

# Лекція № 11

## Електричний струм у металах, рідинах і газах.

1. Робота та потужність постійного електричного струму.
2. Електропровідність металів та розчинів електrolітів. Застосування електролізу.
3. Самостійний газовий розряд, уявлення про плазму.
4. \*Контактні електричні явища та термоелектронна емісія.

# 1. Робота та потужність постійного електричного струму.

При перенесенні заряду  $dq$  ділянкою однорідного провідника виконується елементарна робота  $dA$  :

$$dA = Udq$$

або оскільки  $I = \frac{dq}{dt} \Rightarrow dq = Idt$  , тоді  $dA = I \cdot U \cdot dt$  .

При постійному струмі силою  $I$  за скінченний проміжок часу  $t$  робота електричного струму на зовнішній ділянці кола:

$$A = IU \int_0^t dt = IUt$$

На підставі закону Ома для однорідної ділянки кола *робота електричного струму на зовнішній ділянці кола:*

$$A = IUt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t .$$

Якщо струм з часом змінюється,  $I = I(t)$ , то робота струму за час  $t$ :

$$A = \int_0^t I^2(t) R dt .$$

Оскільки ЕРС джерела струму чисельно дорівнює роботі, що виконується при перенесенні одиничного заряду по замкненому колу, то при постійному струмі силою  $I$  за час  $t$  *повна робота*:

$$A_{\text{пов}} = \varepsilon \cdot q = \varepsilon \cdot I \cdot t = \frac{\varepsilon^2 t}{R + r} .$$

**Потужністю електричного струму** називають скалярну фізичну величину, що чисельно дорівнює роботі, яку виконує струм за одиницю часу:

$$P = \frac{A}{t} .$$

Потужністю в 1 *ват* (1 *Вт*) характеризують такий струм, при проходженні якого через провідник щосекунди виділяється енергія в 1 *Дж* –  
1 *Вт*=1 *Дж*/1 *с*.

*Корисна потужність у зовнішній частині кола опором  $R$  при постійному струмі:*

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} ,$$

*або з урахуванням закону Ома для замкненого кола повна потужність на зовнішній і внутрішній частинах електричного кола:*

$$P_{\text{пов}} = \varepsilon I = \frac{\varepsilon^2}{R + r}$$

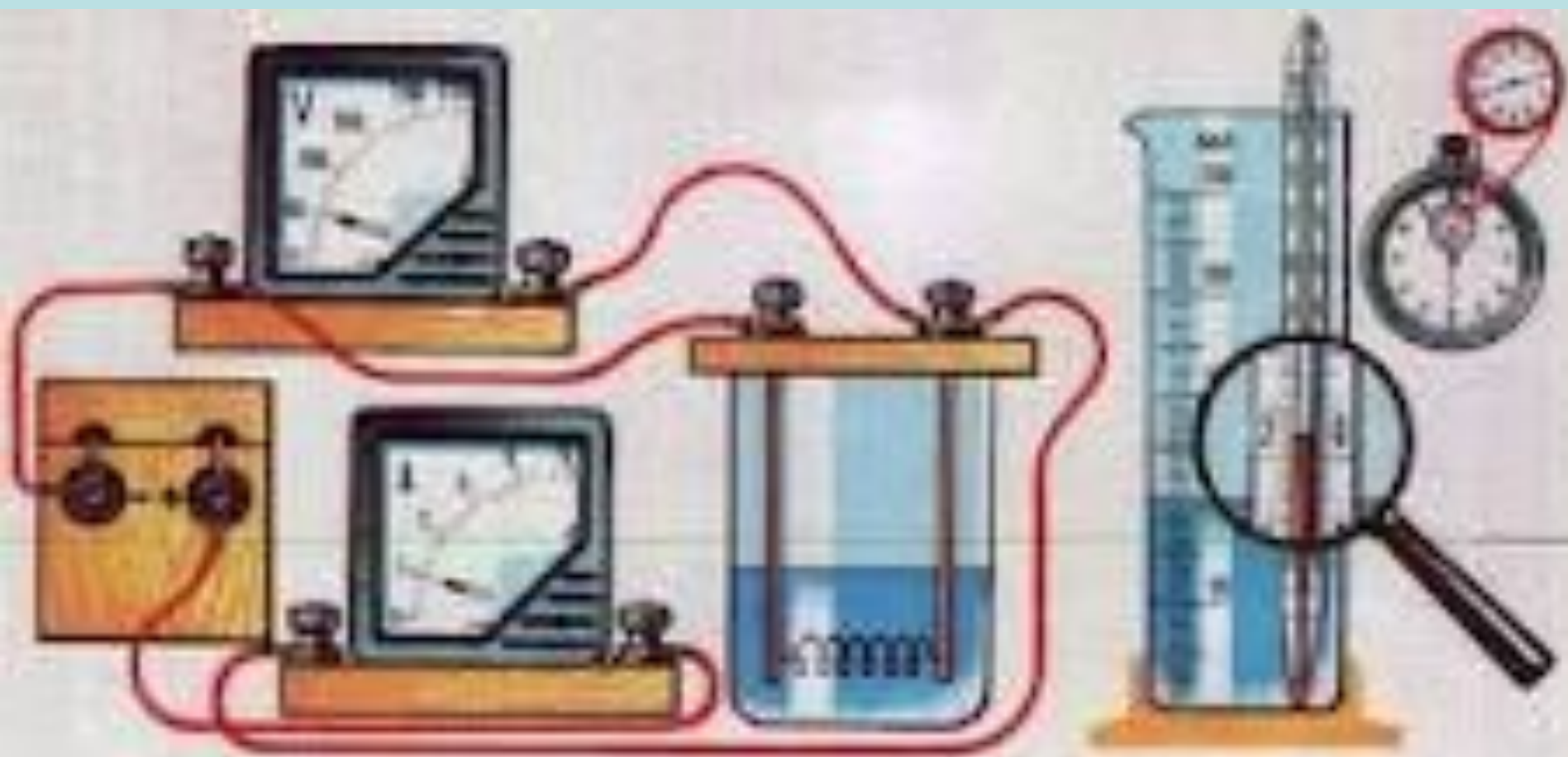
*Коефіцієнт корисної дії джерела струму визначають відношенням корисної потужності до загальної потужності джерела:*

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{нов}}} = \frac{R}{R + r}$$

При проходженні струму по нерухомому провіднику, в якому не відбуваються хімічні перетворення, робота струму перетворюється у внутрішню енергію провідника. Це положення експериментально встановив Дж. Джоуль у 1841 р. і на дослідах підтвердив Е. Ленц у 1842 р, тому воно формулюється як **закон Джоуля-Ленца**: *кількість теплоти, що виділяється у провіднику при проходженні по ньому постійного електричного струму, прямо пропорційна добуткові квадрата сили струму, опору провідника і часу проходження струму:*

$$Q = I^2 R t .$$





# Джеймс Джоуль



# Еміль Ленц



Якщо виразити кількість теплоти, яка виділяється на окремих ділянках провідника через локальні характеристики провідника та електричного поля в ньому, то одержимо вираз закону Джоуля-Ленца у диференціальній формі:

$$\omega = \sigma \vec{E}^2$$

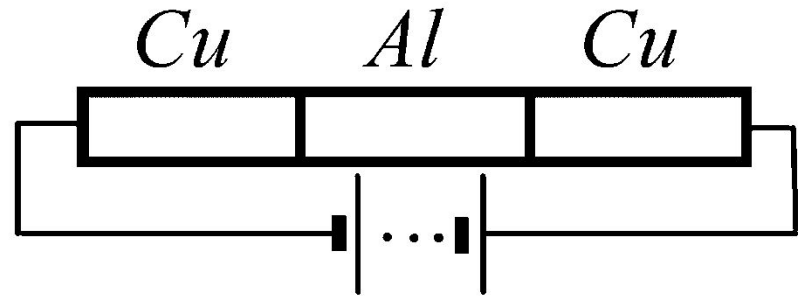
Теплова дія електричного струму використовується у лампах розжарювання, побутових нагрівних приладах (нагрівачах води, обігрівачах, плитах, прасках, чайниках, пральних машинах), запобіжниках, промислових муфельних пічках, при контактному електрозварюванні.



