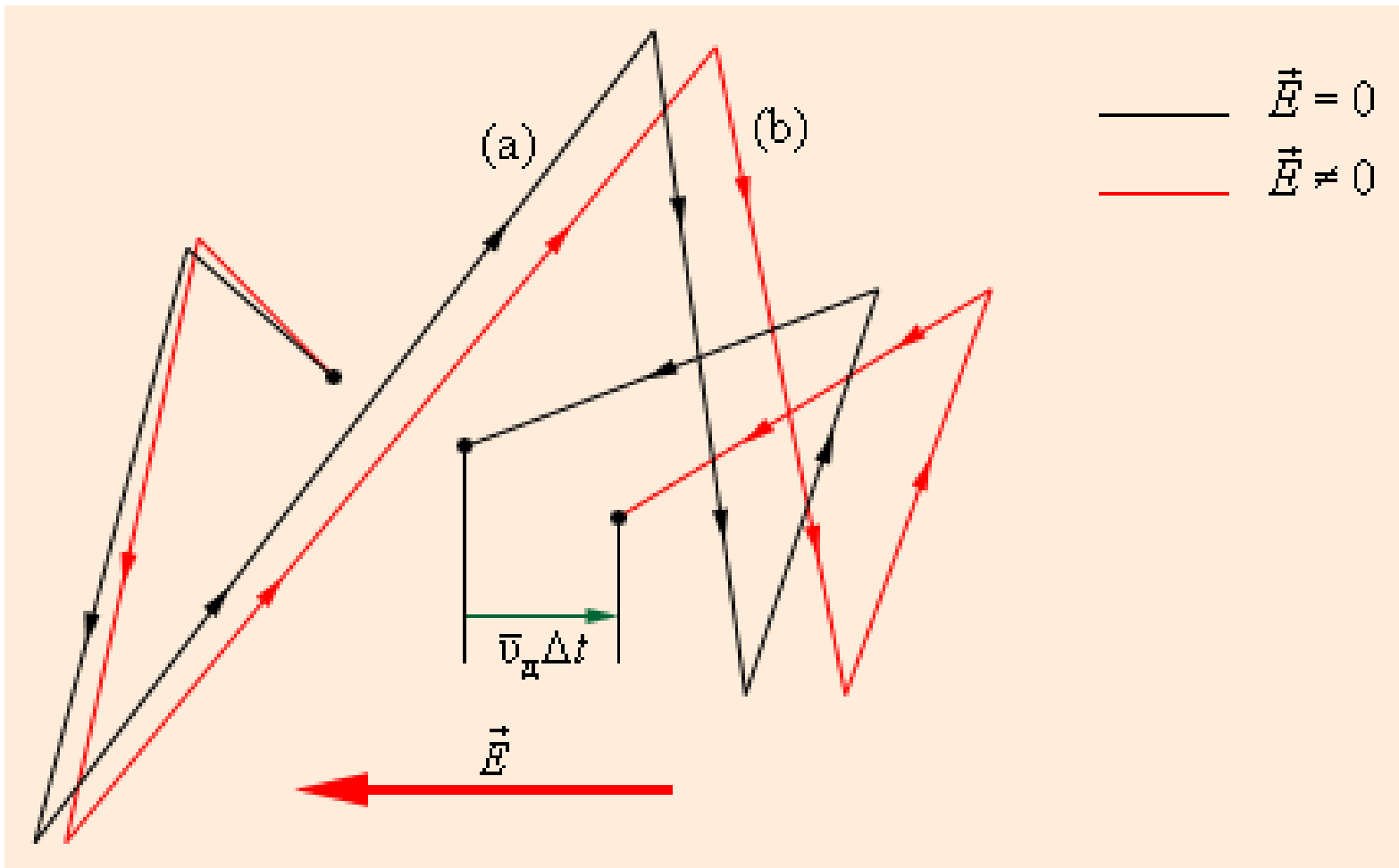
Газ свободных электронов в металле



Показана траектория одного из электронов

Дрейф газа электронов в электрическом поле





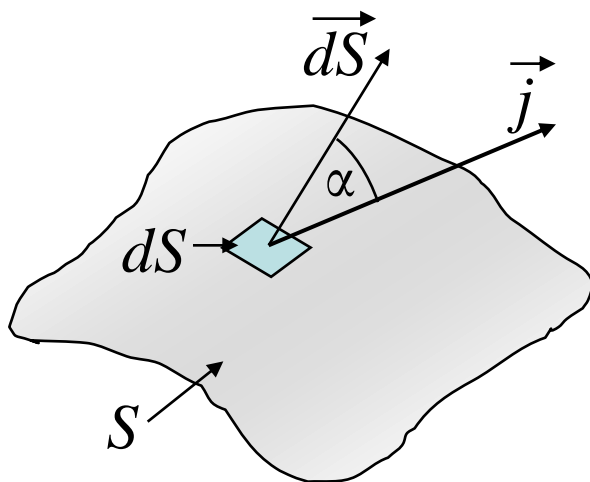
a – хаотическое движение электрона;

