ТЕМА 12. СТРУМ В ГАЗАХ

§1. Самостійний та несамостійний газові розряди

Гази складаються з електрично нейтральних атомів і молекул і не мають вільних зарядів (електронів та іонів), які здатні під дією електричного поля рухатись впорядковано. Отже, при нормальних умовах гази є ізоляторами. Це підтверджують досліди із зарядженими ізольованими провідниками в сухому повітрі: їх заряд майже не змінюється протягом тривалого часу. Газ стає провідником, якщо частина його молекул іонізується.

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

Атоми і молекули газу – це стійкі системи заряджених частинок. Тому для іонізації атома або молекули треба виконати роботу проти сил взаємодії між електроном, що вивається, та іншими частинками атома. Цю роботу називають **роботою іонізації** A_i. Величина роботи іонізації залежить від хімічної природи газу і енергетичного стану електрона в атомі або молекулі, з яких він вивається. 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.

Роботу іонізації можна охарактеризувати за допомогою потенціалу іонізації.

Потенціалом іонізації φ_i називають ту різницю потенціалів, яку повинен пройти електрон у прискорювальномуелектричному полі, щоб збільшення його енергії дорівнювало роботі іонізації:

$$\varphi_i = \frac{A_i}{e}.$$

Іонізація газу може відбуватись під впливом різних зовнішніх факторів:

1) сильного нагрівання газу,
2) рентгенівського проміння,
3) радіоактивного випромінювання (α, β, γ - частинки),
4) ультрафіолетового випромінювання.

Іонізація газу під впливом рухомих електронів або іонів називається **ударною іонізацією**. Якщо кінетична енергія частинки мала, то її зіткнення з атомами газу нагадує пружний удар, і це приводить лише до нагрівання газу.

Якщо енергія частинки досить велика, то зіткнення з атомами стають

непружними і викликають іонізацію атома (вибивання електрона). Частинка ніби проникає в атом і вибиває з нього електрон.

Визначимо, яку мінімальну кінетичну енергію повинна мати іонізуюча частинка, щоб відбулася ударна іонізація газу.

Швидкість теплового руху молекул набагато менша за швидкість частинок, що іонізують газ. Тому можна вважати, що до удару атом не рухався. У випадку непружного зіткнення закон збереження імпульсу має вигляд:

$$m\upsilon = (m+M)u,$$

де *m* і *M* - маси іонізуючої частинки і атома, υ - швидкість частинки, а *u* - швидкість частинки і атома після удару. Швидкість електрона, який вибитий з атома, наближено вважаємо також *u*.

Початкова кінетична енергія частинки витрачається при ударі на роботу іонізації A_i і на те, щоб частинці і атому надати кінетичну енергію, яка відповідає їхній швидкості *u* після удару:

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = A_i + \frac{(m+M)u^2}{2}.$$

Із закону збереження імпульсу

$$u = \frac{m\upsilon}{m+M}.$$

Тоді

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = A_i + \frac{m+M}{2}\frac{m^2\upsilon^2}{(m+M)^2} =$$

$$= A_i + \frac{m\upsilon^2}{2}\frac{m}{m+M};\ \frac{m\upsilon^2}{2}\left(1-\frac{m}{m+M}\right) = A_i.$$

Звідси

$$\frac{m\upsilon^2}{2} = A_i\frac{m+M}{M} = A_i\left(1+\frac{m}{M}\right).$$

Частина вільних електронів в іонізованому газі захоплюється нейтральними молекулами, які при цьому перетворюються на негативно заряджені іони. Отже, електропровідність іонізованого газу є мішаною: носіями електричного заряду в газах можуть бути вільні електрони та позитивні і негативні іони.

Переважно, при іонізації газів кількість додатних іонів дорівнює сумі електронів і негативних іонів

$$n_+ = n_e + n_-.$$

Тому загалом навіть іонізований газ залишається електрично нейтральним.