## **2. Електропровідність металів та розчинів електролітів. Застосування електролізу.**

Численні експерименти, виконані різними вченими в ХІХ ст., дали багатий матеріал для створення науково обґрунтованої теорії електричної провідності металів.

Перші досліді із з'ясування механізму електропровідності металів виконав Е. Рікке. В електричне коло постійного струму було увімкнено три послідовно з'єднані циліндри з хімічно чистих алюмінію і міді, які щільно притискувались один до одного. Через коло протягом року пропускали електричний струм. За весь час через циліндри пройшов електричний заряд, що дорівнює  $3,5 \cdot 10^6 \text{ Кл}$ . Проте ніяких ознак перенесення речовини (*Cu*, *Al*) не було виявлено. Це було експериментальним доказом того, що іони в металах не беруть участі в перенесенні електрики, а перенесення заряду в металах здійснюється частинками, які є однаковими для усіх металів. Такими частинками можуть бути електрони.

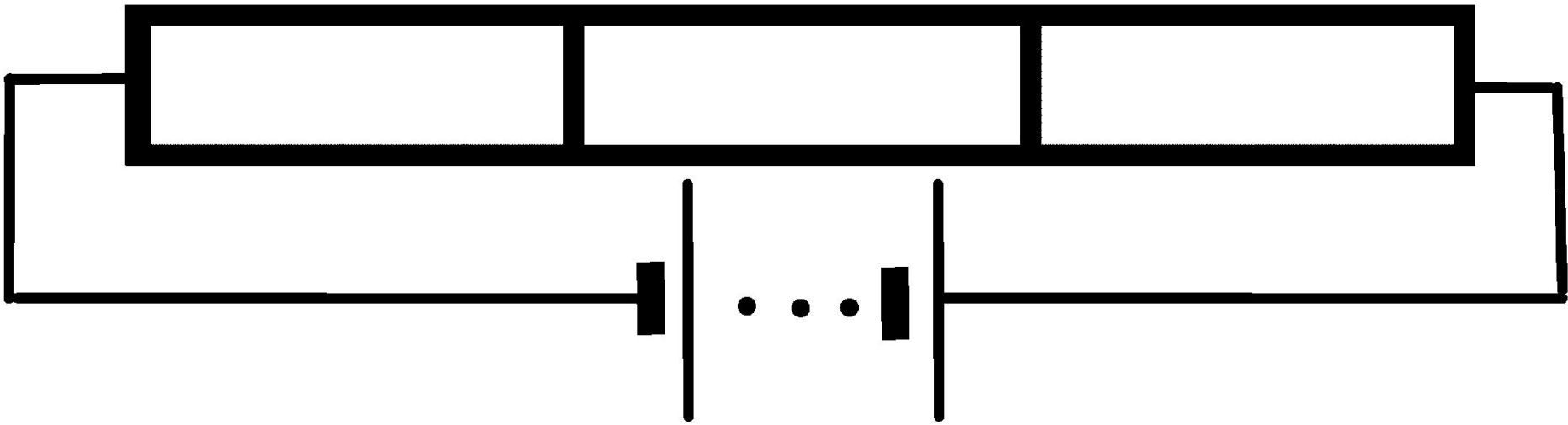




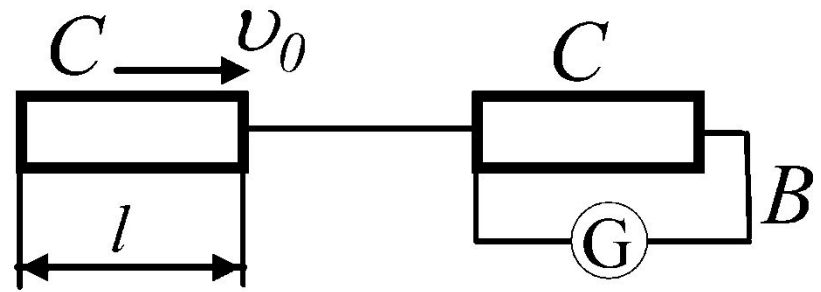
*Cu*

*Al*

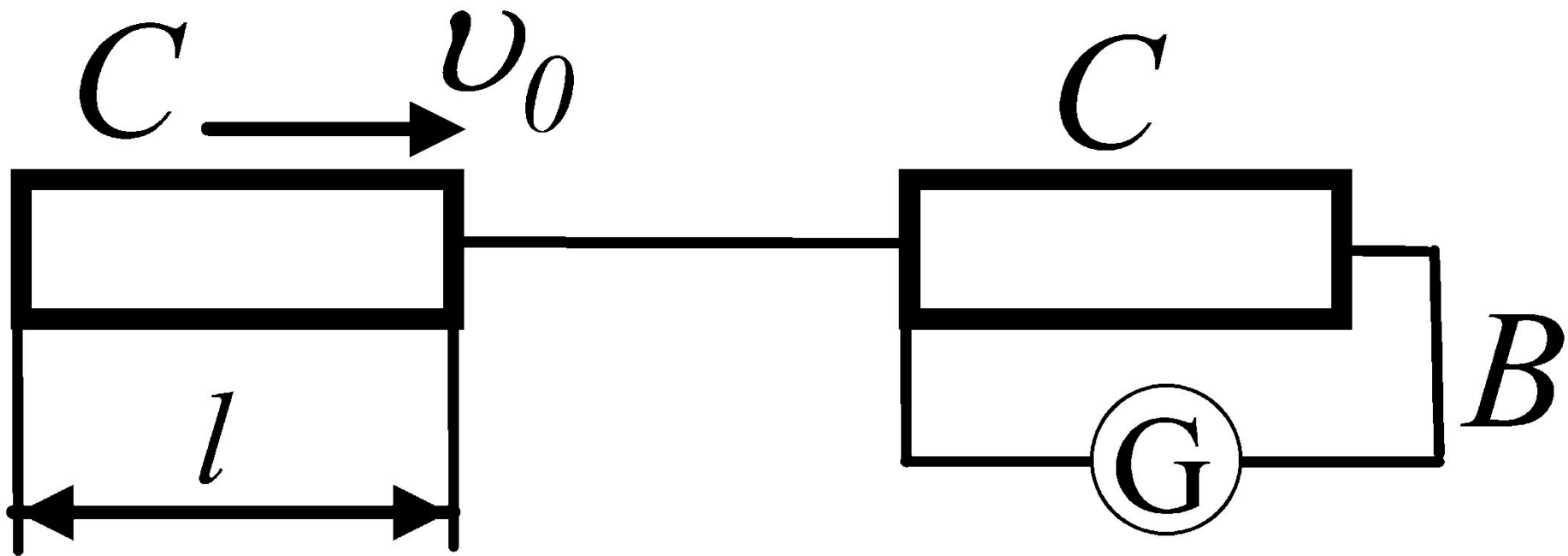
*Cu*



Для вивчення природи носіїв струму в металі Г. Лоренц запропонував такий дослід. Металевий стержень  $C$  рухався поступально з швидкістю  $v_0$  (рис.). Внаслідок взаємодії з кристалічною ґраткою носії струму в провіднику теж рухались з швидкістю  $v_0$ .



Стержень різко гальмувався і в момент гальмування замикався нерухомим металевим провідником  $B$  на гальванометр. Носії струму, які не зв'язані жорстко з кристалічною ґраткою, продовжували рухатись за інерцією доти, доки взаємодія з іонами ґратки не зупинить їх.



