

1. félévi doktori beszámoló

Vass Máté

Fizikai Doktori Iskola/Statisztikus Fizika, Biológiai Fizika es Statisztikus Rendszerek Fizikája

Temavezető: Donkó Zoltán

A dolgozat címe: Elektronfűtés vizsgálata rádiófrekvenciás kapacitív plazmákban a Boltzmann-egyenlet momentumai alapján

E-mail: vass.mate@wigner.mta.hu

1. Bevezetés

Rádiófrekvenciás kapacitív csatolású plazmaforrásokat (CCP-eket) széleskörűen alkalmaznak társadalmi szempontból elengedhetetlen ipari alkalmazásokhoz (felületmódosítási eljárások, mint pl. maratás, rétegtépzés, stb.). Az alapvető fizikai mechanizmusok legtöbbször nem ismertek ezekben a rendszerekben, így a plazmaforrások optimalizálása általában empirikusan, a 'trial-and-error' módszer alapján történik, nem pedig a rendszert leíró fizika jobb megértése alapján.

Az egyik legfontosabb fizikai mechanizmus, melynek megértése nagymértékben hozzájárulna a plazmaforrások optimalizálásához, a plazmában lévő részecskék energiafelvételi mechanizmusa, azaz a folyamat, amely során a plazmában található töltött részecskék energiát vesznek fel, vagy adnak le a külső elektromos tér, illetve ütközések hatására. Mivel a legmobilisabb töltött részecskék az elektronok, ezért az elektronok energiafelvételi mechanizmusainak megértése a legfontosabb a CCP-k fizikájának megértése szempontjából. Ugyan több elméleti és szimulációs modell is létezik, nincs (ön)konzisztens leírása ezen folyamatoknak [1].

2. Az aktuális félévben elvégzett kutatások

Munkám során egy, a Boltzmann-egyenleten alapuló önkonzisztens szimulációs analízist alkalmazok különböző körülmények esetén. A kiindulópont az impulzusmérleg-egyenlet (vagyis az 1D Boltzmann-egyenlet első sebesség szerinti momentumegyenlete):

$$\frac{\partial}{\partial t}(mnu) + \frac{\partial}{\partial x}(mnu^2) = -enE - \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} - \Pi_c. \quad (1)$$

Itt n és u az elektronok sűrűségét és átlagsebességét jelölik, m az elektrontömeg, e azok töltése. $p_{xx} = mn(\langle v_x^2 \rangle - u^2)$ jelöli a nyomástenzor első diagonális elemét, ahol v_x egy elektron x -irányú (az elektródákra merőleges) sebessége. Π_c jelöli az elektronok impulzusának ütközések okozta változását. Ezen egyenletet rendezve az elektromos térre, azt három, fizikailag különböző tagra lehet bontani a következőképpen:

$$\begin{aligned} E_{\text{in}}(x, t) &= -\frac{m}{n(x, t)e} \left[\frac{\partial}{\partial t}(n(x, t)u(x, t)) + \frac{\partial}{\partial x}(n(x, t)u(x, t)^2) \right], \\ E_{\text{vp}}(x, t) &= -\frac{1}{n(x, t)e} \frac{\partial}{\partial x} p_{xx}(x, t), \\ E_{\text{Ohm}}(x, t) &= -\frac{\Pi_c(x, t)}{n(x, t)e}. \end{aligned} \quad (2)$$