b – хаотическое движение с дрейфом

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}$$

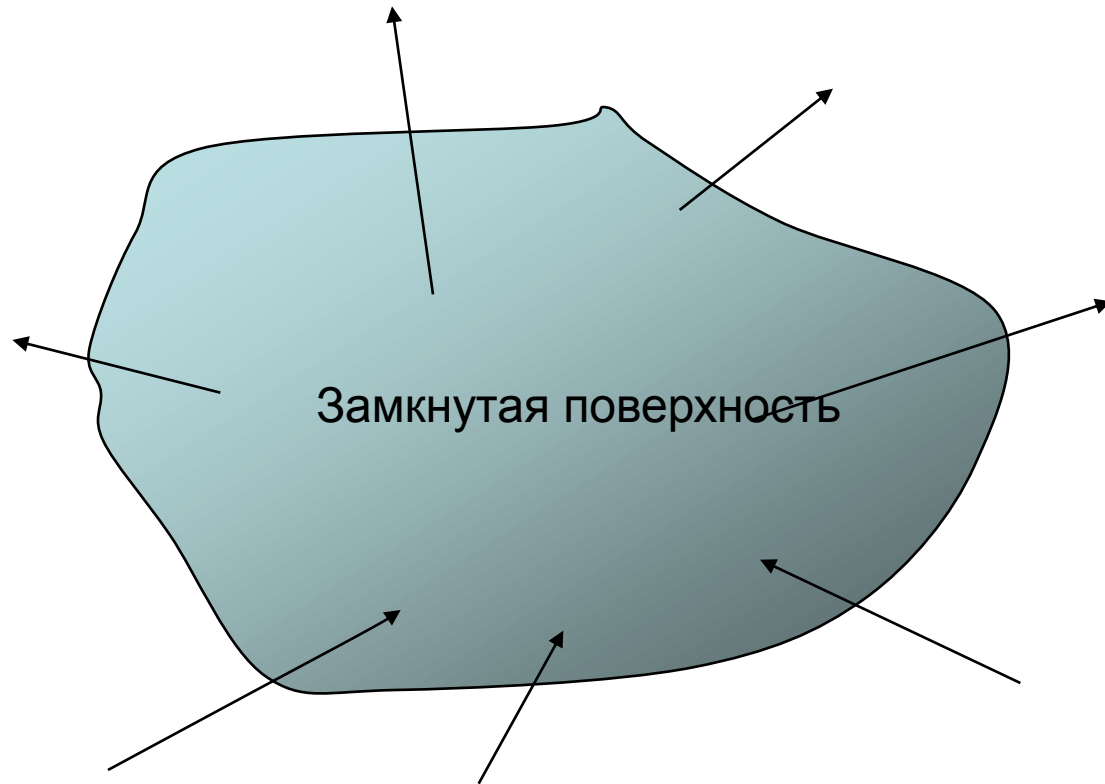
$$dI = \vec{j} d\vec{S} = j dS \cos \alpha$$

Общий случай: произвольная поверхность,
ток неоднородный



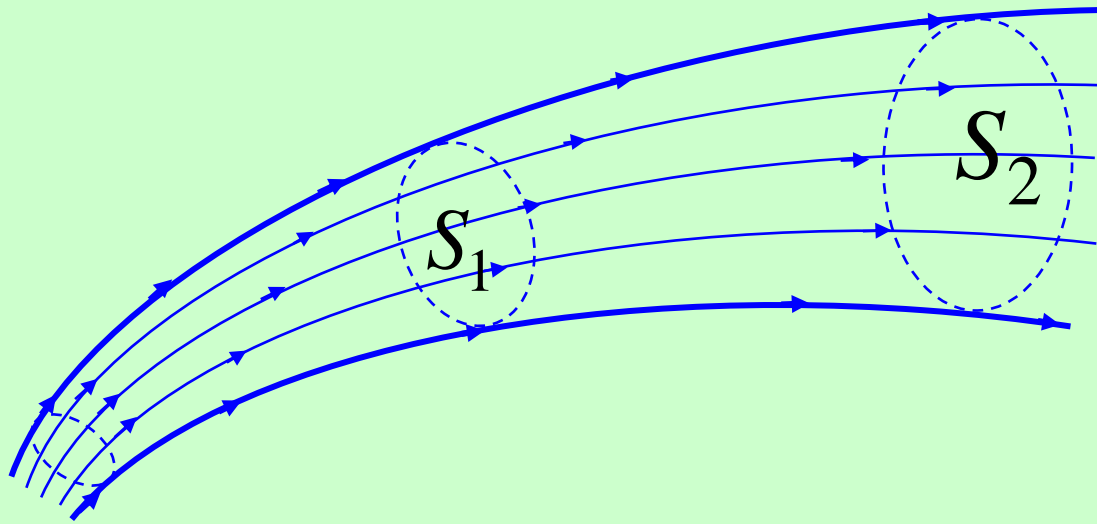
$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \int_S j dS \cos \alpha$$

Уравнение непрерывности



$$\oint_s \vec{j} \cdot d\vec{s} = \begin{cases} > 0 \\ 0 \\ < 0 \end{cases}$$

$$\oint_s \vec{j} \cdot d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV$$



$$j_1 S_1 = j_2 S_2$$

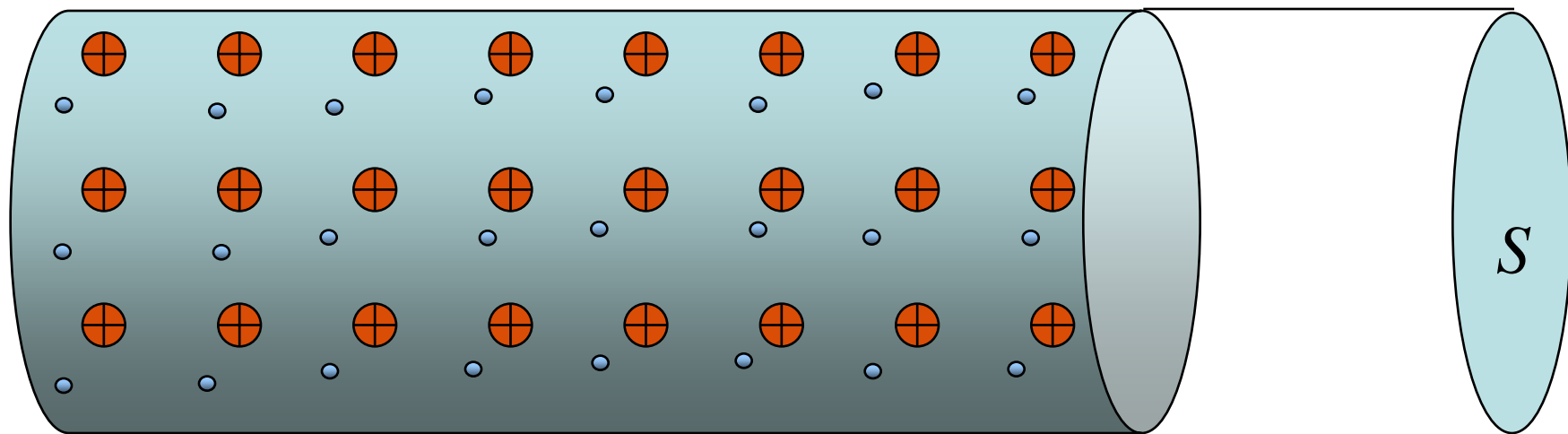
Тема 3. Классическая теория электропроводности металлов