Ступінь іонізації визначається співвідношенням

$$\alpha = \frac{n_+}{n_0}.$$

де n_0 - концентрація нейтральних молекул

Ступінь іонізації газів залежить від температури, тиску (через концентрацію незаряджених частинок) та енергії іонізації і описується рівнянням Саха:

$$\alpha = \frac{n_+}{n_0} \approx \frac{T^{3/4}}{n_0^2} e^{-\frac{A_i}{kT}}.$$

Носії заряду в іонізованому газі, як і нейтральні молекули, перебувають у неперервному хаотичному русі. При цьому відбуваються зіткнення між собою частинок, заряди яких мають протилежні знаки, та їх поєднання з утворенням нейтральних молекул газу. Цей процес називається **рекомбінацією іонів.**

Якщо іонізатор діє в газі тривалий час, то **між процесами іонізації та рекомбінації іонів встановлюється динамічна рівновага.** Це означає, що кількість пар носіїв заряду, створюваних іонізатором в одиниці об'єму газу протягом однієї секунди, дорівнює кількості нейтральних молекул, які утворюються в цьому об'ємі за той самий час внаслідок рекомбінації іонів.

Рекомбінація іонів супроводжується виділенням енергії у вигляді квантів випромінювання відповідної довжини хвилі. Це випромінювання частково розсіюється та витрачається на збудження молекул газу. Отже, рекомбінаційні процеси, що відбуваються в іонізованому газі, супроводжуються світінням газу.

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

Несамостійним газовим розрядом називається електричний струм, що зумовлений електропровідністю газу, якої він набуває в наслідок неперервної дії іонізатора.

Несамостійний газовий розряд зникає відразу після припинення дії іонізатора, якщо швидкість електронів недостатня для іонізації газу.

Щоб дослідити залежність сили струму *I* при газовому розряді від напруги *U* між електродами, використаємо установку, схема якої наведена на рис. 49. Напругу, яка прикладена до електродів *A* і *K*, можна регулювати за допомогою потенціометра.

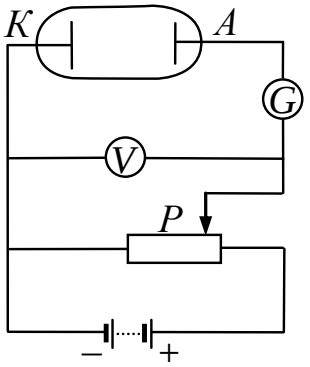

Рис. 49

Значення напруги *U* і сили струму *I* вимірюють за допомогою вольтметра *V* і чутливого гальванометра *G*. Газ в трубці іонізують за допомогою іонізатора, наприклад, рентгенівським промінням. Інтенсивність іонізатора залишається незмінною. Вольт-амперна характеристика газового розряду показана на рис. 50.

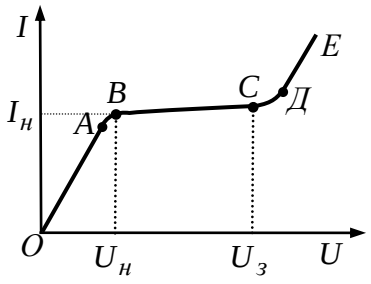

Рис. 50

На ділянці *OA* сила струму зростає пропорційно до напруги і, відповідно виконується закон Ома:

$$\vec{j} = en_0\left(u_{+q} + u_{-q}\right)\vec{E},$$

де n_0 - кількість пар іонів в одиниці об'єму; u_{+q}, u_{-q} - рухливість позитивних і негативних іонів газу.

У несамостійному розряді поповнення іонів цілком залежить від потужності зовнішнього джерела іонізації, тому лише при невеликих напругах можна вважати, що кількість пар іонів в одиниці об'єму $n_0 = const$. При збільшенні напруги концентрація іонів зменшується і тому лінійна залежність сили струму від напруги порушується (ділянка *AB*). Із збільшенням наруги *U* сила струму зростає все повільніше.

Починаючи з деякого значення напруги $U_н$, сила струму залишається незмінною, незважаючи на подальше зростання напруги (*BC*). Це зв'язано з тим, що при напругах, більших за $U_н$, швидкість іонів досягає великих значень, і всі іони, що виникли в газі, на шляху до електродів не встигають рекомбінувати в нейтральні

молекули. Максимальна сила струму $U_н$ при даній інтенсивності іонізатора називається **струмом насичення**, причому $I_н = eN_0$, N_0 - кількість пар одновалентних іонів, що утворюються в об'ємі газу під дією іонізатора за одну секунду.

