

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 gázkiszűlések tanulmányozásánál jelennek meg: alacsony nyomású gázon áramot átfolytatva 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

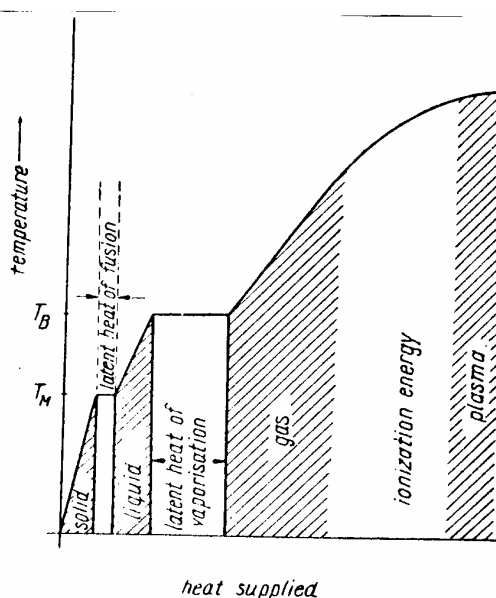
Az anyag halmazállapotai: alacsony hőmérsékleten szilárd állapot, a hőmérséklet emelésével előbb folyékony, majd gázállapot jön létre. Gázállapotban nem túl magas hőmérsékleten a molekulák semlegesek.

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.

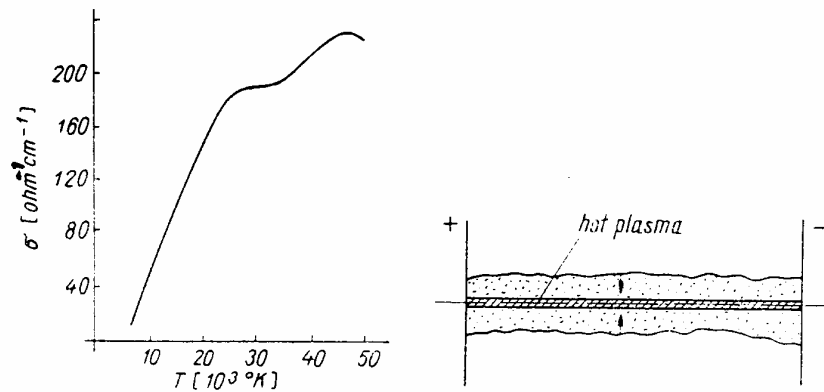
A plazma vizsgálata elsősorban *kísérleti úton* történik, tulajdonságainak *elméleti értelmezése* nehezebb, mint egy közönséges gázé. Ennek oka elsősorban az, hogy az: elektromos kölcsönhatás hosszú hatótávolságú, ezért a plazmában erősen *kölcsönható részecskék* vannak. Az ideális gázra vonatkozó megfontolások 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 gázcsozmányoknak 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 K nagyságrendű, a gáz sebessége $100-1000 \text{ m/s}$, az áramerősség 100 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 millió K) plazmában hozzák létre. Probléma a plazma együtt tartása. A megoldást instabilitások nehezítik.