У замкненому колі проходив короткочасний струм, який можна виявити за допомогою гальванометра G. За напрямком струму визначають знак рухомих зарядів. Цей дослід дав змогу визначити питомий заряд  $\frac{q}{m}$ ; де  $q$  – заряд носія струму,  $m$  – його маса.

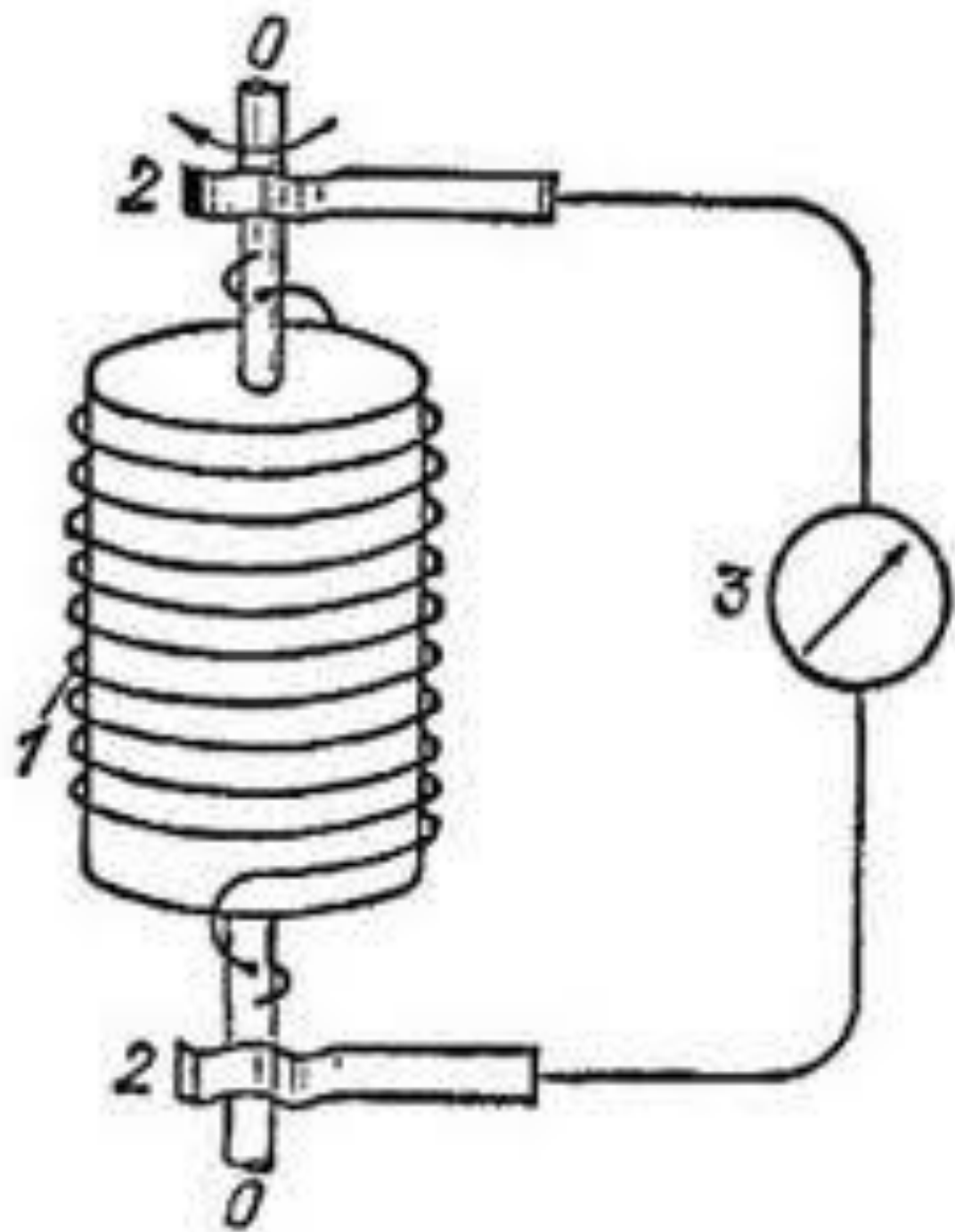
$$\frac{|q|}{m} = \frac{lv_0}{QR},$$

де  $Q$  – повний заряд, що пройшов через гальванометр при гальмуванні стрижня.

Л. Мандельштам і Н. Папалексі виконали такий дослід. Вони взяли котушку з намотаним на неї дротом, кінці якої були з'єднані з нерухомою телефонною трубкою. При швидких крутильних коливаннях котушки навколо її осі в колі виникав змінний струм, що викликав тріск в телефонній трубці. Цей дослід підтвердив наявність носіїв струму в дроті. Проте він не дав змоги визначити напрямок струму і знак заряду.

Т. Стюарт і Р. Толмен удосконалили цей дослід, замінивши телефон чутливим гальванометром. Дослід показав, що носії струму заряджені негативно. Відношення  $\frac{q}{m}$  виявилось близьким до питомого заряду електрона.

Отже, було експериментально доведено, що носіями струму в металах насправді є електрони.



## *Класичну електронну теорію провідності металів*

створив П. Друде, а розвинув у своїх працях Г. Лоренц, вона ґрунтується на таких **фундаментальних положеннях**:

- усі метали мають кристалічну будову. У вузлах кристалічної ґратки розміщаються іони металу;
- простір між вузлами кристалічної ґратки заповнений електронним газом, який утворюється валентними електронами, що порівняно слабо зв'язані з атомними ядрами і відриваються від атомів при утворенні кристалічної ґратки, вільні електрони рухаються хаотично між іонами металу;
- в середньому кожен атом металу втрачає один електрон і концентрація електронів провідності в металах дорівнює кількості атомів в одиниці об'єму металу.

# Провідник

Зв'язані електрони залишаються в атомі

Атом

Вільні електрони створюють струм





Концентрацію носіїв заряду в металах можна обчислити за формулою

$$n = \frac{N_A}{\mu} \rho ,$$

де  $\rho$  – густина металу,  $\mu$  – його молярна маса.

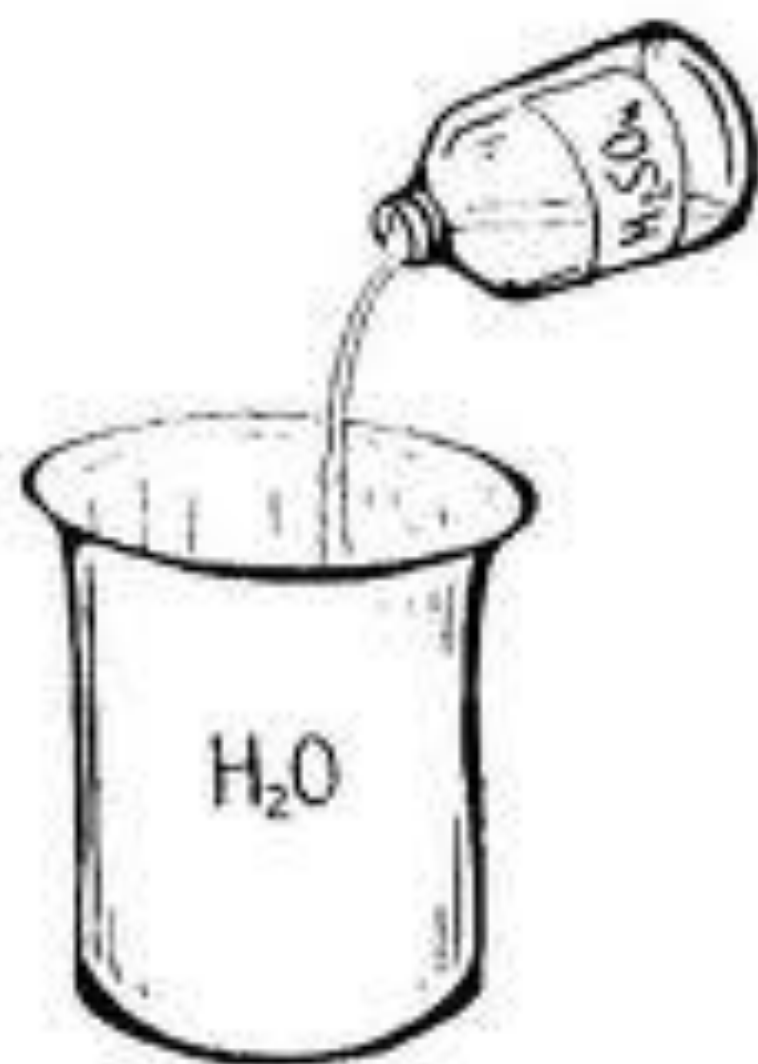
Середня швидкість теплового (хаотичного) руху електронів електронного газу складає порядку

$$v_{\text{хаот}} = 10^5 \div 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}} .$$

