

T-48389

Plazmafizikai sokrészecske-rendszerek modellezése

Összefoglaló szakmai beszámoló

[Témavezető: Donkó Zoltán, MTA-SZFKI]

A pályázat keretében végzett munkánk a gázkisülés- és plazmafizika alábbi területeihez kívánt hozzájárulni: (i) *alacsony hőmérséklet egyenáramú gázkisülések*, (ii) *alacsony nyomású rádiófrekvencián gerjesztett gázkisülések*, és (iii) *erősen csatolt plazmafizikai rendszerek*. Munkánk elsősorban az említett fizikai rendszerek alapjelenségeinek megértését célozta, nagyrészt a numerikus modellezés és szimulációk által nyújtott lehetőségek kihasználásával. A modellezés mellett kísérleteket is végeztünk eredményeink ellenőrzésére, valamint számítási eredményeinket együttműködő csoportok elméleti, illetve kísérleti eredményeivel hasonlítottuk össze. Az alábbiakban a pályázat keretében folytatott munkánk — publikációkban már közölt — eredményeit ismertetjük.

Kutatásainkat a T048389 pályázat mellett az IN69892 nemzetközi kiegészítő pályázat is támogatta, így ez a kutatási jelentés egyben az IN69892 pályázat jelentéseként is szolgál.

Nemzetközi együttműködéseink közül az alábbi két legfontosabb intézményt említjük:

- *Boston College, Physics Department* (erősen csatolt plazmák fizikája témakörében), és
- *Ruhr University Bochum, Institute for Experimental Physics* (rádiófrekvencián gerjesztett plazmák vizsgálata témakörében),

A fenti intézményekkel intenzív kutatócsere folyt az elmúlt évek során, illetve a közös munkából számos publikáció született. Eredményeink döntő többségét az MTA-SZFKI-ban végzett munkánkkal értük el.

Kutatási eredmények

a) Alacsony hőmérséklet egyenáramú gázkisülések kutatása

Az alacsony nyomású gázkisülések leírásához évek óta alkalmazott és továbbfejlesztett hibrid (folyadék és részecske típusú leírást egyesítő) modellünket összehasonlítottuk egy Boltzmann egyenlet megoldására alapuló módszerrel, amelyet a greifswaldi *Leibniz Institut für Plasmaforschung und Technologie* intézetben dolgoztak ki. A két módszer együttes alkalmazása igen részletes képet adott az elektronok kinetikájáról, melynek ismerete fontos a kisülések működésének (önfenntartásának) a megértéséhez.¹ A szimulációs modellek további tesztelésére Langmuir szondás méréseket végeztünk alacsony nyomású hélium gázkisülésekben. A mérések megadták az elektronok sűrűségét és hőmérsékletét a gázkisülés alacsony ionizáltsági fokú plazmájában. A mért és számolt elektronsűrűség egy kettes faktoron belül egyezett, ami ezen a területen (figyelembe véve a modell bemenő adatainak bizonytalanságát, valamint a használt szonda véges méretét) igen jónak számít. A mérési adatok egyértelműen bizonyították, hogy a kisülések negatív fény térrészében egy, lényegében termikus (közel szobahőmérsékletű) elektronpopuláció van jelen.² Ennek a megfigyelésnek a fontosságát az adja, hogy sok korábbi publikációban a szerzők ennél lényegesen magasabb elektronthőmérsékletet tétéleztek fel a modellezés során, így a töltött részecskék sűrűségére kapott eredmények ezekben az esetekben

¹ F. Sigeneger, Z. Donkó, D. Loffhagen, "Boltzmann equation and particle-fluid hybrid modelling of a hollow cathode discharge", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 38, 161-167 (2007).

² G. Bánó, P. Hartmann, K. Kutasi, P. Horváth, R. Plasil, P. Hlavenka, J. Glosik, Z. Donkó, "Combined Langmuir probe, electrical and hybrid modelling characterization of helium glow discharges", *Plasma Sources Sci. Technol.* 16, 492–500 (2007).

megkérdőjelezhetők. Ugyancsak megmutattuk, hogy a modellekben feltételezett elektronhőmérséklet jelentősen befolyásolhatja a közepes nyomású ($p = 20\text{-}60$ mbar), molekuláris ionokat is nagy számban tartalmazó gázkisülések esetében a modellezési eredményeket.³ Továbbá rámutattunk arra, hogy ebben a nyomástartományban általában elhanyagolt molekuláris ionok fontos szerepet játszanak a kisülések öfenntartásában.