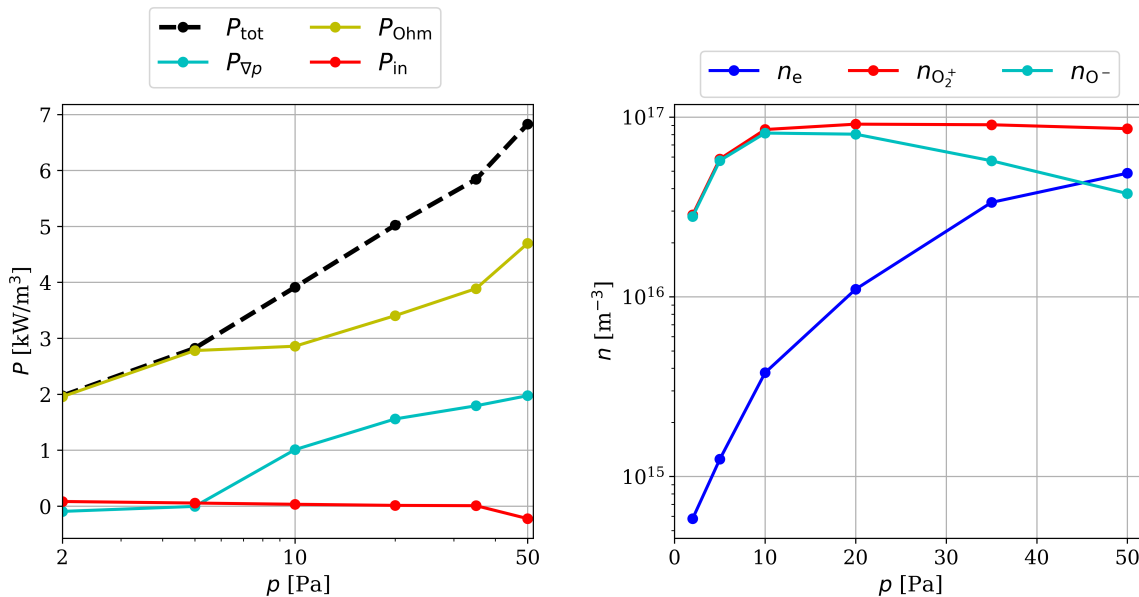
A nyomásgradiensből származó elektromos tértag, $E_{\nabla p}$, két további tagra bontható, feltételezve a $p(x,t) = n(x,t)T(x,t)$ relációt (amely azonban nem tekintendő közelítésnek, csupán ekvivalens matematikai átalakításnak):

$$E_{\nabla n}(x,t) = -\frac{T_{xx}(x,t)}{n(x,t)e} \frac{\partial n(x,t)}{\partial x},$$

$$E_{\nabla T}(x,t) = -\frac{1}{e} \frac{\partial T_{xx}(x,t)}{\partial x}. \quad (3)$$

$E_{\nabla n}(x,t)$ az ún. ambipoláris elektromos tér, $E_{\nabla T}(x,t)$ pedig a (longitudinális) kinetikus elektronhőmérséklet gradiensevel arányos tag. A megfelelő teljesítménysűrűségeket megkaphatjuk az elektromos áramsűrűséggel ($j_e(x,t)$) való szorzás után. A fenti módszert Particle In Cell / Monte Carlo Collisions szimulációba építve, amely egy önkonzisztens, részecskealapú szimulációs módszer, az elektronok energiafelvételi mechanizmusának teljes, önkonzisztens leírását kapjuk.