При дії зовнішнього електричного поля в металевому провіднику, окрім теплового руху електронів, виникає ще й направлений рух, який спричинює електричний струм. Середня швидкість направленого руху електронів  $u_{\text{напр}} \approx 10^{-4} \frac{M}{c}$ . Отже,  $u_{\text{напр}} \ll v_{\text{хаот}}$ , незначна величина  $u_{\text{напр}}$  пояснюється досить частими зіткненнями електронів з іонами кристалічної ґратки.

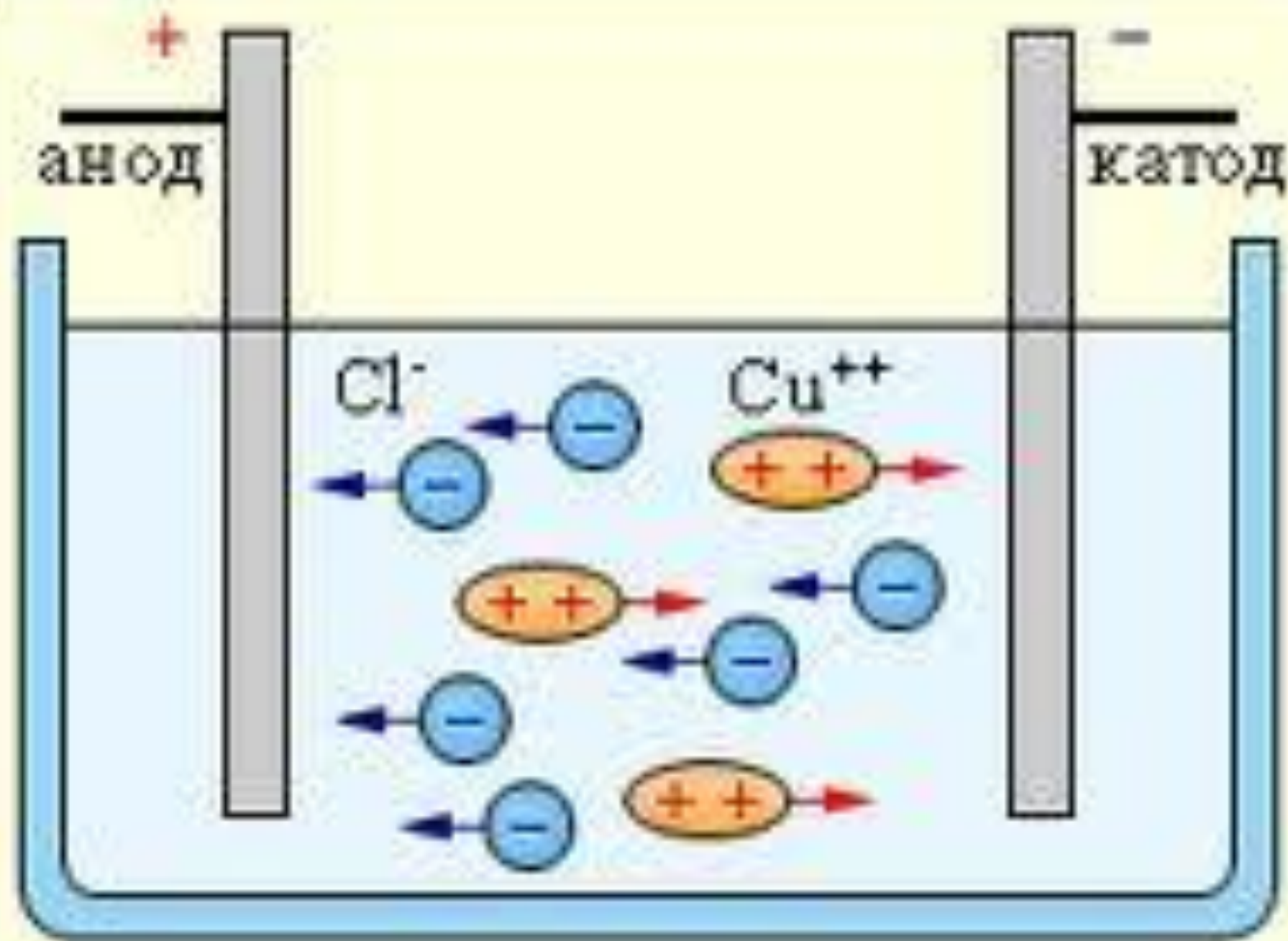
Швидкість поширення електромагнітного поля вздовж провідника дорівнює  $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ . Направлений рух електронів під дією зовнішнього електричного поля виникає на всій довжині дроту практично одночасно з подачею сигналу.

*Електроліти – речовини, в яких проходження електричного струму зумовлене переміщенням іонів і супроводжується електролізом, являються провідниками електричного струму другого роду. Електролітами можуть бути розчини (найкраще водні) неорганічних кислот, лугів, солей.*



*Електроліз – явище виділення речовини на електродах, при проходженні крізь електроліт постійного електричного струму.*

При електролізі позитивно заряджені іони (катіони) рухаються до катода. На катоді відбувається відновлення катіонів, пов'язане з приєднанням до них електронів. Негативно заряджені іони (аніони) рухаються до анода. На аноді відбувається реакція окислення аніонів, пов'язана з віддачею електронів аніонами.



*Закони Фарадея – закони електролізу, що встановлюють взаємозв'язок між кількістю електрики, яка проходить через електроліт, і кількістю речовини, яка виділяється на електродах.*

**Перший закон Фарадея:** маса речовини  $m$ , яка виділилась на електроді під час проходження електричного струму, прямо пропорційна значенню електричного заряду  $q$ , який пройшов через електроліт;

$$m = kq ,$$

де  $k$  – електрохімічний еквівалент речовини.



**Другий закон Фарадея:** електрохімічні еквіваленти елементів прямо пропорційні їх хімічним еквівалентам:

$$k = \frac{1}{F} \frac{A}{z},$$

де  $\frac{A}{z}$  – хімічний еквівалент,

$A$  – атомна маса речовини,

$z$  – заряд її іона (валентність речовини),

$F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$  – число Фарадея.



Електроліз широко застосовуються в різних галузях сучасної техніки, в аналітичній хімії, біохімії і т. д.

У *хімічній промисловості* електролізом одержують хлор і фтор, луги, хлорат і перхлорат, надсірчану кислоту і персульфати, хімічно чисті водень і кисень і т. д. При цьому одні речовини одержують шляхом відновлення на катоді, інші – електроокисненням на аноді.

Електроліз в *гідрометалургії* є однією з стадій переробки металовмісткої сировини, що забезпечує отримання товарних металів.