Szimulációkkal vizsgáltuk egy, különleges körülmények között (nagy feszültség mellett igen alacsony nyomáson) fellépő gerjesztési folyamat megjelenését gázkisülésekben. Igen nagy térerősségek mellett a gázionok rugalmas ütközésekkel gyors atomokat hoznak létre, amelyek energiája akár több 100 eV értékű is lehet. Ezek a gyors atomok az elektronokhoz hasonlóan ütközésekkel gerjeszthetik a gázatomokat.⁴ Emellett a gyors atomok eredményeink szerint lényegesen befolyásolhatják a kisülés ionizációs mérlegét is, ugyanis gyors atomok a katód közvetlen környezetében keletkeznek (a nagy elektromos térerősség miatt), és az itt keltett elektronok a katódból kilépett elektronokhoz hasonlóan viselkedve elektronlavinákat indítanak el. Ezáltal többek között jelentősen megváltoztatják a töltött részecskék koncentrációját.

A grenoble-i *J. Fourier Egyetemmel* és az *Antwerpeni Egyetemmel* együttműködésben megmértük metastabil argon atomok koncentrációjának térbeli eloszlását egy ügeres katódú argon kisülésben. A kisülés modellezésével kapott eredmények elfogadható egyezést mutattak a mérési eredményekkel. A mérések a kisülés katódja mellett jelentős metastabil atom koncentrációt mutattak, ami egy felületi metastabil atom keltési folyamat jelenlétére utal (u.i. ennek hiányában a falhoz történő diffúzió nullához tartó sűrűségeloszlást eredményezne).⁵ Ezen folyamat jellege máig nem tisztázódott, a metastabil atomok keletkezése a katódnál feltehetően gyors ionoknak és atomoknak a katód felületén gyengén kötött argon atomokkal való kölcsönhatásának eredménye.

Az alacsony nyomású gázkisülések modellezése területén⁶ igyekeztünk különös figyelmet fordítani az egyes alkalmazott módszerek *korlátainak* tanulmányozására. A folyadék, illetve hibrid modellek kritikus vizsgálata mellett tanulmányoztuk a (főként rádiófrekvenciás gázkisülések leírására elterjedt) particle-in-cell (PIC) szimulációs módszer alkalmazhatóságát egyenfeszültségű gázkisülések leírására. Ez utóbbi teszt negatív eredménnyel zárult, megmutattuk, hogy a töltéshordozó-koncentráció és az elektronhőmérséklet számolt értéke nagymértékben függ a szimulációban használt részecskeszámától.⁷ A modellezési módszerek megbízhatóságának, korlátainak, hiányosságainak elemzését igen fontosnak tartjuk és jelenlegi munkánkban tovább kívánjuk folytatni.

Monte Carlo szimuláció módszerével vizsgáltuk elektronok kinetikáját különböző alacsony ionizáltsági fokú plazmákban: (i) kiszámítottuk az elektronok eloszlásfüggvényének időbeli fejlődését He, He/Ar, He/Xe/H₂, valamint He/Xe/D₂ gázokban, az aktív kisülés utáni, "utókisülés" időszakában,⁸ illetve (ii) a Föld légkörében fellépő elektromos kisüléseknek megfelelő paraméterek (nyomás, gázösszetétel, elektromos térerősség) mellett.⁹ Ez utóbbi munkához (egy MTA-CSIC, Spanyolország együttműködésben) felépítettünk egy hatáskeresztmetszet adatbázist az elektronok és a levegő összetevői közötti ütközési folyamatokra.

³ K. Kutasi, P. Hartmann, G. Bano, Z. Donkó: "He₂⁺ molecular ions in helium glow discharges: the effect of bulk electron temperature", *Plasma Sources Sci. Technol.* 14, S1-S8 (2005)

⁴ Z. Donkó, P. Hartmann, K. Kutasi, "Effects of fast neutral particles in low-pressure gas discharges", *J. Phys. Conf. Series* 71, 021008 (2007).

⁵ N. Baguer, A. Bogaerts, Z. Donkó, R. Gijbels, N. Sadeghi: "Study of the Ar metastable atom population in a hollow cathode discharge by means of a hybrid model and spectrometric measurements" *J. Appl. Phys.* 97, 123305 (2005)

⁶ K. Kutasi, P. Hartmann, Z. Donkó, "Self-consistent modeling of glow discharges", *Padeu* 15, 147-155 (2005).