- 3.1. Электрический ток.
Уравнение непрерывности
- 3.2. Элементарная теория электропроводности Друде (1900)



Пауль Друде(12.VII.1863–5.VII.1906)

Дрейф газа электронов в электрическом поле



$$\langle \vec{v} \rangle = \langle \vec{v}_T + \vec{v}_{\text{др}} \rangle = \langle \vec{v}_{\text{др}} \rangle \quad l = \langle v_{\text{др}} \rangle t$$

$$q = enV = enls = en \langle v_{\text{др}} \rangle ts$$

$$\vec{j} = -en \langle \vec{v}_{\text{др}} \rangle$$

Дрейф заряженных частиц вдоль поля

$$\vec{F} = -e\vec{E}; \quad \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{-e\vec{E}}{m};$$

$$\vec{v}_{\text{др}} = \frac{-e\lambda}{2m\omega_T} \vec{E}$$

Плотность тока

$$\vec{j} = -en \langle \vec{v}_{\text{др}} \rangle$$

$$\langle \vec{v}_{\text{др}} \rangle = \frac{-e\lambda}{2m\omega_T} \vec{E}$$

$$\vec{j} = \frac{ne^2\lambda}{2m\omega_T} \vec{E}$$

$$\sigma = \frac{ne^2\lambda}{2m\omega_T}$$

σ – проводимость; $\sigma > 0$ (всегда!)

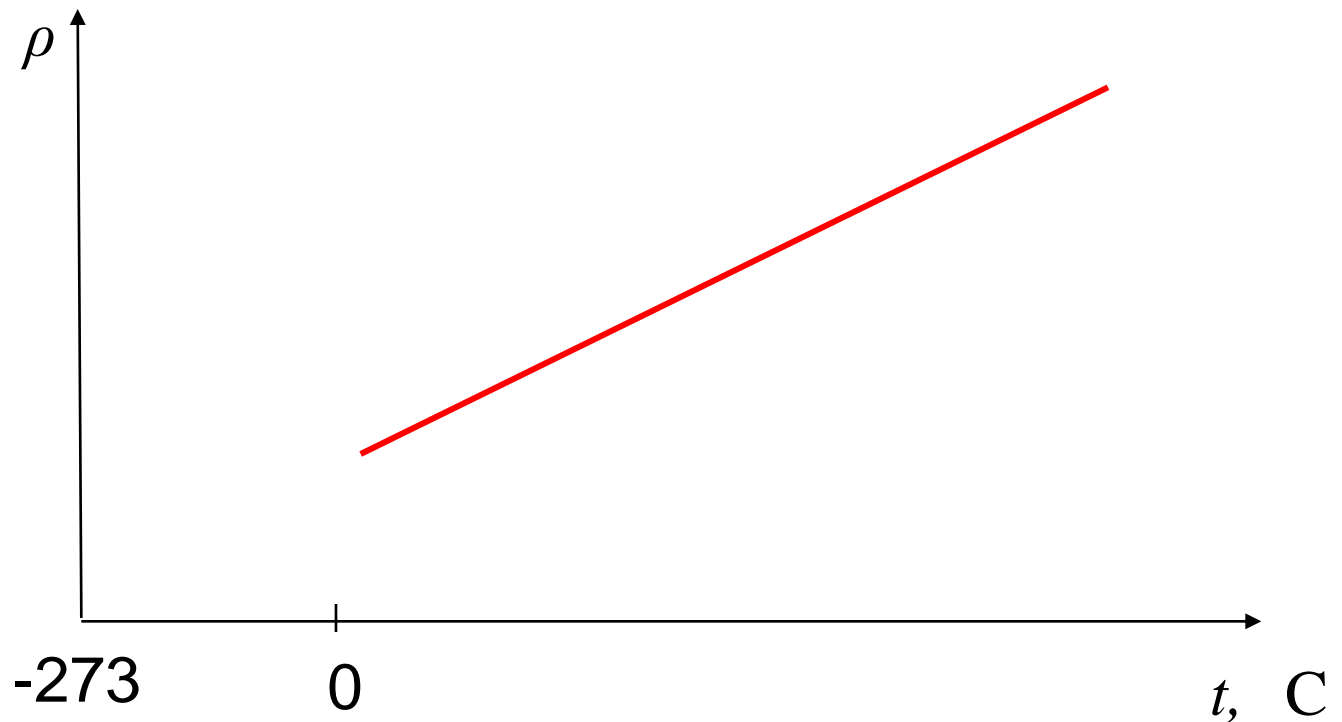
$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