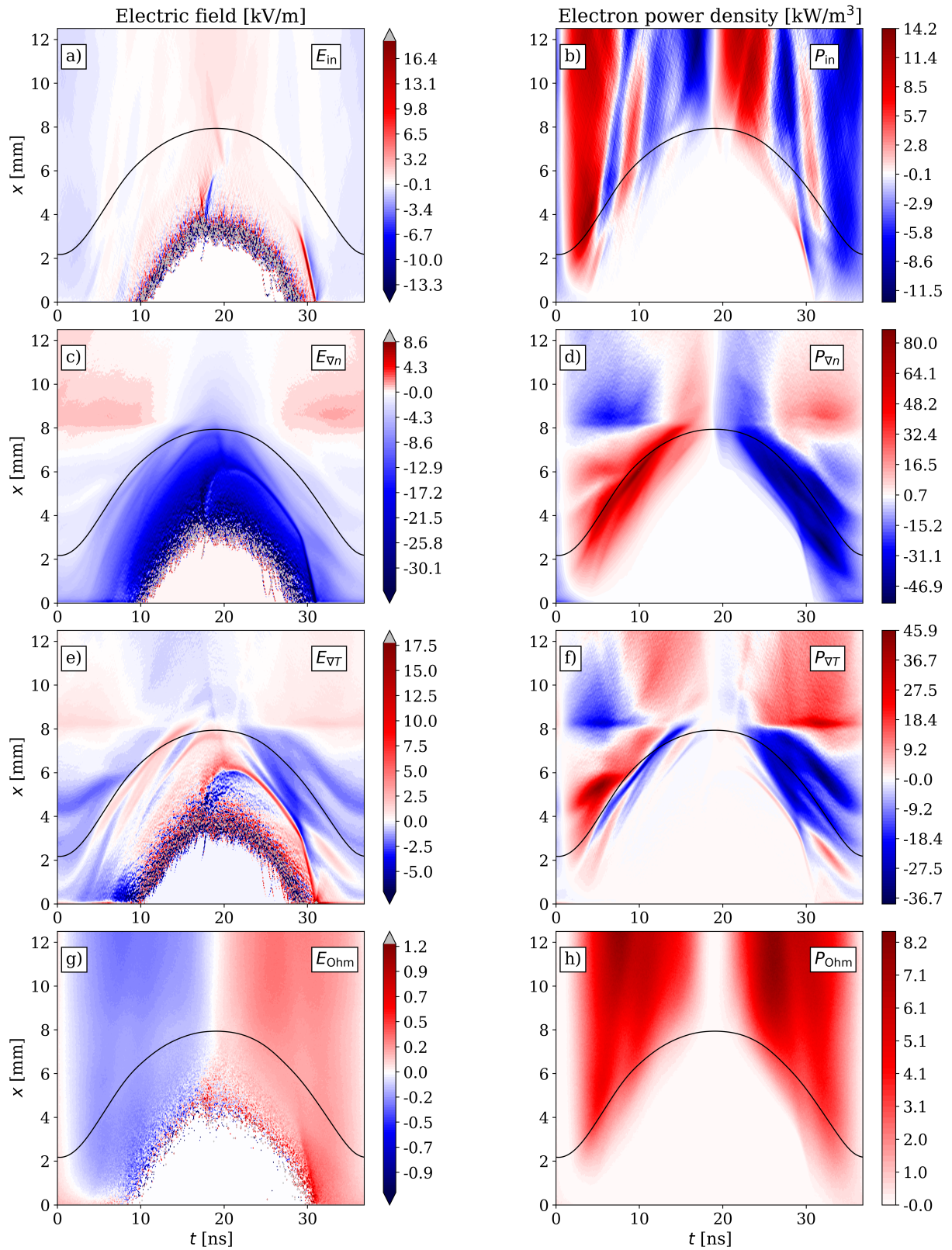
Ebben a félévben oxigén gázkisüléseket vizsgáltam egyfrekvenciás gerjesztés mellett (tehát a két plánparalel elektróda közül az egyik földelt, a másik pedig $\phi(t) = \phi_0 \cos(2\pi ft)$ alakú gerjesztés alatt áll, ahol az általam vizsgált esetben az amplitúdó $\phi_0 = 200$ V, a frekvencia $f = 27.12$ MHz, az elektródatávolság pedig $L = 25$ mm volt.



1. ábra. A különböző elektromos tértagoknak megfelelő teljesítmény tér- és időbeli átlagának nyomásfüggése (a) és a tér- és időbeli részecskesűrűségek (b). $L = 25$ mm, $\phi_0 = 200$ V, $f = 27.12$ MHz.