⁷ Z. Donkó, P. Hartmann, K. Kutasi, "On the reliability of low-pressure dc glow discharge modelling", *Plasma Sources Sci. Technol.* 5, 178-186 (2006).

⁸ R. Plasil, I. Korolov, T. Kotrik, P. Dohnal, G. Bano, Z. Donkó and J. Glosik, "Non-Maxwellian electron energy distribution function in He, He/Ar, He/Xe/H₂ and He/Xe/D₂ low temperature afterglow plasma", *Eur. Phys. J. D* 54, 391-398 (2009).

⁹ F. J. Gordillo-Vazquez, Z. Donkó, "Electron energy distribution functions and transport coefficients relevant for air plasmas in the troposphere: impact of humidity and gas temperature", *Plasma Sources Sci. Technol.* 18, 034021 (2009).

b) Rádiófrekvenciás gerjesztés gázkisülések

Az alacsony nyomású, rádiófrekvenciás gerjesztésű gázkisülések kutatása területén a „particle-in-cell” (PIC) szimulációs módszerrel végeztünk számításokat, az általunk kifejlesztett kóddal.¹⁰ Vizsgáltuk argon, széntetrafluorid, valamint e két gáz elegyében lérehozott kisülések tulajdonságait. Bizonyítottuk, hogy két eltérő frekvenciájú (pl. 100 MHz és 1 MHz) gerjesztés együttes alkalmazása esetén, elegendően kis nyomásoknál, az elektródákat érő ionok energiaeloszlása és fluxusa egymástól közelítőleg függetlenül kontrollálható a források feszültségének beállításával. Ebben a (mikroelektronikai felületmegmunkálás szempontjából igen lényeges) működési tartományban a nagyobb frekvenciájú forrás állítja be a plazma sűrűségét, míg az alacsony frekvenciájú forrás feszültsége szabja meg az ionok energiáját.¹¹

A bochumi Ruhr Egyetemen 2008-ban szabadalmaztattak egy új módszert az ionok fluxusának és energiájának független beállítására: ez az „Elektromos aszimmetria effektus”-ra alapuló módszer szintén két különböző frekvenciájú, együttes gerjesztést alkalmaz, az alkalmazott nagyobb frekvencia a kisebb frekvencia páros számú többszöröse kell legyen; alapesetben f & $2f$, ahol tipikusan $f = 13.56$ MHz. A két frekvencia közötti fáziskülönbség változtatásával lehetőség van a kisülési plazma kvázisemleges tartományának a pozícióját és az egyes elektródákra érkező ionok energiáját beállítani. PIC szimulációs programunkat alkalmassá tettük az effektus leírására, majd részletes vizsgálatokat végeztünk az ionok fluxusára, energiaeloszlására vonatkozóan.^{12, 13} A számításokkal megmutattuk, hogy a két gerjesztő frekvencia közötti fáziskülönbség változtatása egy DC előfeszültséget hoz létre a kapacitív módon táplált elektródák között, és hogy ez az előfeszültség közel lineárisan változik a fáziskülönbséggel. Az ionok energiaeloszlása az előfeszültséggel változtatható, miközben a számítások szerint az ionfluxus közel állandó marad. A modellezési eredményeket később a Ruhr Egyetemen kísérletileg igazolták.

Ugyancsak a PIC módszerrel tanulmányoztuk az elektronok fűtési mechanizmusát, a gerjesztési és ionizációs folyamatok térbeli és időbeli eloszlását különböző rádiófrekvenciás kisülésekben¹⁴, az elektromos tér időbeli és térbeli fejlődésének jelenségeit,¹⁵ valamint az ezekben fellépő nemlineáris, öngerjesztett rezgéseket.¹⁶ Vizsgáltuk továbbá annak hatását, ha eltérő feszültségű generátorokat alkalmazunk az „Elektromos aszimmetria effektus” előállítására.¹⁷ Ezeket a kutatásokat a Ruhr Egyetemmel együttműködésben végeztük, ahol mindezeket az effektusokat kísérletileg vizsgálták. A kísérleti és a szimulációs eredmények között minden esetben igen jó egyezést találtunk.

c) Erősen csatolt plazmák fizikája

A komplex plazmák kutatása területén Yukawa (ill. Debye-Hückel) és Coulomb kölcsönhatási potenciállal jellemezhető sokrészesce-rendszerek leírásával foglalkoztunk.