- закон Ома
в дифференциальной форме

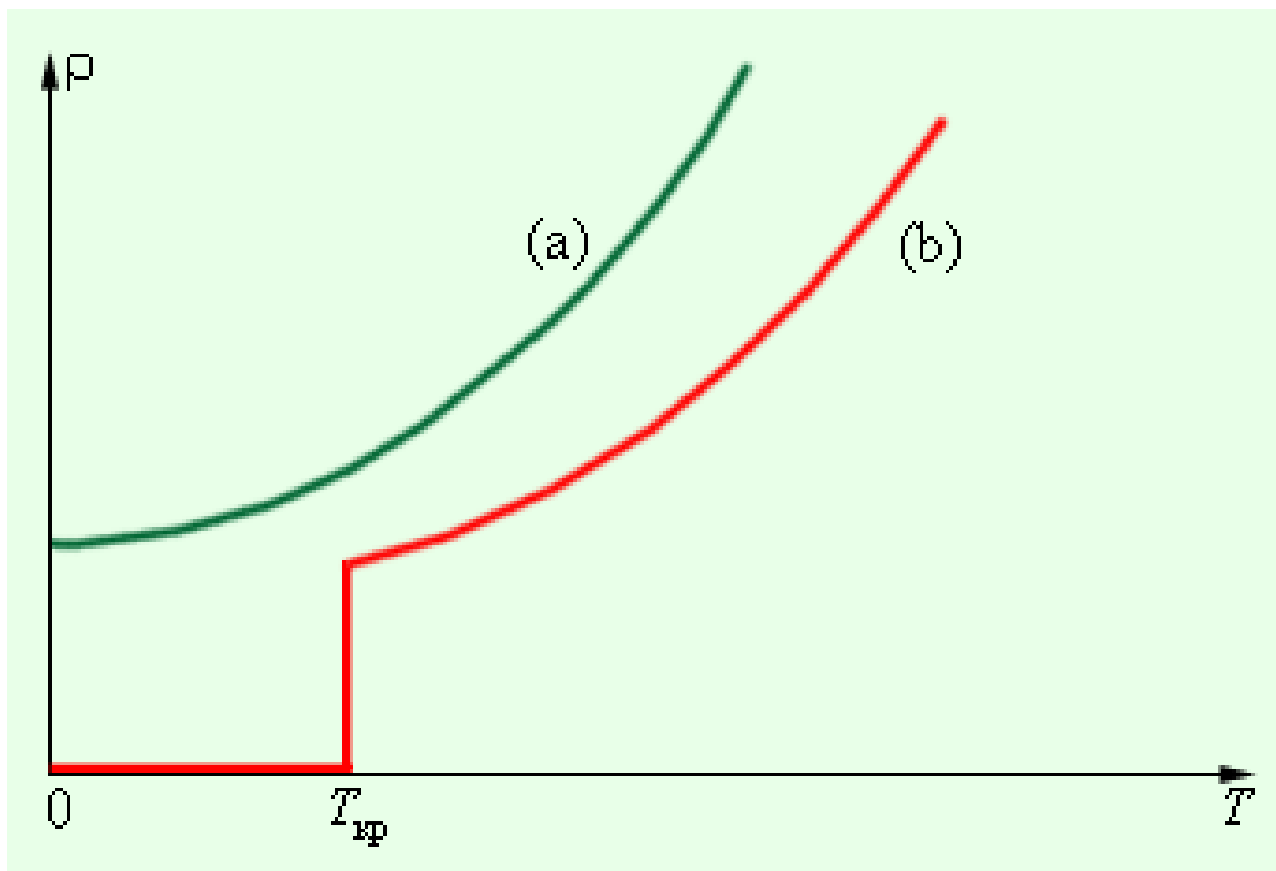
Зависимость удельного сопротивления проводников от температуры

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

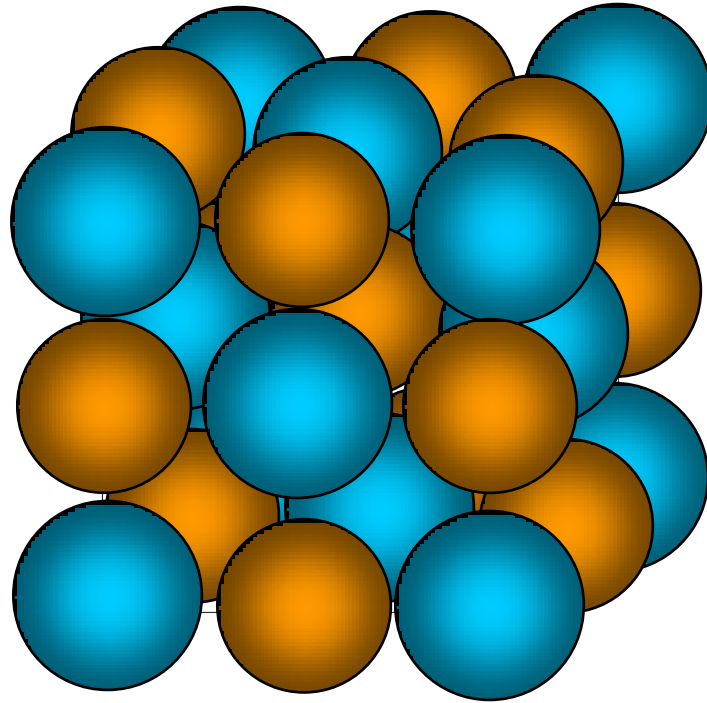
$$[t] = \text{C}$$



Зависимость удельного сопротивления ρ
от абсолютной температуры T
в области низких температур



$$\lambda \approx 30 \text{ \AA}$$

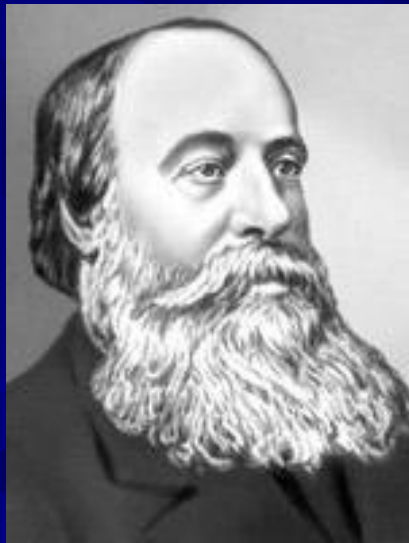


Тема 3. Классическая теория электропроводности металлов

3.2. Элементарная теория электропроводности

Друде (1900)