Для будь-якої точки кривої *OC* при вимкненні іонізатора струм негайно припиняється.

Підвищуючи напругу *U* між електродами газорозрядної трубки, можна здійснити перехід від несамостійного газового розряду в самостійний. Цей перехід називають електричним пробоєм газу, а відповідну напругу $U = U_з$ - напругою запалювання, або напругою пробою. При напругах більших, за $U_з$, струм значно зростає (ділянки *CD* і *DE*).

Самостійним газовим розрядом називається електричний розряд в газах, що зберігається з припиненням дії зовнішнього іонізатора.

Щоб утворився самостійний газовий розряд, треба, щоб внаслідок самого розряду в газі безперервно утворювались вільні електричні заряди. Основним джерелом для їх виникнення є **ударна іонізація молекул газу.** При досить великому значенні напруги електрони, які виникають під дією зовнішнього іонізатора, настільки сильно прискорюються електричним полем, що, стикаючись з молекулами газу, іонізують, їх. При цьому утворюються вторинні електрони та іони, які також прискорюються електричним полем і вже самі іонізують нові молекули газу. У процесі іонізації беруть участь як електрони, так і додатні іони. Процес наростає лавиноподібно і він є причиною збільшення електричного струму (область *CD*).

Щоб розряд був самостійним, утворення тільки електронних та іонних лавин є необхідною, але недостатньою умовою. Необхідно також, щоб при вимкненому зовнішньому іонізаторі в газі відтворювались нові електрони замість тих, які перейшли на анод. Ці електрони вибиваються з поверхні катода позитивними іонами, які рухаються до катода під дією електричного поля. Явище вибивання електрона з поверхні катода називається **вторинною електронною емісією**. Крім того, іони й електрони, енергія яких недостатня для ударної іонізації, можуть при зіткненнях з молекулами приводити їх у збуджений стан. Збуджені молекули переходять потім у нормальний стан, випромінюючи фотон. Молекула газу, поглинаючи фотон, іонізується. Така **іонізація** називається **фотонною**. Безпосередню фотоіонізацію здатне викликати ультрафіолетове випромінювання. Енергія фотона видимого світла недостатня для відщеплення електрона від молекули. Але видиме випромінювання може обумовити так звану **ступеневу фотоіонізацію**. Цей процес відбувається в

два етапи. На першому етапі фотон переводить молекулу у збуджений стан, на другому – відбувається іонізація молекули за рахунок її співудару з іншою молекулою. Фотон, потрапляючи на катод, може вибивати з нього електрон (зовнішній фотоефект), який потім викличе ударну іонізацію нейтральної молекули. При великих напругах між електродами і позитивні іони набувають енергії, яка достатня для іонізації молекул газу, і до катода будуть рухатись іонні лавини. Коли виникають, крім електронних лавин, ще й іонні, сила струму збільшується уже практично без зростання напруги *U* (ділянка *ДЕ*).

Напруга запалювання $U_з$ залежить від хімічної природи газу, матеріалу катода, тиску газу і віддалі між електродами трубки.

§2. Види самостійного розряду

1. Тліючий розряд

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

Основними частинами тліючого розряду є (рис. 51)

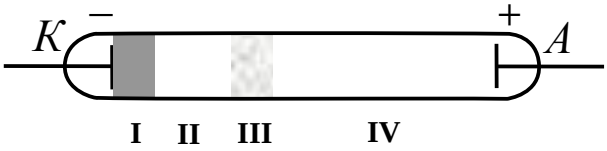

Рис. 51

I – катодний темний простір;

II – різко відділене від катодного простору тліюче свічення, яке поступово переходить в область III;

III – область фарадеєвого темного простору;

IV – додатний позитивний стовп – стовп газу, який світиться і який визначає оптичні властивості газу.

Області I-II-III утворюють катодну частину розряду.