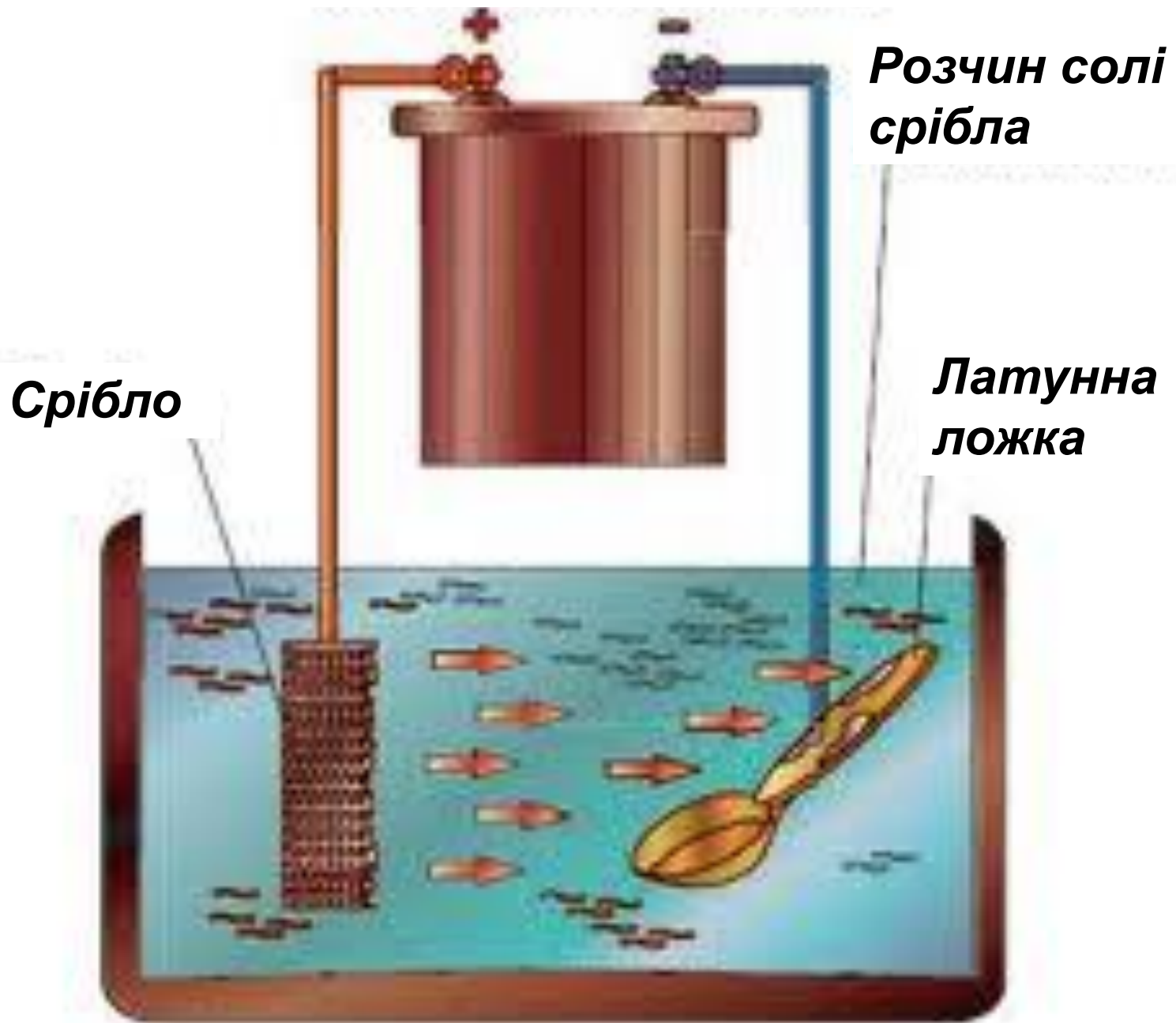
У кольоровій металургії електроліз використовують для добування металів з руд та їх очищення. Електролізом з розплавлених середовищ отримують алюміній, магній, титан, цирконій, уран, берилій та ін. Для рафінування (очищення) металу електролізом з нього відливають пластини і поміщають їх як аноди в електролізер. При пропущенні струму метал, що підлягає очищенню, піддається анодному розчиненню, тобто переходить у розчин у вигляді катіонів. Потім ці катіони металу розряджаються на катоді, завдяки чому утворюється компактний осад вже чистого металу. Домішки, що знаходяться в аноді, або залишаються нерозчинними, або переходять в електроліт і видаляються.

*Гальванотехніка* займається процесами нанесення металевих покриттів на поверхню як металевих, так і неметалевих виробів при проходженні постійного електричного струму через розчини їх солей.

У гальванотехніці використовують гальваностегію і гальванопластику.

Гальваностегія – це процес покриття металевих предметів шаром іншого металу за допомогою електролізу. Металевий предмет при цьому виступає у ролі катоду, розміщеного у розчину солі того металу, покриття з якого необхідно отримати. В якості анода використовують пластинка з металу-покриття. Способом гальваностегії можна покрити деталь тонким шаром золота або срібла, хрому або нікелю. За допомогою електролізу можна наносити найтонші металеві покриття на різні металеві поверхні. При такому способі нанесення покриттів, деталь використовують як катод, який міститься