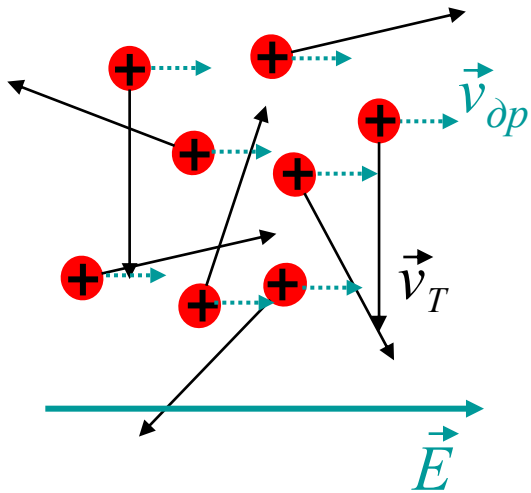
3.3. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме



Джоуль (Joule)
Джеймс Прескотт
(24.XII.1818–11.X.1889)



Ленц
Эмилий Христианович
(12.II.1804–29.I.1865)



Объемная плотность тепловыделения:

$$w = \sigma E^2$$

- закон Джоуля – Ленца
в дифференциальной форме

$$w = \rho j^2$$

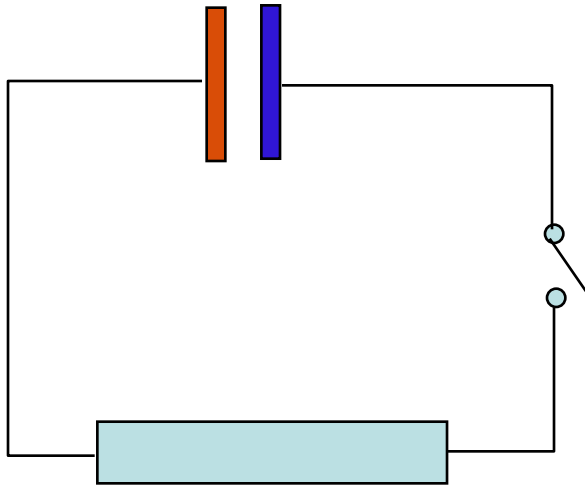
Тема 3. Классическая теория электропроводности металлов

3.3. Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной
форме

3.4. Электродвижущая сила. Закон Ома для участка
цепи



Ом Георг Симон
(16.III.1787–7.VII.1854)

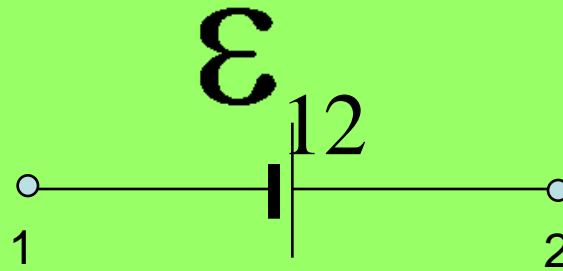


$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Для получения постоянного тока необходимы:

- 1. Замкнутая цепь.
- 2. Сторонние силы.

$$\oint_L \vec{F}_{CT} d\vec{l} \neq 0$$



Неоднородный
участок цепи

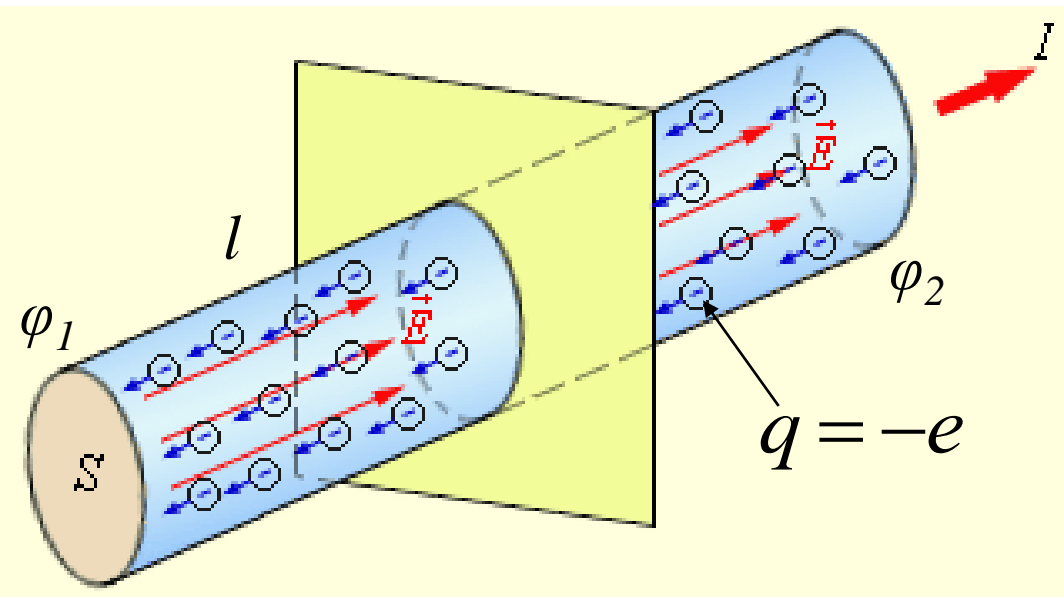
$$\frac{A}{q} = U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$

Физический смысл:

\mathcal{E} - работа сторонних сил над единичным положительным зарядом на участке 1-2

U - работа всех сил над единичным положительным зарядом на участке 1-2

$\varphi_1 - \varphi_2$ - работа электрических сил над единичным положительным зарядом на участке 1-2



Рассмотрим
однородный участок

$$\mathcal{E} = 0 \quad U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

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

$$\int_1^2 \vec{j} d\vec{l} = \sigma \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}$$