В області I відбувається сильне прискорення позитивних іонів, які вибивають електрони з катода, і електронів, які вилетіли з катода.

В області II електрони спричинюють 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.

Область III – це область, куди не долітають швидкі електрони.

Область IV – стовп іонізованого газу, який світиться за рахунок переходу молекул із збудженого стану в основний і за рахунок рекомбінації.

Позитивний стовп не відіграє істотної ролі в підтриманні тліючого розряду, тому при зменшенні відстані між електродами трубки довжина позитивного стовпа скорочується і він може зникнути зовсім.

Довжина катодного темного простору I при зближенні електродів не змінюється. Якщо електроди наблизити так, що відстань між ними стане меншою, ніж довжина катодного темного простору, то тліючий розряд у газі зникне. Досліди показують, що довжина катодного темного простору обернено пропорційна до тиску газу. При досить низьких тисках електрони, вибиті з катода позитивними іонами, проходять газ майже без зіткнень з його молекулами.

Тліючий розряд використовують в лампах денного світла, стабілізаторах напруги, катодному розпиленні матеріалів, рекламних газорозрядних трубках.

2. Іскровий розряд

Якщо в газі при нормальному тиску утворити електричне поле з напруженістю, не меншою за пробивне значення (для повітря $3 \cdot 10^6 \frac{В}{м}$), то між електродами виникає самостійний електричний розряд, який називається іскровим.

У природних умовах іскровий розряд спостерігається у вигляді блискавки (рис. 52).

Рис. 52

Іскровий розряд має вигляд пучка яскравих зигзагоподібних розгалужених тонких ниток, які пронизують розрядний проміжок, швидко гаснуть і замінюються новими. Ці нитки називаються іскровими каналами. Вони починаються як від позитивного, так і від негативного електродів, а також від довільної точки між ними.

Внаслідок проходження імпульсу через канал іскри в каналі виділяється велика кількість енергії. Виділення енергії супроводжується стрибкоподібним збільшенням тиску в оточуючому газі і утворенням циліндричної ударної хвилі, температура на фронті якої $\approx 10^4$ *K*. Виникненням ударних хвиль пояснюються звукові ефекти, що супроводжують іскровий розряд: потріскування при слабких розрядах і грім у разі блискавки.

Зупинимось на механізмі іскрового розряду. Нехай напруженість поля є такою, що електрон, який вилетів за рахунок якого-небудь процесу із катода, отримує на шляху вільного пробігу енергію, яка достатня для іонізації. Тому відбувається розмноження електронів – виникає лавина. Якщо поблизу катода зародилась електронна лавина, то на її шляху відбувається іонізація і збудження молекул і атомів газу, які світяться і називаються **стримерами**. Розвиваючись, окремі електронні лавини доганяють одна одну і, зливаючись разом, утворюють хороший провідний місток із стримерів. По цьому містку в наступний момент часу поширюється потужний потік електронів, що утворює канал іскрового розряду. В стримерах електричний струм поширюється з швидкістю електромагнітних хвиль.

При малій довжині розрядного проміжку іскровий розряд викликає специфічне руйнування анода. 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 (наприклад, у телефонних лініях).

3. Коронний розряд

Коронний розряд виникає при нормальному тиску в газі, що знаходиться в

дуже неоднорідному електричному полі, наприклад, поблизу ліній проводів високої напруги (рис. 53). При коронному розряді іонізація і світіння газу відбуваються лише поблизу електрода з малим радіусом кривини. Свічення має вигляд корони, що оточує електрод.