¹⁰ Z. Donkó, Z. Lj. Petrović, „Analysis of a capacitively coupled dual-frequency CF4 discharge”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 45 Part 1, No. 10B, 8151-8156 (2006).

¹¹ Z. Donkó and Z. Lj. Petrović, „Ion behavior in capacitively-coupled dual-frequency discharges”, J. Phys.: Conf. Ser. 86 012011/1-10 (2007).

¹² Z. Donkó, J. Schulze, B. G. Heil and U. Czarnetzki, „PIC simulations of the separate control of ion flux and energy in CCRF discharges via the electrical asymmetry effect”, J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 025205 (2009)

¹³ U. Czarnetzki, B. G. Heil, J. Schulze, Z. Donkó, T. Mussenbrock and R. P. Brinkmann, „The Electrical Asymmetry Effect - A novel and simple method for separate control of ion energy and flux in capacitively coupled RF discharges”, J. Phys.: Conf. Ser. 162, 012010 (2009)

¹⁴ J. Schulze, Z. Donkó, D. Luggenhölscher and U. Czarnetzki, „Different modes of electron heating in dual-frequency capacitively coupled radio frequency discharges”, Plasma Sources Sci. Technol. Plasma Sources Sci. Technol. 18, 034011 (2009).

¹⁵ J. Schulze, Z. Donkó, B. G. Heil, D. Luggenhölscher, T. Mussenbrock, R. P. Brinkmann and U. Czarnetzki, „Electric field reversals in the sheath region of capacitively coupled radio frequency discharges at different pressures”, J. Phys. D: Appl. Phys. 41, 105214 (2008).

¹⁶ Z. Donkó, J. Schulze, U. Czarnetzki and D. Luggenhölscher, „Self-excited nonlinear plasma series resonance oscillations in geometrically symmetric capacitively coupled radio frequency discharges”, Appl. Phys. Lett. 94, 131501 (2009).

¹⁷ J. Schulze, E. Schüngel, U. Czarnetzki, Z. Donkó: „Optimization of the electrical asymmetry effect in dual-frequency capacitively coupled radio frequency discharges: Experiment, simulation, and model”, J. Appl. Phys. 106, 063307 (2009).

Molekuladinamikai szimulációval vizsgáltunk erősen csatolt *2-dimenziós folyadékállapotú Yukawa rendszereket*.¹⁸ A statikus (párkorrelációs függvények, struktúrafüggvények) és termodinamikai (korrelációs energia, nyomás) jellemzők mellett kiszámítottuk a rendszer dielektromos függvényét és meghatároztuk a folyadék-szilárd fázisdiagramot.¹⁹ A szilárd-folyadék fázisátmenet részleteit tanulmányoztuk molekuladinamikai szimulációval, több rendparaméter, illetve termodinamikai mennyiség egyértelműen mutatták a fázisátalakulást. A kapott eredmények másodrendű fázisátalakulást valószínűsítene, ellentétben a 3-dimenziós esettel, ahol a fázisátalakulás elsőrendű. A szimulációk ugyancsak valószínűsítik a 2 dimenziós fázisátalakulásra jellemző átmeneti hexatikus fázis jelenlétét, de ezt, a fázis (hőmérsékletben) rendkívül keskeny volta miatt eddig nem sikerült egyértelműen bizonyítani.²⁰

Kétdimenziós kristályos és folyadékállapotú Yukawa rendszerek hullámdiszperziós tulajdonságait (a longitudinális és transzverzális kollektív gerjesztések spektrumait és diszperziós relációit) vizsgáltuk rácsösszegzéssel, molekuladinamikai szimulációval és az ún. QLCA (quasilocalized charge approximation²¹) elmélet alkalmazásával.²² A három független módszer összehasonlításával azok megbízhatóságát is vizsgáltuk.²³ Ugyancsak kétdimenziós esetben tanulmányoztuk a kristályos rendszerbe érkező nyaláb (gyors részecskék) hatását, Mach kúpok megjelenését és a nyalábrészecskék lefékeződésének részleteit tártuk fel.²⁴