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

- сопротивление проводника, Ом = В/А

$$U = IR$$

- закон Ома для однородного участка цепи

Рассмотрим неоднородный участок

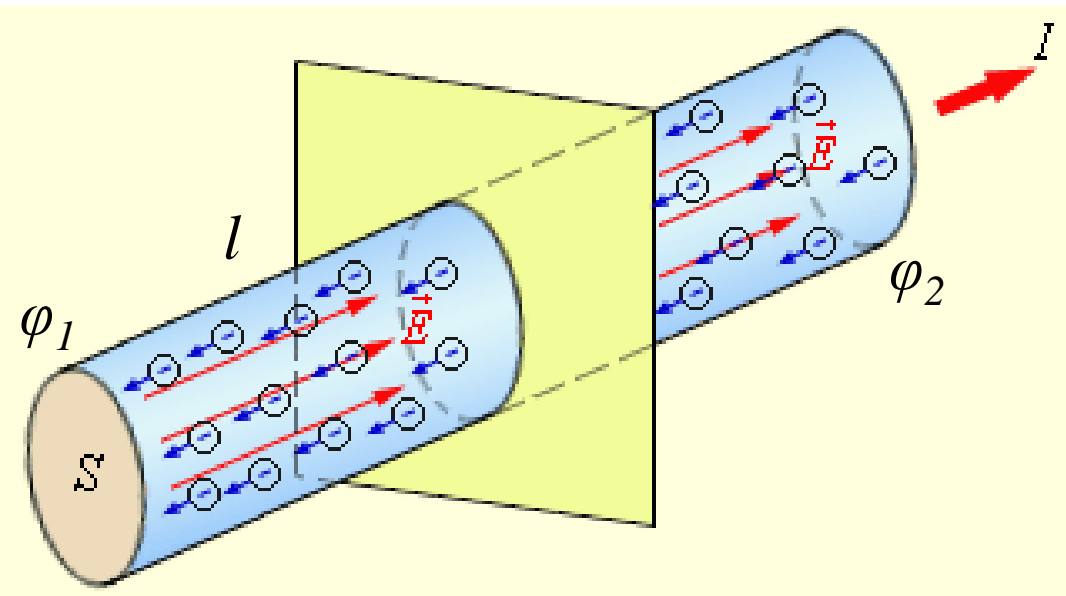
$$\vec{j} = \sigma \left(\vec{E} + \frac{\vec{F}_{cm}}{q} \right)$$

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$

- закон Ома для неоднородного участка цепи

Для замкнутой цепи

$$I \sum R_i = \sum \mathcal{E}_i$$



$$w = \rho j^2 \quad j = \frac{I}{S}$$

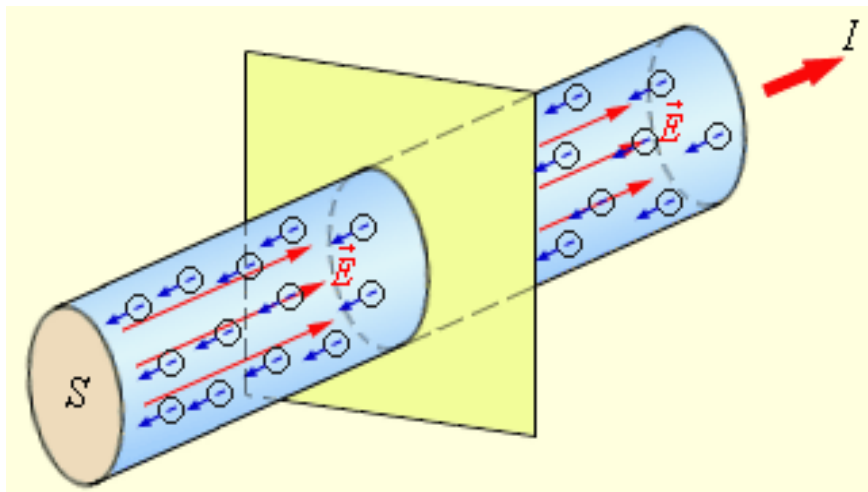
$$W_{\text{Джэ}} = I^2 \rho \frac{l}{S} t$$

$$W_{\text{Джэ}} = I^2 R t$$

закон Джоуля - Ленца

$$W_{\text{Джэ}} = I U t$$

$$W_{\text{Джэ}} = \frac{U^2}{R} t$$



Работа тока

$$A = q\Delta\varphi \quad q = I t$$

$$A = I U t$$

$$A = W_{\text{Дж}}$$

Мощность тока

$$P = \frac{dW}{dt}$$

$$P = I U$$

$$U = I R$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = I^2 R$$

$$[P] = \text{А} \cdot \text{В} = \text{Вт}$$



Ватт (Watt)

Джеймс

(19.I.1736–10.VIII.1819)