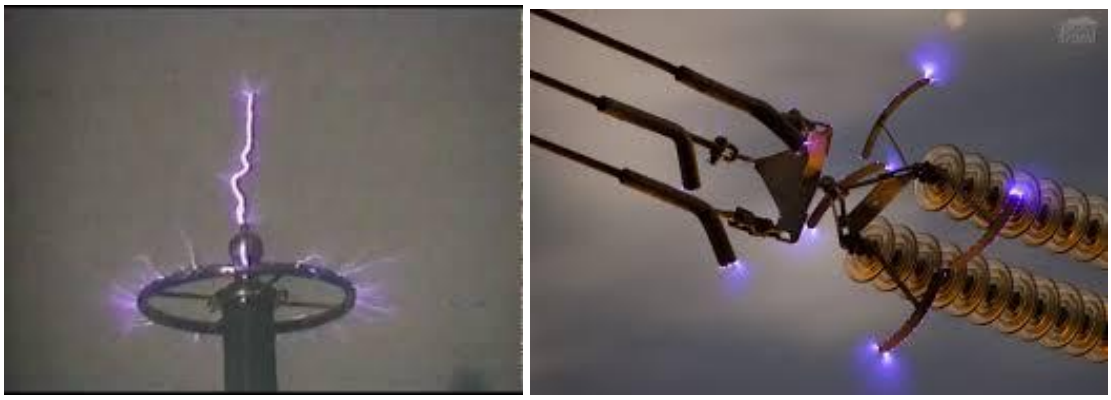

Рис. 53

Якщо корона виникає навколо негативного електрода, то вона називається негативною. В протилежному випадку корона називається позитивною.

У випадку негативної корони позитивні іони, що прискорені неоднорідним полем, вибивають із катода електрони, які викликають іонізацію і збудження молекул в коронуючому шарі. В зовнішній області корони поле недостатнє для того, щоб надати електронам енергію, яка необхідна для іонізації або збудження молекул. Електрони, що потрапили в цю область, дрейфують під дією поля до анода. Частина електронів захоплюється молекулами, внаслідок чого утворюються негативні іони. Струм у зовнішній області зумовлюється лише негативними носіями-електронами і негативними іонами. У цій області розряд має несамостійний характер.

У позитивній короні електронні лавини зароджуються біля зовнішньої границі корони. Електрони виникають внаслідок фотоіонізації, яка викликана випромінюванням коронуючого шару. Ці електрони рухаються до анода, який коронує. Носіями струму у зовнішній області корони є позитивні іони, які дрейфують під дією поля до катода.

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 від джерела низької напруги. Для цього електроди наближають до дотику. В місці дотику вони дуже розжарюються електричним струмом за рахунок великого опору, після чого їх розводять, отримуючи яскраву

електричну дугу.

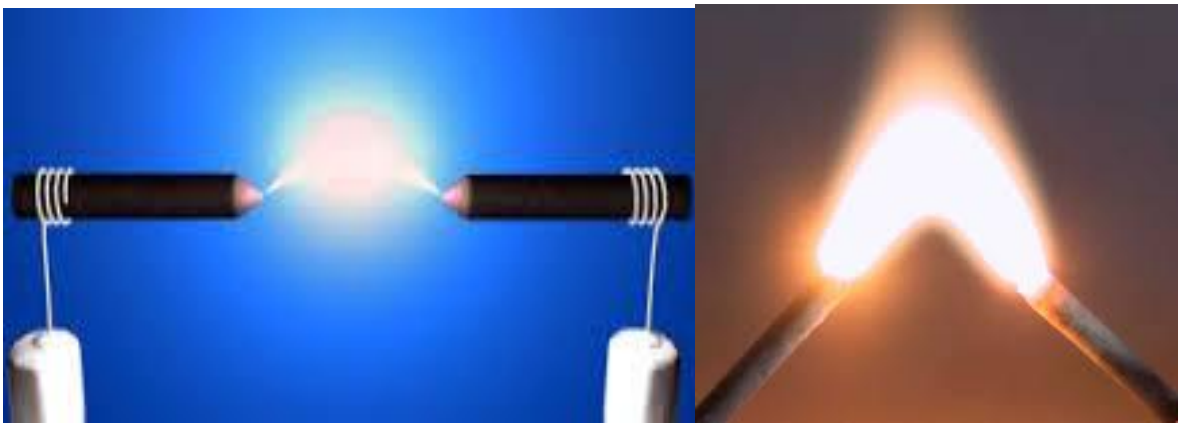

Рис. 54

Електрична дуга є однією з форм газового розряду, який відбувається при великій густині струму і порівняно невеликій напрузі між електродами (порядку кількох десятків вольт). Встановлено, що основною причиною дугового розряду є інтенсивне випромінювання термоелектронів розжареним катодом і термічна іонізація молекул, яка обумовлена високою температурою у міжелектродному проміжку. Завдяки цьому електричний опір газового проміжку між електродами дуги порівняно малий. При атмосферному тиску температура катода досягає *3000°C.* Електрони, бомбардуючи анод, утворюють у ньому кратер і нагрівають його. Температура кратера при великих тисках повітря досягає *6000-7000°C.* Температура газу в каналі електричної дуги становить *5000-7000°C.*