# Джерело постійного струму



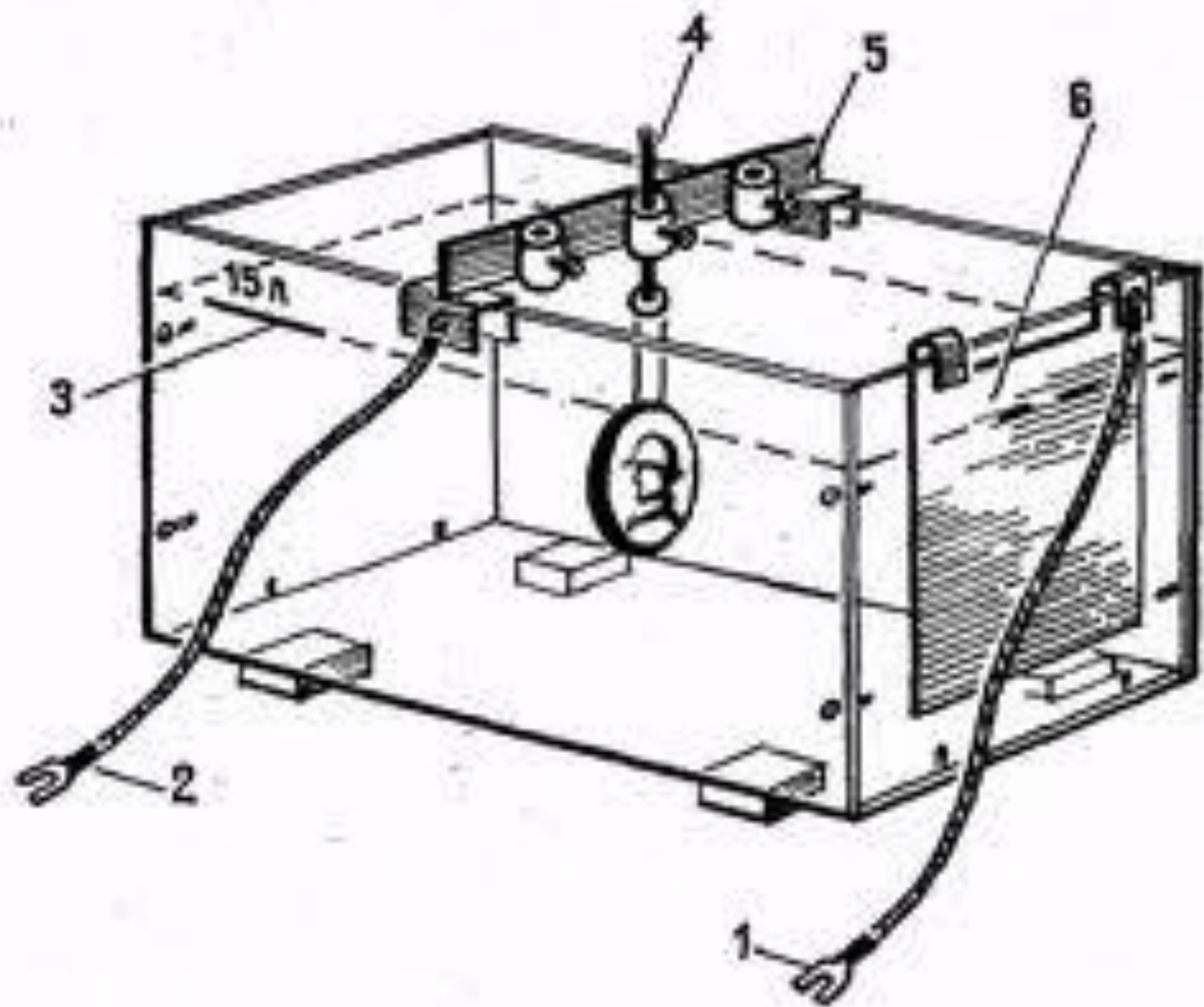








Гальванопластика – процес одержання шляхом електролізу точних, металевих копій з різних як неметалевих, так і металевих предметів, які називають матрицями. Гальванопластику використовують при виготовленні статуй, бюстів; для анодування – отримання оксидних захисних плівок на металах; для поліровки металів; при електрохімічному фарбуванні металів; в очищенні води – видаленні з неї розчинних домішок; для електрохімічної заточки ріжучих інструментів (хірургічних скальпелів, бритв і тощо).









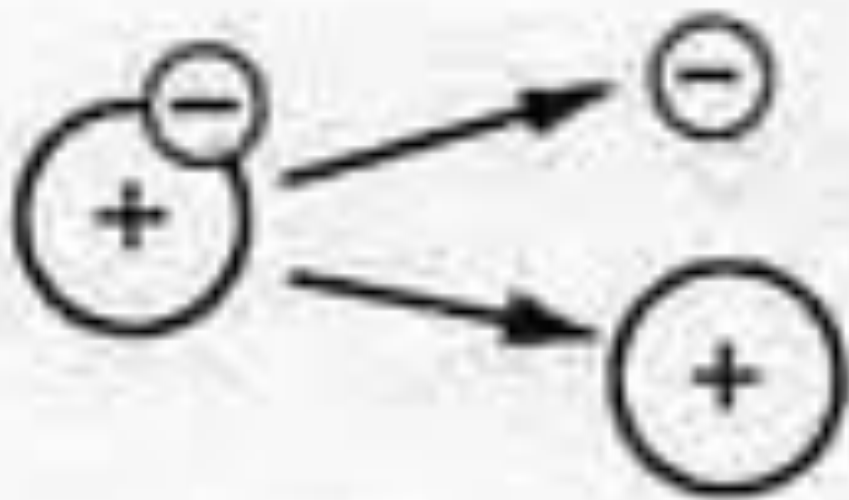
# 3. Самостійний газовий розряд, уявлення про плазму.

Гази складаються з електрично нейтральних атомів і молекул, тобто не мають вільних зарядів (електронів та іонів), здатних під дією електричного поля здійснювати направлений рух. Отже, при нормальних умовах гази є ізоляторами. Газ стає провідником, якщо частина його молекул іонізується.



*Іонізацією газу* називають явище відривання електронів від молекул газу, що приводить до утворення в газі вільних електронів та позитивних іонів, що й зумовлює його електропровідність.

Для іонізації атома або молекули треба виконати роботу проти сил взаємодії між електроном, що виривається, та іншими частинками атома – *роботу іонізації*  $A_i$ .



***іонізація***

Робота іонізації залежить від хімічної природи газу і енергетичного стану електрона в атомі або молекулі. Найслабше зв'язані з ядром зовнішні (валентні) електрони атома. Через те, щоб вирвати валентний електрон з атома, треба виконати меншу роботу, ніж для виривання будь-якого іншого електрона. Після того як з атома вирвали один електрон, зміцнюється зв'язок з ядром інших електронів

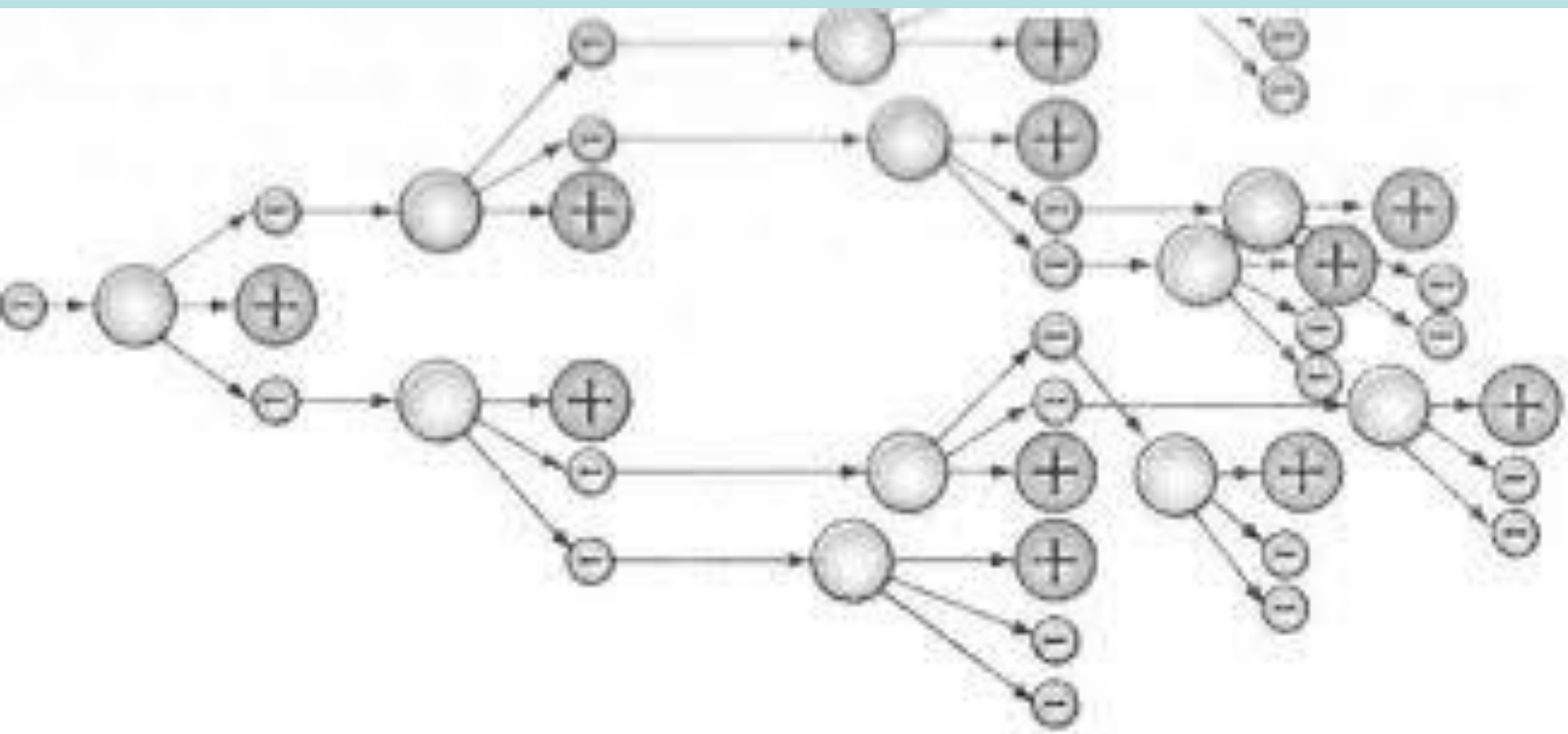
Процес проходження електричного струму  
через газ називають *газовим розрядом*.