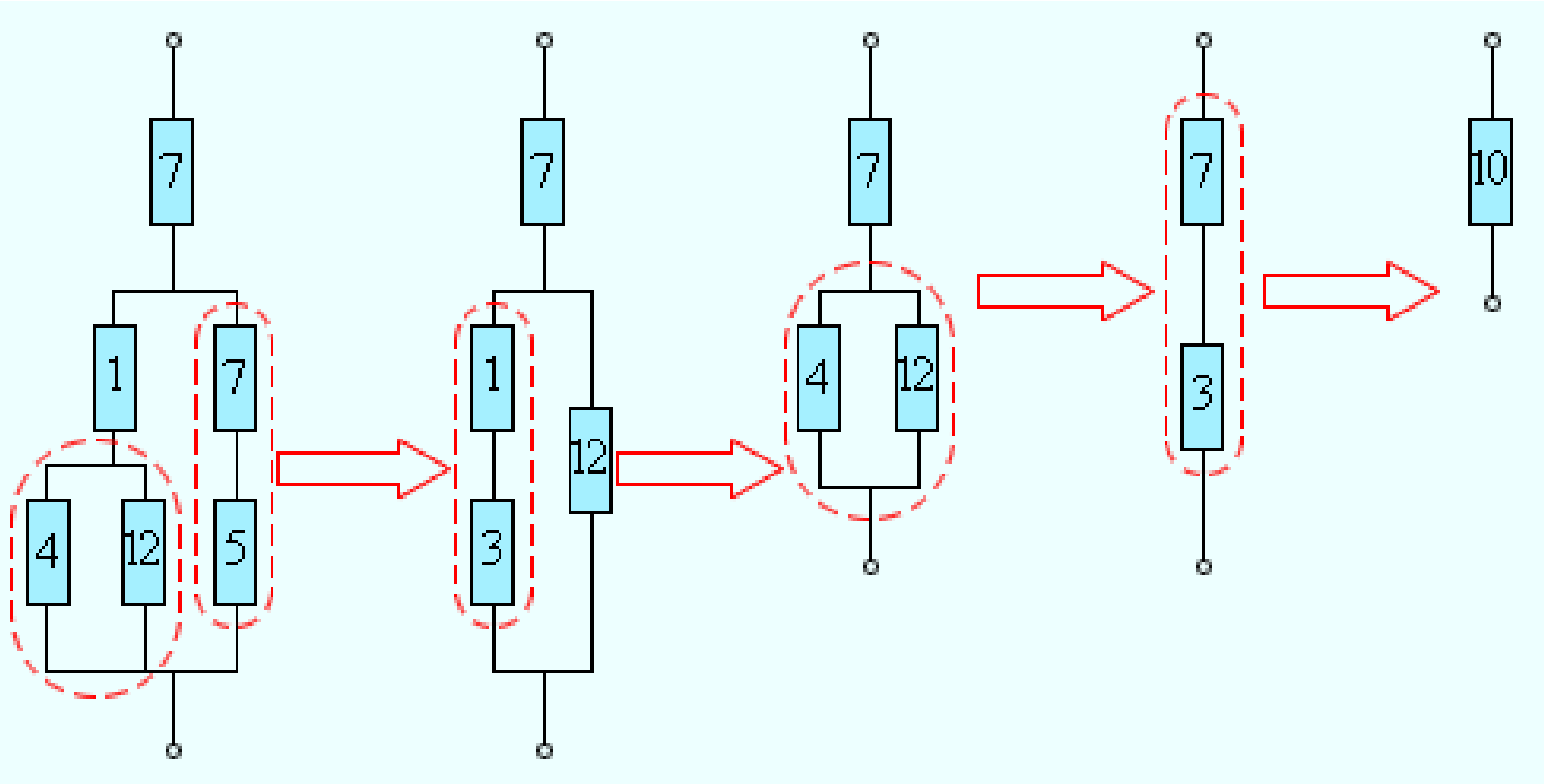
Тема 3. Классическая теория электропроводности металлов

- 3.4. Электродвижущая сила. Закон Ома для участка цепи
- 3.5. Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа

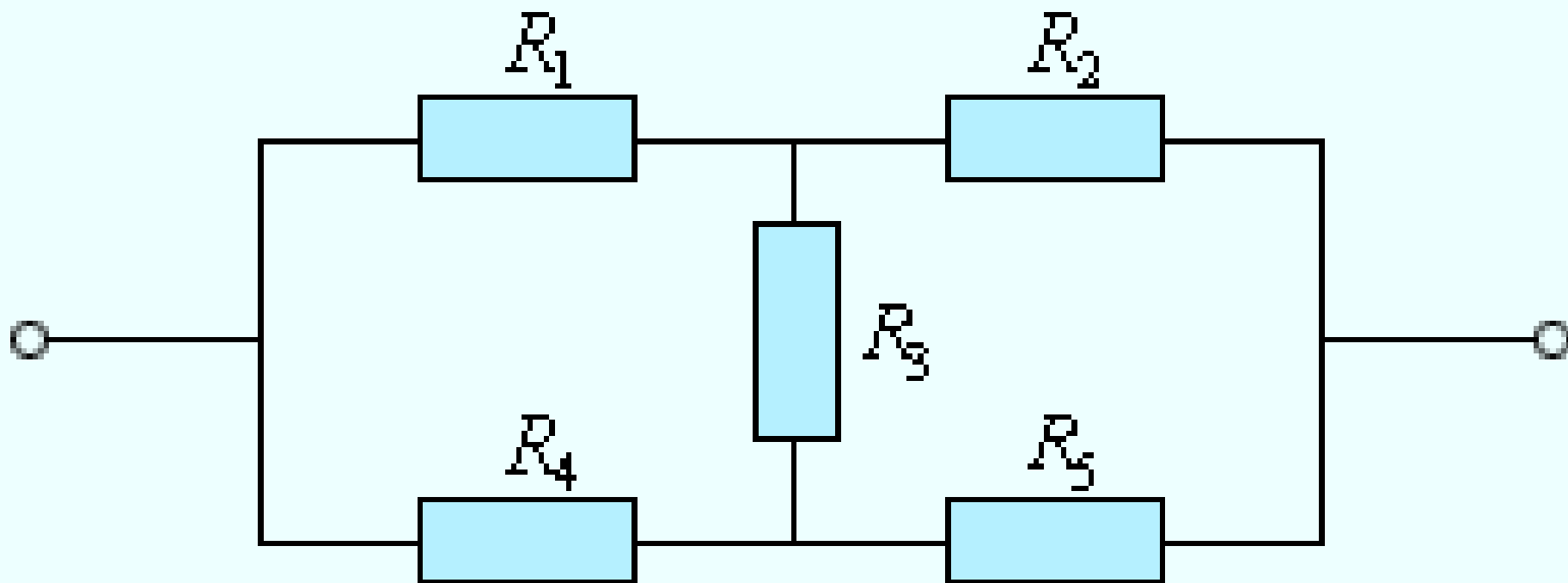


Кирхгоф Роберт (1824–1887)