Az elektron-energiafelvételt vizsgálva a nyomás függésében azt találtam, hogy alacsony nyomás esetén (lásd 1. ábra (a)) a domináns mechanizmus az ún. Ohmikus tag, amely az elektronok ütközéseiből fakad. Ez egy meglehetősen kontraintuitív jelenség, hiszen az alacsony nyomás lecsökkenti az elektronok ütközési valószínűségét, így az ‘általános vélekedés’ szerint alacsony nyomáson nem az Ohmikus tag, hanem a nyomásgradienssel arányos tag a domináns. Esetünkben az utóbbi drasztikusan lecsökken, melynek legfőbb oka az oxigén elektronegativitása (tehát a negatív ionok jelenléte az elektronok és pozitív ionok mellett), amely a nyomást csökkentve nő (1. ábra (b)).

A 2. ábra a legalacsonyabb nyomás (2 Pa) teljes Boltzmann-analízisét mutatja. Az ambipoláris elektromos teret ((c) panel) tekintve megfigyelhető, hogy az ~ 8 mm-ig negatív, afölött pozitív értéket vesz fel. Ennek oka, hogy az ambipoláris tér arányos az elektronsűrűség gradiensevel. Egy elektromos negatív plazmában a nagy tehetetlenségű negatív ionok a plazma közepére kényszerülnek, ahol így lecsökken az elektronok sűrűsége. Ezért egy ún. ‘elektronél’ alakul ki, amely az elektronsűrűség lokális maximuma, ami ebben az esetben ~ 8 mm-nél alakul ki.



2. ábra. Az elektromos tér (bal oszlop) és a teljesítménysűrűség (jobb oszlop) tagjainak tér- és időbeli eloszlása egy RF-periódus alatt, a táplált elektróda közelében. A fekete vonal a határréteget jelöli. $L = 25$ mm, $\phi_0 = 500$ V, $f = 27.12$ MHz.

Belátható, hogy ez a megváltozott elektromos tér időben szimmetrikusabb kinetikus elektronhőmérséklet-eloszlást eredményez, amely következtében az ehhez az elektromos térhez tartozó teljesítmény tér- és időbeli átlaga nagymértékben lecsökken (részletesebben lásd Schulze J et al. 2018 *Plasma Sources Sci. Technol.* **27**(5) 055010).

3. Publikációk

- ([1]) Vass M, Wilczek S, Lafleur T, Brinkmann R P, Donkó Z and Schulze J, *Electron power absorption in low pressure capacitively coupled electronegative oxygen radio frequency plasmas*, Plasma Sources Science and Technology, elfogadott cikk (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6595/ab5f27/meta>)
- Pinhao N R, Loffhagen D, Vass M, Hartmann P, Korolov I, Dujko S, Bošnjaković and Donkó Z, *Electron swarm parameters in C₂H₂, C₂H₄ and C₂H₆: measurements and kinetic calculations*, Plasma Sources Science and Technology, beküldött cikk (<https://arxiv.org/pdf/1911.10093.pdf>)

4. Tanulmányi tevékenységek

A félévben elvégeztem a ‘Véges hőmérsékletű térelmélet és asztrofizikai alkalmazásai’ (FIZ/2/016E) tárgyat jeles érdemjeggyel.

5. Konferenciák

Részt vettem az október 28-tól november 1-ig College Station-ben (Texas, USA) tartott GEC (72nd Annual Gaseous Electronics Conference) konferencián, ahol szóbeli előadást tartottam *Spatio-temporal analysis of electron power absorption in low pressure CCPs operated in O₂* címmel (<http://meetings.aps.org/Meeting/GEC19/Session/ET2.4>).

6. Egyéb

6.1. Szakmai közéleti tevékenység

A félév során műhelyórát tartottam az Eötvös József Collegiumban fizikus hallgatóknak Lie-csoportok a fizikában’ címmel.

6.2. Elismerések

A 2019/2020-as tanévre elnyertem az ÚNKP doktori ösztöndíját.