***Несамостійним газовим розрядом*** називають

електричний струм в газах, зумовлений неперервною дією іонізатора. Несамостійний газовий розряд зникає відразу після припинення дії іонізатора.

***Самостійним газовим розрядом*** називають

електричний розряд в газах, що зберігається після припинення дії зовнішнього іонізатора.



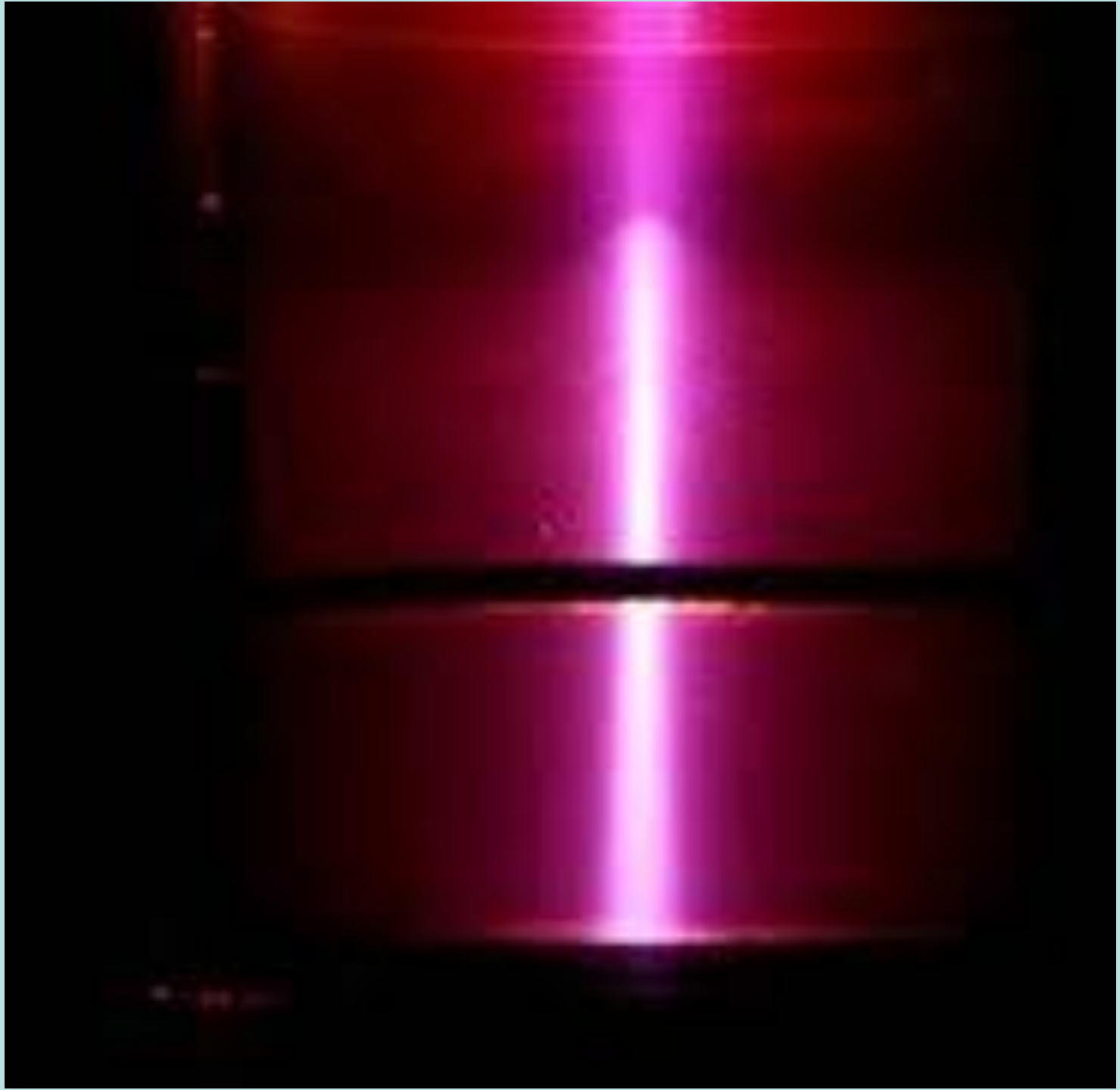
Розрізняють такі *види самостійного розряду*:

*1. Тліючий розряд.* Тліючий розряд спостерігається в газах при низьких тисках (порядку кількох десятків міліметрів ртутного стовпа).

Тліючий розряд використовують в лампах денного світла, стабілізаторах напруги, рекламних газорозрядних трубках, плазмових телевізорах тощо.









Основними частинами тліючого розряду (рис.) є:

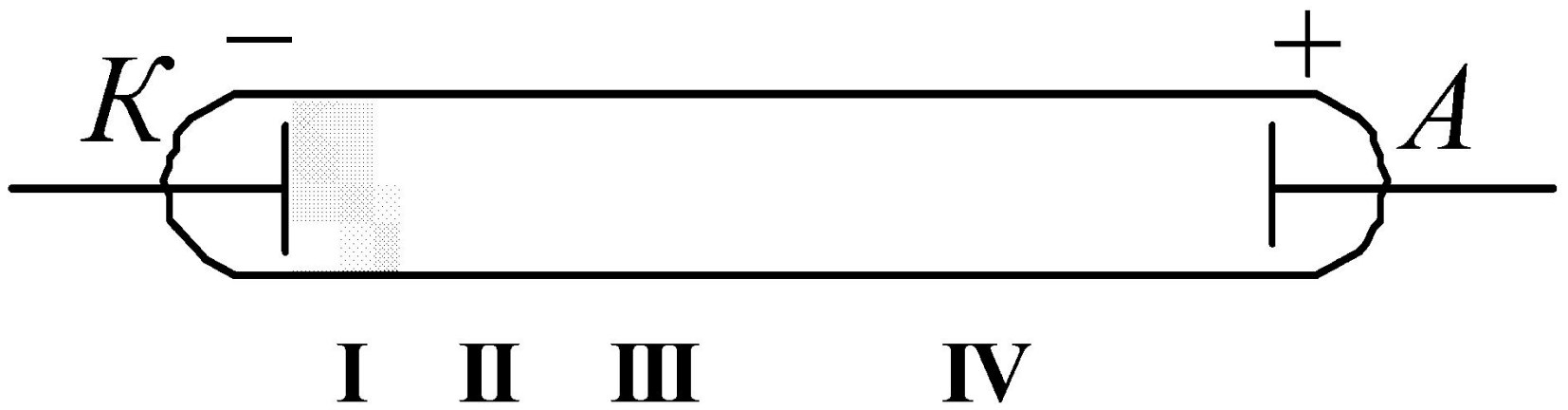
I – катодний темний простір (відбувається сильне прискорення позитивних іонів, які вибивають електрони з катода, і електронів, які вилетіли з катода);



II – різко відділене від катодного простору тліюче свічення, яке поступово переходить в область III (електрони спричиняють інтенсивну ударну іонізацію молекул газу і втрачають свою енергію. Тут утворюються позитивні іони, необхідні для того, щоб підтримувати розряд. Тліюче свічення в цій області є результатом рекомбінації електронів та іонів);

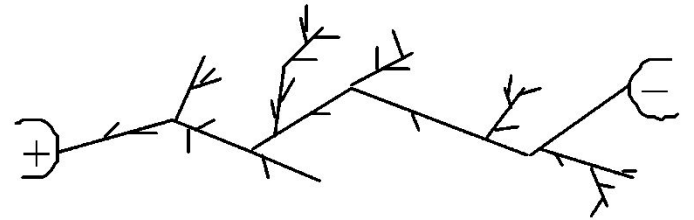
III – область фарадеєвого темного простору (область, куди не долітають швидкі електрони);

IV – додатний позитивний стовп – стовп газу, який світиться і який визначає оптичні властивості газу (світиться за рахунок переходу молекул із збудженого стану в основний і за рахунок рекомбінації).