Meghatároztuk *bipoláris (elektron-lyuk) kettősrétegek* fázisdiagramját, ebben azonosítottuk a Coulomb és dipól, illetve a folyadék és szilárd fázisokat.²⁵ A rendszerek hullámdiszperziós tulajdonságairól (a fenti módszerekkel) kimutattuk, hogy azok jelentősen eltérnek az irodalomban található elméleti jóslattól. Számításaink szerint a két rétegben ellentétes fázisú részecskeoszillációknak megfelelő módus "gap"-pel rendelkezik, ez a gap viszont a szilárd fázisban kis hullámszámoknál egyértékű, a korábbi jóslatokkal ellentétben. Továbbá megfigyeltük ezen gap frekvencia felharmonikusait a többi rezgési módus spektrumában, amely nemlineáris hullámjelenségek léteére utal.²⁶ Korábbi kutatásaink folytatásaként *unipoláris (a két rétegben megegyező töltés részecskéket tartalmazó) rétegekre* kiszámítottuk a hullámdiszperziós tulajdonságokat arra az esetre, amikor a két rétegben a részecskesűrűség különböző.²⁷

A bipoláris kettősrétegekkel hasonlóságot mutató dipólrendszerek esetében megállapítottuk, hogy a hullámdiszperzió akusztikus jellegű.^{28,29} Erősen csatolt rendszerekben a termikusan gerjesztett

¹⁸ Z. Donkó, P. Hartmann and G. J. Kalman, "Two-dimensional dusty plasma crystals and liquids", J. Phys.: Conf. Ser. 162, 012016 (2009).

¹⁹ P. Hartmann, G. J. Kalman, Z. Donkó, K. Kutasi: "Equilibrium properties and phase diagram of two-dimensional Yukawa systems", Phys. Rev. E 72, 026409 (2005).

²⁰ P. Hartmann, Z. Donkó, P. Bakshi, G. J. Kalman, S. Kyrkos, "Molecular dynamics studies of the solid-liquid phase transition in 2D Yukawa systems" IEEE Trans. Plasma Sci., 35 332 (2007).

²¹ G. J. Kalman, K. I. Golden, Z. Donkó, P. Hartmann, "The quasilocalized charge approximation", J. Phys. Conf. Series 11, 254-267 (2005).

²² P. Hartmann, Z. Donkó, G. J. Kalman, S. Kyrkos, M. Rosenberg, P. Bakshi, "Collective modes in 2D Yukawa solids and liquids", IEEE Trans. Plasma Sci., 35, 337 (2007).

²³ T. Sullivan, G. J. Kalman, S. Kyrkos, P. Bakshi, M. Rosenberg, Z. Donkó, "Phonons in Yukawa lattices and liquids", J. Phys. A: Math. Gen. 39, 4607-4611 (2006).

²⁴ M. Rosenberg, G. J. Kalman, S. Kyrkos, Z. Donkó, "Beam-plasma interaction in strongly coupled plasmas", J. Phys. A: Math. Gen. 39, 4613-4618 (2006).

²⁵ P. Hartmann, Z. Donkó and G. J. Kalman, "Structure and phase diagram of strongly-coupled bipolar charged-particle bilayers", Europhys. Lett. 72, 396-402 (2005).

²⁶ G. J. Kalman, P. Hartmann, Z. Donkó, K. I. Golden, "Collective Excitations in Electron-Hole Bilayers", Phys. Rev. Lett. 98, 236801 (2007).

²⁷ H. Mahassen, K. Kutasi, K. I. Golden, G. J. Kalman, Z. Donkó, "Longitudinal collective modes in asymmetric charged-particle bilayers", J. Phys. A: Math. Gen. 39, 4601-4605 (2006).

²⁸ K. I. Golden, G. J. Kalman, Z. Donkó and P. Hartmann, "Acoustic dispersion in a two-dimensional dipole system" Phys. Rev. B 78, 045304 (2008).

²⁹ K. I. Golden, G. J. Kalman, Z. Donkó and P. Hartmann, "Collective excitations in a two-dimensional dipole system", J. Phys. A: Math. Theor 42, 214017 (2009).

hullámok közötti kölcsönhatás és a kölcsönhatási potenciál anharmonicitása következtében fellépő felharmonikusultást észleltünk a szimulációkból származó sűrűség- és áramfluktuáció spektrumokban.³⁰

