

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.<sup>1</sup> 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.<sup>2</sup> 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

<sup>1</sup> F. Sigenege, 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).

<sup>2</sup> 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.<sup>3</sup> 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.<sup>4</sup> 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 Egyetemen* és az *Antwerpeni Egyetemen* 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).<sup>5</sup> 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 területén<sup>6</sup> 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.<sup>7</sup> 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/H<sub>2</sub>, valamint He/Xe/D<sub>2</sub> gázokban, az aktív kisülés utáni, "utókisülés" időszakában,<sup>8</sup> illetve (ii) a Föld légkörében fellépő elektromos kisüléseknek megfelelő paraméterek (nyomás, gázösszetétel, elektromos térerősség) mellett.<sup>9</sup> Ez utóbbi munkához (egy MTA-CSIC, Spanyolország együttműködésben) felépítettünk egy hatáskeresztmetszet adatbázist az elektronok és a levegő összetevői közötti ütközési folyamatokra.

<sup>3</sup> K. Kutasi, P. Hartmann, G. Bano, Z. Donkó: "He<sub>2</sub><sup>+</sup> molecular ions in helium glow discharges: the effect of bulk electron temperature", *Plasma Sources Sci. Technol.* 14, S1-S8 (2005)

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

<sup>5</sup> 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)

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

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

<sup>8</sup> 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/H<sub>2</sub> and He/Xe/D<sub>2</sub> low temperature afterglow plasma", *Eur. Phys. J. D* 54, 391-398 (2009).

<sup>9</sup> 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.<sup>10</sup> 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.<sup>11</sup>

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.<sup>12, 13</sup> 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 kisülésekben<sup>14</sup>, az elektromos tér időbeli és térbeli fejlődésének jelenségeit,<sup>15</sup> valamint az ezekben fellépő nemlineáris, öngerjesztett rezgéseket.<sup>16</sup> Vizsgáltuk továbbá annak hatását, ha eltérő feszültségű generátorokat alkalmazunk az „Elektromos aszimmetria effektus” előállítására.<sup>17</sup> 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 sokrészeske-rendszerek leírásával foglalkoztunk.

<sup>10</sup> 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).

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

<sup>12</sup> 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)

<sup>13</sup> 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)

<sup>14</sup> 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. 18, 034011 (2009).

<sup>15</sup> 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).

<sup>16</sup> 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).

<sup>17</sup> 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*.<sup>18</sup> A statikus (párkorrelációs függvények, struktúrafüggvények) és termodinamikai (korrelációs energia, nyomás) jellemzők mellett kiszámítottuk a rendszer dielektromos függvényét és meghatároztuk a folyadék-szilárd fázisdiagramot.<sup>19</sup> 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.<sup>20</sup>

Kétdimenziós kristályos és folyadékállapotú Yukawa rendszerek hullámdiszperziós tulajdonságait (a longitudinális és transzverzális kollektív gerjesztések spektrumait és diszperziós relációit) vizsgáltuk rácsösszegzéssel, molekuladinamikai szimulációval és az ú.n. QLCA (quasilocalized charge approximation<sup>21</sup>) elmélet alkalmazásával.<sup>22</sup> A három független módszer összehasonlításával azok megbízhatóságát is vizsgáltuk.<sup>23</sup> Ugyancsak kétdimenziós esetben tanulmányoztuk a kristályos rendszerbe érkező nyaláb (gyors részecskék) hatását, Mach kúpok megjelenését és a nyalábrészecskék lefékeződésének részleteit tártuk fel.<sup>24</sup>

Meghatároztuk *bipoláris (elektron-lyuk) kettősrétegek* fázisdiagramját, ebben azonosítottuk a Coulomb és dipól, illetve a folyadék és szilárd fázisokat.<sup>25</sup> 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.<sup>26</sup> 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.<sup>27</sup>

A bipoláris kettősrétegekkel hasonlóságot mutató dipólrendszerek esetében megállapítottuk, hogy a hullámdiszperzió akusztikus jellegű.<sup>28,29</sup> Erősen csatolt rendszerekben a termikusan gerjesztett

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

<sup>19</sup> 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).

<sup>20</sup> 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).

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

<sup>22</sup> 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).

<sup>23</sup> 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).

<sup>24</sup> 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).

<sup>25</sup> 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).

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

<sup>27</sup> 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).

<sup>28</sup> 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).

<sup>29</sup> 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.<sup>30</sup>

Poros-plazma kísérletekben az utóbbi időben lehetőség nyílt állandó mágnesezettségű porszemcsék használatára. Ezen rendszerek járulékos mágnese 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 mágnese kölcsönhatások függvényében), valamint a rotációs kollektív módusok hullámdiszperziós tulajdonságait. Elsőrendű átalakulást mutattunk ki az alapállapotú ferromágneses és anti-ferromágneses fázisok között a rácsparaméterek függvényében.<sup>31</sup>

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.<sup>32</sup> 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.<sup>33</sup>

A nyíró viszkozitás tanulmányozásánál megfigyeltük a rendszerek nem-Newtoni viselkedését, ami nagy nyíró feszültségek mellett a viszkozitás csökkenésében nyilvánult meg.<sup>34,35</sup> 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.<sup>36</sup>

#### 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).

<sup>30</sup> 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).

<sup>31</sup> 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).

<sup>32</sup> 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).

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

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

<sup>35</sup> 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).

<sup>36</sup> 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