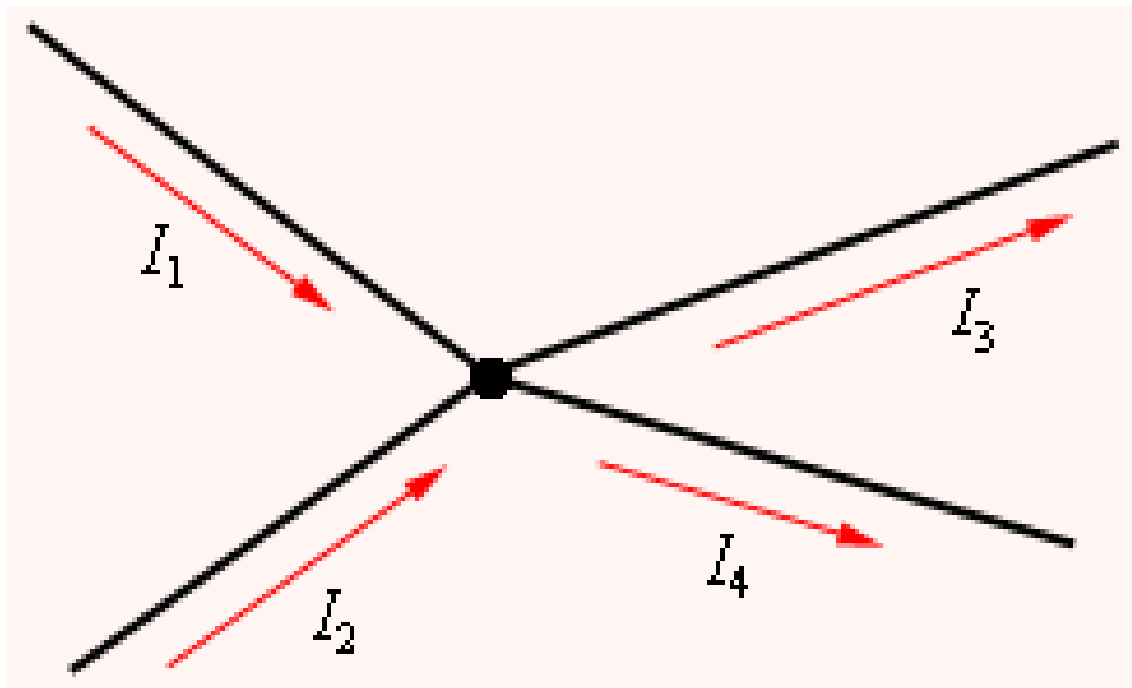
Расчет сопротивления сложной цепи



Пример электрической цепи, которая не сводится к комбинации последовательно и параллельно соединенных проводников

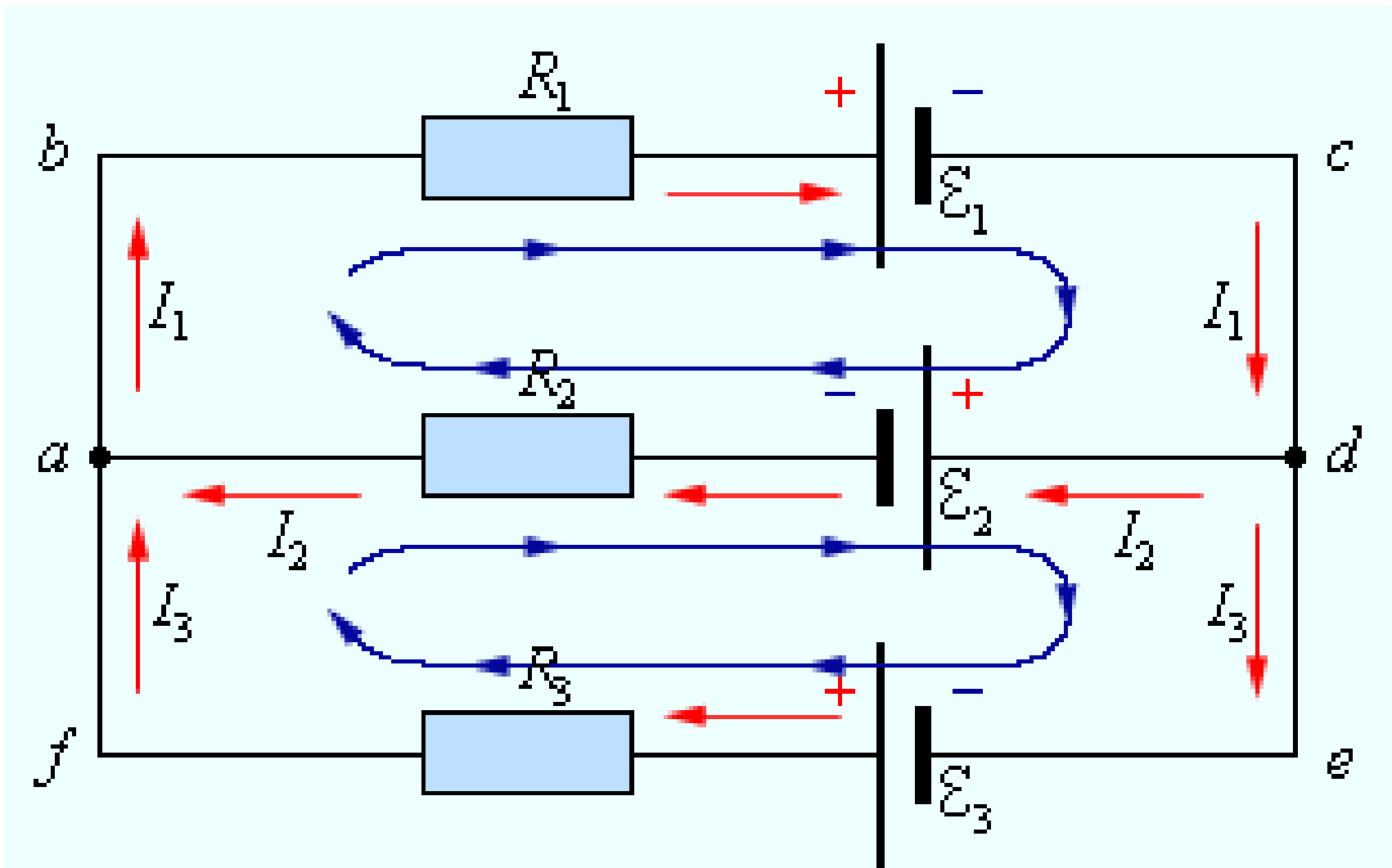


Узел электрической цепи (Первое правило)



$$\sum_k I_k = 0$$

Пример разветвленной электрической цепи



Второе правило

$$\sum_k I_k R_k = \sum_k \mathcal{E}_k$$