Poros-plazma kísérletekben az utóbbi időben lehetőség nyílt állandó mágnesezettségű porszemcsék használatára. Ezen rendszerek járulékos mágneses dipólus kölcsönhatása a tisztán elektromos rendszerekhez képest újfajta jelenségekhez vezet. Elméleti és molekuladinamikai szimulációs módszerekkel vizsgáltuk ezen sokrészesecske rendszerek termodinamikai alapállapotát (rácsszerkezetet, mágnesezettséget és energiát a versengő elektromos és mágneses kölcsönhatások függvényében), valamint a rotációs kollektív módusok hullámdiszperziós tulajdonságait. Elsőrendű átalakulást mutattunk ki az alapállapotú ferromágneses és anti-ferromágneses fázisok között a rácsparaméterek függvényében.³¹

Kutatásokat végeztünk 2- és 3-dimenziós Yukawa folyadékok transzportjellemzőire vonatkozóan. Egyensúlyi molekuladinamikai szimulációkkal meghatároztuk 2-dimenziós rendszerekre a transzport-együtthatókkal (Green-Kubo relációkon keresztül) összefüggésben lévő korrelációs függvényeket: a diffúziós együttható számításához szükséges sebesség autokorrelációs függvényt, valamint a nyíró viszkozitási és hővezetési együtthatók számításához szükséges feszültség és energiaáram autokorrelációs függvényeket. A rendszereket jellemző paraméterek egyes tartományaiban ezek a függvények közel $1/t$ jellegű lecsengést mutattak.³² Ez a viselkedés anomális transzportra utal, a diffúzió esetében például szuperdiffúziót figyeltünk meg, amikor a részecskék elmozdulásának négyzete az idő egynél nagyobb hatványával növekszik. A szuperdiffúzió (más csoportok által kísérletileg is észlelt) jelenségét kvázi-2-dimenziós (különböző potenciálokkal összetartott) rendszereken tovább vizsgáltuk, megfigyeltük, hogy a 3-dimenziós rendszer felé haladva a normális diffúzió tartományába érünk.³³

A nyíró viszkozitás tanulmányozásánál megfigyeltük a rendszerek nem-Newtoni viselkedését, ami nagy nyíró feszültségek mellett a viszkozitás csökkenésében nyilvánult meg.^{34,35} Háromdimenziós Yukawa folyadékokra mind egyensúlyi, mind pedig nemegyensúlyi molekuladinamikai szimulációkat végeztünk a nyíró viszkozitás meghatározására. A két módszerrel kapott eredményeinket egymással, illetve mások korábbi eredményeivel összehasonlítva meggyőződünk, hogy az eddigieknél jóval pontosabb eredmények birtokába jutottunk.³⁶

A kutatási eredmények visszhangja, publikációk, disszertációk

a) A projekt futamideje alatt a következő meghívott előadásokat tartottuk nemzetközi konferenciákon:

- Z. Donkó: "On the reliability of low-pressure DC glow discharge modeling", 27th International Conference on the Phenomena in Ionized Gases (ICPIG) Eindhoven, The Netherlands (2005).

³⁰ P. Hartmann, Z. Donkó, K. P. Tierney, C. J. Lee and G. J. Kalman, "Higher harmonic generation in strongly coupled plasmas, J. Phys. A : Math. Theor. 42, 214040 (2009).

³¹ J. D. Feldmann, G. J. Kalman, P. Hartmann, M. Rosenberg, "Ground State of Magnetic Dipoles on a Two-Dimensional Lattice: Structural Phases in Complex Plasmas", Phys. Rev. Lett. 100, 085001 (2008).

³² Z. Donkó, J. Goree, P. Hartmann, and Bin Liu, "Time-correlation functions and transport coefficients of two-dimensional Yukawa liquids", Phys. Rev. E 79, 026401 (2009).

³³ T. Ott, M. Bonitz, Z. Donkó and P. Hartmann, "Superdiffusion in quasi-two-dimensional Yukawa liquids", PHYSICAL REVIEW E 78, 026409 (2008).

³⁴ Z. Donkó, J. Goree, P. Hartmann, K. Kutasi, "Shear viscosity and shear thinning in two-dimensional Yukawa liquids", Phys. Rev. Lett. 96, 145003 (2006).

³⁵ Z. Donkó, P. Hartmann, J. Goree, "Shear viscosity of strongly-coupled two-dimensional Yukawa liquids: experiment and modeling", Modern Physics Letters B 21, 1357-1376 (2007).

³⁶ Z. Donkó and P. Hartmann, "Shear viscosity of strongly coupled Yukawa liquids", Physical Review E, 78, 026408 (2008).