2. *Іскровий розряд*. Іскровий розряд – це пробій газового діелектрика, який виникає при нормальному тиску при напруженості електричного поля не меншою за пробивне значення (для повітря  $3 \cdot 10^6 \frac{В}{м}$ ).

Іскровий розряд має вигляд пучка яскравих зигзагоподібних розгалужених тонких ниток (рис.), які пронизують розрядний проміжок, швидко гаснуть і замінюються новими. У природних умовах іскровий розряд спостерігається у вигляді блискавки.



Це явище використовують в електроіскровому методі різання, свердління та інших видах точної обробки металу. Іскровий проміжок застосовують як запобіжник від перенапруг в електричних лініях передач.





*3. Коронний розряд.* Коронний розряд виникає при нормальному тиску в газі, що знаходиться в дуже неоднорідному електричному полі, наприклад, поблизу ліній провідів високої напруги. При коронному розряді іонізація і світіння газу відбуваються лише поблизу електрода з малим радіусом кривини. Свічення має вигляд корони, що оточує електрод.

У лініях високовольтних передач коронний розгляд спричиняє шкідливі витоки струму і втрати електричної енергії. Щоб зменшити коронування, проводи високовольтних ліній беруть досить великого діаметра, а їхні поверхні виготовляють гладкими.

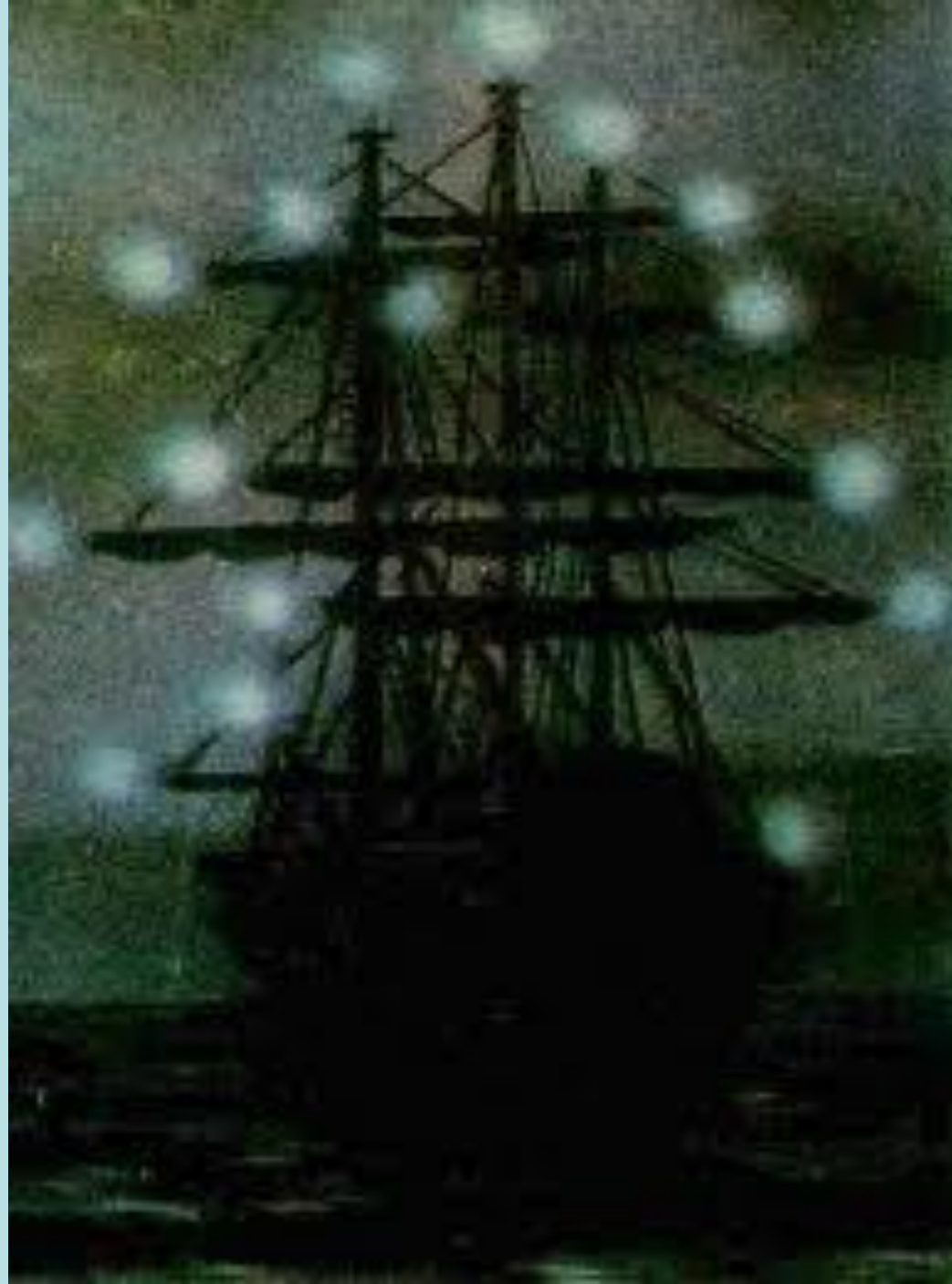












*4. Дуговий розряд.* Дуговий розряд можна отримати з іскрового заряду шляхом поступового зменшення відстані між електродами, переривистий розряд стає неперервним утворюючи яскраву електричну дугу. Електрична дуга відбувається при великій густині струму і порівняно невеликій напрузі між електродами (порядку кількох десятків вольт), при високій температурі у міжелектродному проміжку (5000-7000°C).

Дуговий розряд використовують як джерело світла, для зварювання і різання металів, в дугових печах для виплавки сталі, чавуну, отримання карбіду кальцію, оксиду азоту.



(a)



(b)



(c)









## 4. \* Контактні електричні явища та термоелектронна емісія.

Електрони провідності в металі весь час перебувають в хаотичному тепловому русі. Та обставина, що вільні електрони утримуються всередині металу, вказує на те, що в поверхневому шарі металу виникає затримуюче електричне поле, яке перешкоджає електронам виходити з металу. Щоб покинути метал, електрон має виконати деяку роботу – *роботою виходу*.

*Роботою виходу називають величина  $A_{вих}$ , що дорівнює тій найменшій додатковій енергії, яку потрібно передати електрону провідності в металі для його виходу у вакуум:*

$$A_{вих} = e\Delta\varphi .$$

Робота виходу залежить від хімічної природи металу і стану його поверхні. Забруднення, залишки вологи тощо змінюють величину роботи.

*Емісія* – це вихід електронів з металу під дією зовнішніх факторів.

*Явище термоелектронної емісії* полягає в тому, що нагріті метали випускають електрони.

Електрон провідності може вилетіти з будь-якого металу тоді, коли його кінетична енергія перевищує роботу виходу електрона з металу.

# **Лекція № 10. Закон Джоуля-Ленца. Електричний струм у металах, рідинах і газах.**

- 1. Робота та потужність постійного електричного струму.**
- 2. Електропровідність металів та розчинів електrolітів. Застосування електролізу.**
- 3. Самостійний газовий розряд, уявлення про плазму.**
- 4. \*Контактні електричні явища та термоелектронна емісія.**