

## A plazma fogalma, keletkezése és tulajdonságai

Görögök: négy "elem" -- föld, víz, levegő, tűz (ezekből épül fel minden). Az első háromnak megfelelnek a mai szokásos halmazállapotok (szilárd, folyadék, gáz), a negyedik, a tűz csak későn jelenik meg, mint "halmazállapot".

Első utalások egy sajátos "anyagállapotra" a gázkisülések tanulmányozásánál jelennek meg: alacsony nyomású gázon áramot átfolyatva kialakul egy tartomány, ahol a gáz teljesen ionizált állapotba kerül. Ezt a gáztartományt nevezték plazmának.

Kutatása az atom- és hidrogénbomba kapcsán vált fontossá (mindkét esetben plazma keletkezik), majd a fúziós energiatermelés (plazmában próbálják megvalósítani) és az asztrofizika problémái (világűr anyagának zöme plazma) miatt került előtérbe. Az utóbbi időben a plazma kutatása a technológiai felhasználások, valamint az elektromos energia-termelésben és hajtóművekben történő lehetséges hasznosítása miatt is fontossá vált.

### Plazma keletkezése

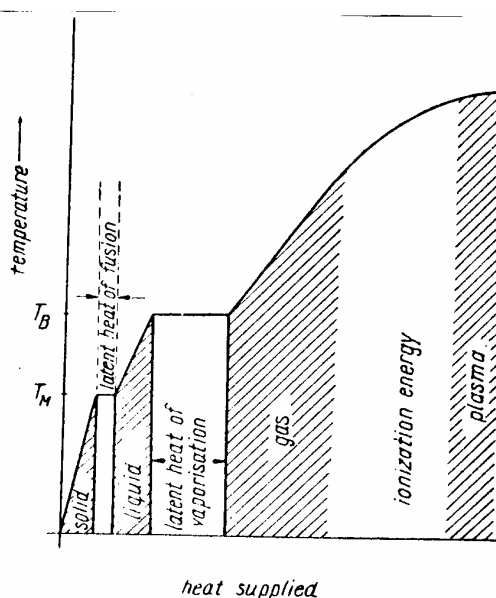
Az anyag halmazállapotai: alacsony hőmérsékleten szilárd állapot, a hőmérséklet emelésével előbb folyékony, majd gázállapot jön létre. Gázállapotban nem túl magas hőmérsékleten a molekulák semlegesek.

A hőmérséklet további emelése új állapotot eredményez, amit plazma állapotnak (gyakran "negyedik halmazállapotnak") neveznek.

A gáz hőmérsékletét emelve nő a molekulák átlagos mozgási energiája, és az ütközések során semleges atomok vagy molekulák elveszíthetnek egy vagy több elektront. Ez az ún. *ütközési ionizáció*, aminek révén a gázban töltött részecskék (elektronok és ionok) jönnek létre. Magas hőmérsékleten a gáz teljesen ionizálódhat: az ilyen ionizált gázt nevezik plazmának.

A plazma állapot előidézhető úgy is, hogy nem túl magas hőmérsékletű, külső behatások miatt kissé ionizált gázban a töltött részecskéket elektromos térrel felgyorsítjuk, és így lavinaszerű ütközési ionizáció következhet be.

Plazma igen sok helyen előfordul. A Földön részleges plazma található pl. egy lángban, plazma jön létre a villámlásnál, az északi fényben, előfordul az ionoszférában. A világűr anyagának (csillagközi tér, csillagok) több, mint 99%-a plazma.



## Atomi folyamatok plazmában

Az *ionizáció* mellett az ionok és elektronok újraegyesülése is lejátszódik, ez a *rekombináció*. Adott hőmérsékleten az *ionizáció fokát* ez a két ellentétes folyamat szabja meg.

