

# 4. félévi doktori beszámoló

Vass Máté

Fizikai Doktori Iskola/Statistikus Fizika, Biológiai Fizika és Statistikus Rendszerek Fizikája

Témavezető: Donkó Zoltán

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

E-mail: vass.mate@wigner.hu

## 1. Bevezetés

Kapacitívan csatolt rádiófrekvenciás plazmaforrásokat ("Capacitively Coupled Plasma", CCP) széleskörű alkalmaznak különéle ipari folyamatokban (felületmegmunkálás, orvosi alkalmazások). Ezen plazmaforrások energetikai szempontból történő optimalizálása, illetve a folyamat kontrollálhatósága még mindig nyitott kérdés. A doktori témám ezen plazmaforrások szimulációja, illetve az ún. elektronfűtés, azaz az elektronok energiafelvételi és -leadási mechanizmusainak vizsgálata és fizikájának megértése. Ezt a *Boltzmann-term analysis* nevű módszer használatával teszem, melynek lényege, hogy a Particle-In-Cell/Monte-Carlo-Collisions (PIC/MCC) szimulációkból kapott tér- és időfelbontott elektromos tér, illetve teljesítményeloszlás felbontható a Boltzmann-egyenlet első sebesség szerinti momentumegyenlete (impulzusmérleg-egyenlet) alapján több, fizikailag különböző tagra, amely lehetővé teszi a kapacitív plazmákban megfigyelhető (komplex) elektronfűtési mechanizmusok könnyebb megértését.

## 2. Az előző három félév kutatási eredményeinek összegzése

A félévek során több, különböző kutatási témában is részt vettem. A témák, melyekben kutatást végeztem, az alábbiak voltak:

### 2.1. Elektronfűtés CCP-kben

A doktori témámmal kapcsolatosan több, különböző kérdést is vizsgáltam, melyekből eddig négy megjelent publikáció született. Az általam vizsgált kérdések és a kapott eredmények vázlatosan a következők voltak:

- Vizsgáltam elektropozitív és elektronegatív gázok elektronfűtésének sajátosságait. Az eredmények ellentmondtak a tudományág eddigi, elektronfűtésről alkotott elképzeléseinek, miszerint az alacsony nyomás az Ohmikus fűtés – azaz a részecskék ütközéseiből adódó energiavesztés – lecsökkenését vonja maga után. Mind argonban, mind oxigénben találtam olyan eseteket, amikor alacsony nyomáson az Ohmikus fűtés dominál. Ezekről egy-egy publikáció született.
- Vizsgáltam az elektronfűtés sajátosságait másodlagoselektron-emisszió esetén különböző gázokban. Az eredmények alapján a nagyenergiás másodlagos elektronok elsősorban az ambipoláris fűtés növeléséért felelősek. Vizsgáltam továbbá az ún.  $\alpha - \gamma$ -átmenet fizikai okait, illetve meghatározási módját, amely jelenleg is folyamatban van. A másodlagos elektronok

által alacsony nyomáson kialakított elektrondinamikát is vizsgáltam, melyből egy publikáció született.

- Vizsgáltam az ütközési operátor klasszikus közelítésének érvényességét kapacitívan csatolt plazmák esetén. Az eredmények alapján elmondható, hogy a klasszikus közelítés viszonylag elfogadható a legtöbb gázban (az Ohmikus fűtést  $< 70\%$  hibával becsli, azonban Ramsauer-minimummal rendelkező gázok esetén (mint amilyen az előszeretettel használt argon is) a közelítés alkalmazhatósága drasztikusan lecsökken, melynek oka, hogy a közelítés az alacsony energiás elektronokat „részeshí elnyel”. Az eredményekből egy publikáció született.

## 2.2. PIC/MCC szimulációk vizsgálata

A kutatásban használt részecskealapú kinetikus szimulációs módszer, az ún. PIC/MCC vizsgálatával foglalkoztam. Az idei ÚNKP-témám keretein belül a szimulációk stabilitási és pontossági kritériumait vizsgáltam különböző körülmények között a bemeneti numerikus paraméterek függvényében (ld. következő fejezet). Az eredményekből egy kézirat írása folyamatban van. Csoportunk a szimulációs módszer kapacitív csatolású plazmák leírására történő alkalmazásáról egy oktatási célzatú kéziratot is készített, amely jelenleg elbírálás alatt áll (ld. Publikációk fejezet).

## 2.3. Elektrontranszport-együtthatók meghatározása gázokban

A 2019/2020-as ÚNKP-témám keretein belül elektronok külső, időben állandó elektromos tér hatására gázokban történő transzportját leíró elektrontranszport-együtthatók kísérleti meghatározásában vettem részt. Ezt különböző szénhidrogénekre és szén-dioxidra tettem meg, melyből két publikáció született. A téma folytatódik, a következő, szén-monoxid-gázzal kapcsolatos kézirat jelenleg előkészületben van.