- K. Kutasi: "Self-consistent modeling of glow discharges", British-Romanian-Hungarian Workshop for Young Researchers on Plasma- and Astrophysics: from laboratory to outer space, 17-19 January 2005, Cluj-Napoca, Romania
- P. Hartmann: "Two-dimensional Yukawa liquids: structure and collective excitations" International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems (SCCS), June 20-25 2005, Moscow, Russia
- Z. Donkó: "Strongly Coupled Plasmas: Exotic States of Matter", 15th Annual Conference of Doctoral Students - WDS 2006, Prague, 6th June - 9th June, 2006
- P. Hartmann: "Numerical experiments on complex plasmas: 2D Yukawa systems" 28th International Conference on the Phenomena in Ionized Gases (ICPIG), July 15-20, 2007, Prague, Czech Republic
- P. Hartmann: "Numerical Experiments on Complex Plasmas", SAPP XVI: 16th Symposium on Application of Plasma Processes and Workshop on Research of Plasma Physics and Applications in Visegrad Countries, Podbanske, Slovakia, Jan. 20-25, 2007.
- Z. Donkó, "Modeling of dual-frequency capacitive discharges", SAPP XVI: 16th Symposium on Application of Plasma Processes and Workshop on Research of Plasma Physics and Applications in Visegrad Countries, Podbanske, Slovakia, Jan. 20-25, 2007.
- Z. Donkó, "Molecular dynamics simulations of strongly coupled plasmas", International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems (SCCS), Camerino, Italy, 29 July - 2 August 2008.
- Z. Donkó: "Two-dimensional dusty plasma crystals and liquids", 2nd International Workshop on Non-Equilibrium processes in Plasmas and Environmental Science, 23–26 August 2008, Belgrade and Novi Sad, Serbia

b) A projekt résztvevői közül:

- Donkó Zoltán 2005-ben elnyerte az *MTA Doktora (Fizika tudomány)* címet;
- Hartmann Péter 2006-ban elnyerte az *MTA Akadémiai Ifjúsági Díját*;
- Donkó Zoltán és Hartmann Péter 2007-ben a Boston College-től (USA) *Visiting Scholar* kinevezést kapott;
- Kutasi Kinga 2008-ban elnyerte az *MTA Bolyai Kutatói Ösztöndíját*;
- Hartmann Péter 2008-ban elnyerte az *MTA Bolyai Kutatói Ösztöndíját*;
- Kutasi Kinga 2009-ben elnyerte az *MTA Akadémiai Ifjúsági Díját*.

c) A témán dolgozó hallgatók közül:

- Mohácsi István 2009-ben az OTKA-PD-75113 által is támogatott "*Plazmakristályok kollektív dinamikája*" c. dolgozatával dícséretben részesült az ELTE TTK Tudományos Diákköri konferenciáján ;
- Simon Péter mérnökfizikus hallgató 2009-ben "*Kisméret anód környezetében fellép fényjelenségek alacsony nyomású argon gázkisülésben*" címmel elkészítette diplomamunkáját a BME-n;
- A projekthez kapcsolódó IN-69892 sz. pályázat keretében végzett munka lényegesen hozzájárult egy, a bochumi Ruhr Egyetemen megírt PhD disszertációhoz (Julian Schulze, "*Electron heating in capacitively coupled radio frequency discharges*", beadva 2009 szeptember).

d) A pályázat futamideje alatt két felkérést kaptunk összefoglaló cikkek írására:

1. Z. Donkó, P. Hartmann, J. Goree, "*Shear viscosity of strongly-coupled two-dimensional Yukawa liquids: experiment and modeling*", *Modern Physics Letters B* 21, pp. 1357-1376 (2007).
2. Z. Donkó, G. J. Kalman, P. Hartmann, "*Dynamical correlations and collective excitations of Yukawa liquids*", *Journal of Physics Condensed Matter* 20, 413101 / pp.1-35 (2008).

e) A pályázat keretében végzett munkából született nemzetközileg referált folyóiratcikkek száma:	41
A megjelent folyóiratcikkek össz impakt faktora:	83.334
A pályázat munkájából megjelent cikkekre eddig kapott független hivatkozások száma:	101

A közleményeket itt nem soroljuk fel, ezek felvezetésre kerültek az OTKA elektronikus rendszerébe.

* * *

A kutatási téma új irányokkal kibővített folytatására lehetőséget kaptunk a 2009 év során indult K77653 pályázat keretében.

Végül köszönjük az OTKA támogatását!

Donkó Zoltán
projektvezető