A plazmában ezeken kívül számos atomi folyamat játszódik le:

Az ütközések során

- atomok, molekulák és ionok gerjesztett állapotba kerülhetnek, és elektromágneses hullámokat sugároznak ki (pl. jelentős fénykibocsátás),
- molekulák disszociálnak atomokká vagy atomok molekulává egyesülnek,
- mivel a plazma többnyire meleg, a gáz hőmérsékleti sugárzást bocsát ki,
- a gerjesztések során illetve töltött részecskék lefékeződésekor röntgensugárzás is létrejöhet (alacsony hőmérsékletű plazmában általában nem jelentős)

A részecskéknek a fallal (vagy elektródokkal) való kölcsönhatásánál

- termikus elektron-emisszió jöhet létre, ami többlet-elektronokat termel,
- nagy elektromos tereknél téremisszióval is kiléphetnek elektronok a szilárd falból,
- a részecskék a falból ütközéssel szekunder elektronokat kelthetnek,
- nagyenergiájú fotonok fotoeffektussal üthetnek ki elektronokat,

## A plazma tulajdonságai

Speciális összetétele miatt a plazma tulajdonságai eltérnek a közönséges gázokétól.

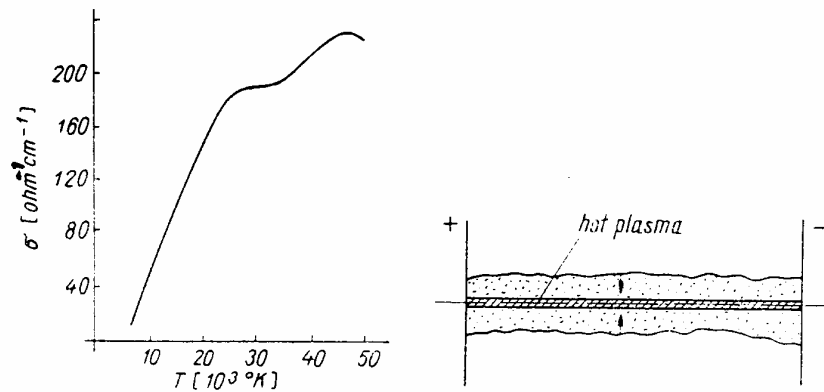
A plazma vizsgálata elsősorban *kísérleti úton* történik, tulajdonságainak *elméleti értelmezése* nehezebb, mint egy közönséges gázé. Ennek oka elsősorban az, hogy az: elektromos kölcsönhatás hosszú hatótávolságú, ezért a plazmában erősen *kölcsönható részecskék* vannak. Az ideális gázra vonatkozó megfontolások emiatt csak ritkán alkalmazhatók.

### *Elektromos sajátságok*

A plazmában átlagosan a töltések egyenletesen összekeverve oszlanak el: a plazma nagyobb térfogatban semleges (*kvázineutrális*). Ha az egyenletes eloszlást megzavarjuk, akkor a rendszerben olyan folyamatok indulnak el, amelyek azt a megzavart állapotából az egyenletesen összekevert, kvázineutrális állapotba térítik vissza, így *plazmarezgések* jönnek létre, amelyeknek frekvenciája (az ún. *plazmafrekvencia*) a töltések koncentrációjától és tömegétől függ. A rezgések a plazmában terjedni is tudnak, így jön létre a *plazmahullám*.

A plazmában könnyen elmozdítható töltéshordozók vannak, ezért a plazma *jó vezető*. A plazma vezetőképességének nagyságrendje: 30000 K-nél kb.  $10^2 \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  (a fémeké  $10^5 \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ , a szigetelőké  $10^{-12} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  nagyságrendű).

A vezetőképesség nő a hőmérséklettel (az alábbi ábra vízgőzre vonatkozik), ez okozza, hogy a gázban folyó áram egy vékony fonallá zsugorodik össze (termikus Pinch-effektus). A jelenség azzal magyarázható, hogy a (pl. elektródok között létrejött) plazmaáramban az árammal átjárt tartomány széléről a hő könnyebben eltávozik, mint a közepéről, ezért középen a plazma melegebb lesz. Emiatt a vezetőképesség középen megnő, nagyobb lesz az áramsűrűség, és nő a felszabaduló Joule-hő, így az áram fokozatosan a középső régióba koncentrálódik. Végül egy egyensúlyi állapot áll be, amikor a hőmérséklet-eloszlás - és így a vezetőképesség-eloszlás - állandósul.



A plazma a rajta áthaladó elektromágneses hullámokkal kölcsönhatásba lép, ami erősen függ a hullám frekvenciájától (hullámhosszától): a plazmafrequenciánál sokkal nagyobb frekvenciájú elektromágneses hullámokra a plazma átlátszó, az ennél alacsonyabb frekvenciákat pedig visszaveri (az ionoszféra pl. a 30 m-nél hosszabb hullámhosszú hullámokat visszaveri).