Сила струму в дузі може досягати значень порядку $10^3 \div 10^4$ *A* при напрузі в декілька десятків вольт.

При зростанні розрядного струму опір дуги зменшується внаслідок збільшення термоелектронної емісії з катода й іонізації газу в розрядному проміжку. При цьому опір зменшується більше, ніж зростає струм. Внаслідок цього із збільшенням струму *I* напруга на розрядному проміжку не зростає, а зменшується. Тому вольт-амперну характеристику дугового розряду (рис. 55) називають падаючою.

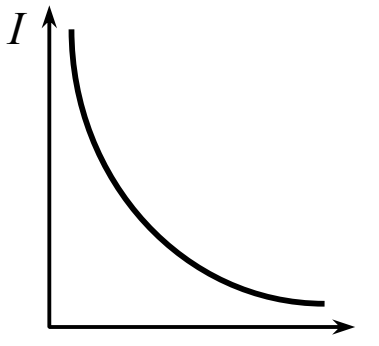

Рис. 55

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

§3. Плазма

Плазмою називається квазінейтральний іонізований газ, тобто частково або повністю іонізований газ, в якому об'ємна густина позитивних ρ_+ і негативних ρ_- зарядів практично однакова за абсолютною величиною (рис. 56):

$$\rho_+ = |\rho_-| \quad \text{або} \quad \rho_+ + \rho_- = 0 .$$

Внаслідок теплового руху іонів і електронів миттєві значення ρ_+ і ρ_- здійснюють неперервні коливання. Тому іонізований газ можна вважати плазмою, якщо його об'єм V у багато разів більший від об'ємів D^3 областей газу, в яких можливі помітні випадкові відхилення від нуля суми позитивних і негативних зарядів, що зумовлені тепловим рухом іонів і електронів: $V >> D^3$, де D – характерний розмір, який називається **дебаївським радіусом екранування.**

Дебаївський радіус екранування залежить від температури T плазми, зарядів і концентрації електронів та іонів. Найпростіша ізотермічна плазма складається із електронів і однозарядних іонів. Оскільки плазма квазінейтральна, то концентрації електронів та іонів однакові і дорівнюють n_0. Для такої плазми дебаївський радіус екранування