## 3. Az aktuális félévben elvégzett kutatások

Az elmúlt félévben a következő témákkal foglalkoztam:

- Vizsgáltam atmoszferikus nyomású He-N<sub>2</sub> mikroplazma-jeteket a Boltzmann term analysis segítségével. Az eredmények azt mutatják, hogy noha a nagy nyomás miatt szinte teljes mértékben csak Ohmikus-fűtés van jelen, az elektronok tér- és időbeli dinamikájáért az ambipoláris tér is nagyban felelős, elsősorban egy lokális elektromos tér-erősség minimum miatt, ami a földelt elektróda közelében a fluxusmegmaradás miatt alakul ki, és nagyban hozzájárul annak megértéséhez, hogy a szabályozott hullámformák (Voltage Waveform Tailoring) miért teszik lehetővé a plazmában lévő elektronok energiaeloszlás-függvényének effektív kontrollálását.
- Az ÚNKP-témám keretein belül az eredményekhez használt szimulációs módszer, a Particle-In-Cell/Monte-Carlo-Collisions (PIC/MCC) módszer numerikus bemeneti paramétereinek stabilitás- és pontossági függését vizsgáltam. Az eredmények alapján a rácsfelbontás csökkenése alacsony nyomáson növelte az elektronsűrűséget, ami előszörban az alacsony nyomás miatti nemlokális elektrontranszport következménye. Növelve a nyomást ez az effektus eltűnik és a szimuláció nem lesz érzékeny a rácsfelbontás változtatására. Az időlépés felosztására épp ellenkező viselkedést figyeltem meg, ennek oka az ütközési valószínűség növekedése csökkenő felbontás mellett, ami így potenciális ütközések kihagyását eredményezi. Egy további paraméter, az ún. részecskesúly (ami egy, a szimulációban követett szuperrészecskében található valódi részecskék számát adja meg) változtatása során a plazma meseterséges termalizációját figyeltem meg, hiszen az egy Debye-gömbön belüli kis számú részecske esetén az átlagtérelmélet elromlik, és az átlag körüli fluktuációk nagyobb szerepet kapnak, ami miatt az eloszlásfüggvény egy Maxwell-Boltzmann-eloszláshoz fog közelíteni. Ez alacsony nyomáson a sűrűség csökkenéséhez vezet, míg nagy nyomáson a növekedett ionizáció miatt sűrűsénövekedéshez vezet.

- A félév során a csoportunkban egy moduláris PIC/MCC-kód fejlesztésében vettem részt.

## 4. Publikációk a négy félév alatt

Előkészületben:

- **Vass M**, Wilczek S, Lafleur T, Brinkmann R P, Donkó Z & Schulze J, *Electron power absorption in micro atmospheric pressure plasma jets driven by tailored voltage waveforms in He/N<sub>2</sub>*.

Megjelent:

- **Vass M**, Wilczek S, Lafleur T, Brinkmann R P, Donkó Z & Schulze J, *Collisional electron momentum loss in low temperature plasmas: On the validity of the classical approximation* 2021 *Plasma Sources Sci. Technol.*, elfogadott cikk
- Donkó Z, Derzsi A, **Vass M**, Horváth B, Wilczek S, Hartmann B & Hartmann P *eduPIC: an introductory particle based code for radio-frequency plasma simulation* 2021 (arXiv preprint arXiv:2103.09642.), bírálóat alatt a *Plasma Sources Sci. Technol.* folyóiratnál
- **Vass M**, Derzsi A, Schulze J & Donkó Z, *Intrasheath electron dynamics in low pressure capacitively coupled plasmas* 2021 *Plasma Sources Sci. Technol.* **30**(3) 03LT04
- **Vass M**, Egüz E, Chachereau A, Hartmann P, Korolov I, Hösl A, Bošnjakovic D, Dujko S, Donkó Z & Franck C M, *Electron transport parameters in CO<sub>2</sub>: a comparison of two experimental systems and measured data* 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** 035202
- Pinhão N R, Loffhagen D, **Vass M**, Hartmann P, Korolov I, Dujko S, Bošnjakovic D & Donkó Z. *Electron swarm parameters in C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>: measurements and kinetic calculations.* 2020 *Plasma Sources Sci. Technol.* **29**(4) 045009
- **Vass M**, Wilczek S, Lafleur T, Brinkmann R P, Donkó Z & Schulze J, *Observation of dominant Ohmic electron power absorption in capacitively coupled radio frequency argon discharges at low pressure.* 2020 *Plasma Sources Sci. Technol.* **29**(8) 085014
- **Vass M**, Wilczek S, Lafleur T, Brinkmann R P, Donkó Z & Schulze J, *Electron power absorption in low pressure capacitively coupled electronegative oxygen radio frequency plasmas.* 2020 *Plasma Sources Sci. Technol.* **29**(2) 025019

## 5. Tanulmányi tevékenységek az adott félévben

Ebben a félévben a következő tárgyakat vettem fel:

1. *Stochasztikus folyamatok* (FIZ/3/079) – a tárgyra 'jeles' érdemjegyet kaptam.
2. *Nyitott kvantumrendszerek elméletei* (FIZ/3/066E) – a beszámoló írásakor még nem kaptam jegyet.

## 6. Konferenciák a négy félév alatt

- Szóbeli előadás *Understanding Electron Power Absorption in CCPs via a Boltzmann Term Analysis as a Basis for Knowledge-Based Process Development* címmel, The 8<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics and Plasma Technology & the 9<sup>th</sup> International Symposium on Functional Materials, 2021 [http://icmap2020.org/download/program01/The\\_8th\\_ICMAP\\_&\\_The\\_9th\\_ISFM\\_Final\\_Program\\_TB4.pdf](http://icmap2020.org/download/program01/The_8th_ICMAP_&_The_9th_ISFM_Final_Program_TB4.pdf)

- Meghívott előadás *Electron power absorption in capacitive RF plasmas based on a moment analysis of the Boltzmann equation* címmel, 73rd Annual Gaseous Electronics Virtual Conference, 2020 (<http://meetings.aps.org/Meeting/GEC20/Session/PW2.1>)
- Szóbeli előadás *Spatio-temporal analysis of electron power absorption in low pressure CCPs operated in O<sub>2</sub>* címmel, 72nd Annual Gaseous Electronics Conference, College Station (Texas, USA), 2019 (<http://meetings.aps.org/Meeting/GEC19/Session/ET2.4>)

## 7. Egyéb

A 2021/22-es tanévre elnyertem az ÚNKP doktori ösztöndíját.