Mágneses térbe helyezett plazmában a mozgó részecskék eltérülnek eredeti irányuktól. Ha a plazmában áram folyik, és mágneses térbe helyezük, akkor benne sajátos áramlások jönnek létre (magnetohidrodinamika).

#### **Termikus tulajdonságok**

Alacsony nyomáson az elektronok szabad úthossza nagy, ezért elektromos térben ezek sebessége sokkal nagyobb lehet, mint az ionoké. Ha egy ilyen plazma nincs egyensúlyban (pl. hőmérséklet-gradiens van benne), akkor az *elektronhőmérséklet* sokkal magasabb lehet, mint az *ionhőmérséklet*. A gyakorlatban használt plazmák hőmérséklete 10 - 50 ezer K között van. Az ilyen plazmát *alacsony hőmérsékletűnek* nevezik.

A plazma tulajdonságait egyensúlyi állapotban elméleti módszerekkel is lehet vizsgálni (pl. alkalmazható a tömeghatás törvénye), és meghatározható az ionizációs fok is, ami adott gáznál a hőmérséklet- és nyomás függvényeként kifejezhető.

### **Elektromos áram gázokban, a plazma alkalmazásai**

A technológiai alkalmazások során rendszerint közönséges gázokat használnak, amelyekből az alkalmazás során keletkezik plazma, legtöbbször úgy, hogy áramot vezetnek át a gázon. Ezért fontos ismerni, az elektromos vezetés mechanizmusát gázokban.

#### **Vezetés gázokban**

A gázatomok alapállapotban semlegesek. Ahhoz, hogy vezessenek, töltéshordozókat kell kelteni bennük, és a gáz így vezetővé válik.

Két alapvető mechanizmus van: ha az ionizációt külső behatás (sugárzás, hevítés) okozza, akkor ún. *nem önálló vezetésről*, ha az ionizációt maguknak a gázcsoportoknak az ütközései okozzák, akkor *önálló vezetésről* beszélünk.

Alacsony hőmérsékleten és kis elektromos térben többnyire nem önálló vezetés jön létre. Az áramot a töltéshordozók mozgékonyasága (ami fordítva arányos a nyomással)

és egyensúlyi koncentrációja szabja meg. A koncentráció az ionizáció és a rekombináció ellentétes hatásának eredményeként alakul ki.

Ha az elektromos teret (feszültséget) növeljük, a felgyorsított töltéshordozók ütközés révén tovább ionizálnak: lavinaszerű töltéshordozó-keltés indul meg. Ez az *ütközési ionizáció* "megtermeli" a töltéshordozókat, a gázban önálló vezetés jön létre. Az egyensúlyi töltéshordozó-mennyiséget az ionizáció és rekombináció egyensúlya alakítja ki.

A vezetés bonyolult, mert a hőmérséklet, a külső térerősség és a gáz nyomása egymással kölcsönhatásban állva határozzák meg az áramot.

#### *A plazma alkalmazásai*

*Plazmasugár:* fűvókába gázt (N, Ar, H) vezetnek (ahol az felgyorsul), és kisülést keltenek benne (pl. az egyik elektród a fűvókában van, a másik a melegítendő testen).

A kisülés miatt felmelegedett gázsugárban  $10^3 - 10^4 \text{ W/mm}^2$  teljesítmény van, hőmérséklete  $10^4 \text{ K}$  nagyságrendű, a gáz sebessége  $100-1000 \text{ m/s}$ , az áramerősség  $100 \text{ A}$  is lehet. Ez a gázsugár minden anyagot megolvaszt- elpárologtat.

Használható vágásra, felületi réteg felvitelére (plazmaszórás), magas hőmérsékleten alkalmazandó tárgyak vizsgálatára.

*MHD-generátor:* a mozgási indukcióval elektromos energia termelhető.

*Plazmahajtómű:* két elektród között plazmaimpulzussal áramot hoznak létre, és az elektródokkal párhuzamos, az áramra merőleges mágneses teret alkalmaznak. Ekkor a plazma-pulzust mozgató erő lép fel, aminek az ellenereje adja a hajtóerőt.

*Fúziós energiatermelés:* a magfúziót magas hőmérsékletű ( $20 \text{ millió K}$ ) plazmában hozzák létre. Probléma a plazma együtt tartása. A megoldást instabilitások nehezítik.