$$D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 kT}{2n_0 e^2}} .$$

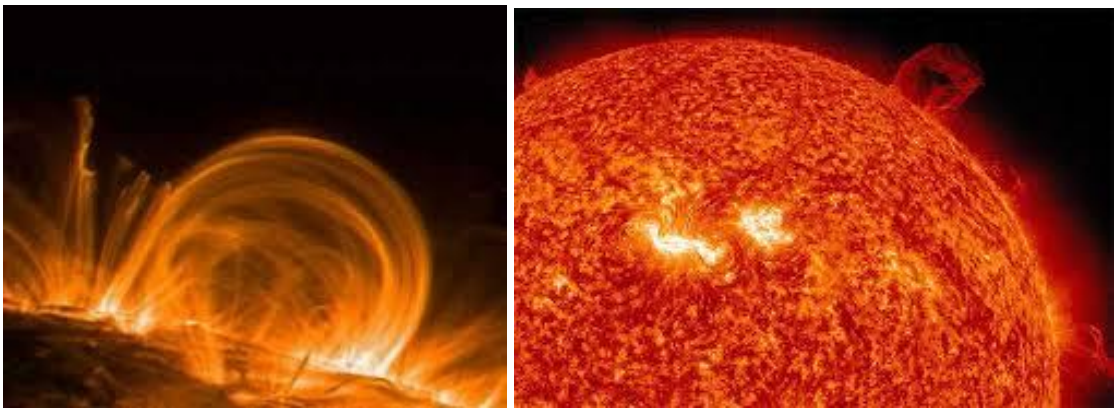

Рис. 56

У плазмі довільна частинка *Q* (додатний іон або електрон) оточена переважно частинками, заряди яких протилежні за знаком заряду частинки *Q*. Ці заряди зменшують (екранують) поле частинки *Q* в плазмі. Потенціал *φ* поля точкового заряду *q* в плазмі визначається співвідношенням

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r} e^{-\frac{r}{D}},$$

де *r* – відстань від заряду *q*. Якщо заряджена частинка *A* плазми знаходилась би у вакуумі, то потенціал φ_0 її електричного поля дорівнював

$$\varphi_0 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r}.$$

Отже, потенціал *φ* поля зменшується із віддаллю *r* значно швидше, ніж φ_0 у вакуумі. Наближено можна вважати, що на відстанях $r > D$ електричне поле в плазмі повністю екранується.

Плазма називається ідеальною або газовою, якщо потенціальна енергія кулонівської взаємодії двох частинок плазми, що знаходяться на середній відстані $< r >= n_0^{-\frac{1}{3}}$, мала порівняно з їх кінетичною енергією теплового руху:

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 < r >} = \frac{e^2 n_0^{\frac{1}{3}}}{4\pi\varepsilon_0} << kT.$$

Ця умова виконується, якщо в плазмі число N_D частинок одного знака (N_D – дебаївське число), що знаходиться всередині сфери радіуса *D*, досить велике:

$$N_D = \frac{4}{3}\pi D^3 n_0 >> 1.$$

Термодинамічні властивості ідеальної плазми описуються рівнянням, що описує ідеальний газ:

$$p = n_0 kT.$$

Ступенем іонізації плазми *α називається відношення кількості іонізованих атомів до їх загальної кількості в плазмі.*

Залежно від ступеня іонізації розрізняють слабоіонізовану плазму, помірно іонізовану плазму і повністю іонізовану плазму.

Іонізація газу і утворення плазми може викликатись такими процесами, як термічна іонізація при зіткненні атомів у досить сильно нагрітому газі; ударна

іонізація зарядженими частинками; фотоіонізація.

Якщо середні енергії теплового руху різних видів частинок (електронів, іонів і атомів) неоднакові, то така термодинамічна неврівноважена плазма називається **неізотермічною плазмою**.

Таку плазму не можна охарактеризувати за допомогою одного певного значення температури. У такому разі електронний газ характеризується температурою T_e, а іони – температурою T_i. Ці температури можуть істотно відрізнятись. Залежно від значення іонної температури розрізняють низькотемпературну плазму $\left(T_i < 10^5 K\right)$ і високотемпературну плазму $\left(T_i > 10^7 K\right)$.

Для неізотермічної плазми з однозарядними іонами концентрації електронів та іонів однакові, а дебаївський радіус екранування

$$D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k T_i}{n_0 e^2 \left(1 + \frac{T_i}{T_e}\right)}}.$$

Плазма характеризується такими основними властивостями:

- високим ступенем іонізації газу;
- однаковими об’ємними густинами позитивних і негативних зарядів;
- незалежністю питомої електричної провідності повністю іонізованої плазми від густини плазми і збільшенням з ростом температури пропорційно $T^{3/2}$;
- сильною взаємодією із зовнішніми електричним і магнітним полями;
- завдяки колективним взаємодіям плазма веде себе як пружне середовище, в якому збуджуються і поширюються різні коливання і хвилі.

У стані плазми знаходиться більшість речовин Всесвіту – зірки, зоряні атмосфери, галактичні туманності і міжзоряне середовище. В навколоземному просторі слабоіонізована плазма знаходиться в радіаційних поясах та іоносфері Землі. З процесами, що відбуваються в цій плазмі, пов’язані такі явища, як магнітні бурі, порушення далекого радіозв’язку і полярні сяйва.