

Poros plazma: a klasszikus sokrészecske-fizika laboratóriuma

Témavezető: Hartmann Péter
MTA Wigner FK, SZFI

Bevezető

Jelen pályázat tárgya a klasszikus sokrészecske rendszerekben megfigyelhető kollektív, tipikusan erősen korrelált jelenségek részecske szintű vizsgálata volt poros plazma kísérletekkel, numerikus szimulációval és elméleti módszerekkel. Olyan kérdésekre kerestük a választ, mint: Egyensúlyi fázis-e a 2D olvadás KTHNY elmélete által jóslott hexatikus fázis? Milyen mikroszkopikus vagy korrelációs jelenségek felelősek az anyagok erősen nemlineáris reológiájáért? Milyen szerkezet és effektív kölcsönhatás jellemzi a lassan, plasztikusan deformált kristályos anyagokban keltett diszlokációk sokaságát? Milyen a kétkomponensű rendszerek fázisdiagramja és hullámmódus szerkezete? Stb.

Saját és a külföldi partnerünk (CASPER, Baylor University, Waco, Texas) egymást nagyban kiegészítő kísérleti és szimulációs erőforrásait összehangolva, intenzív együttműködés keretében végeztük a kutatásainkat, amelynek része volt Kovács Anikó Zsuzsa PhD hallgatónk egy szemeszterre történő kiküldetése. A hazai kísérleteket az általam tervezett "poros plazma" berendezésen végeztük, míg a szimulációkat a csoportunk által üzemeltetett kb. 160 processzoros linux klaszteren futtattuk, saját fejlesztésű szimulációs programok segítségével.

Az erősen csatolt poros plazmák kísérleti kutatása 1994-ben kezdődött, amikor az első plazmakristályok megvalósításáról számolt be három kutatócsoport egymástól függetlenül, közel egyidejűleg¹. Hamar kiderült, hogy a gázkiszűrésbe szórt, elektromosan töltött, mikrométeres szilárd szemcsékből álló rendszer kitűnően alkalmas szilárd és folyadék fázisú hagyományos (atomos) anyagok modellezésére. A két rendszerben lejátszódó kollektív jelenségek kvalitatíven azonosak, csak hogy a poros plazmákra jellemző távolság és időskálák a több ezer alkotó szemcse teljes kinetikus megfigyelését lehetővé teszik, amely atomok esetén jelenleg elképzelhetetlen. Laboratóriumi körülmények között síkbeli és kis térbeli struktúrák kelthetők, míg mikrogravitációs körülmények között homogén térbeli porfelhők hozhatók létre. Ennek felismerése vezetett oda, hogy először parabolikus repülésekre, majd az ISS nemzetközi űrállomásra telepítettek poros plazma kísérleteket². A kísérletek mindegyike digitális videomikroszkópián és PTV (particle tracking velocimetry) módszeren alapulnak, vagyis nagy mennyiségű képi információt termelnek, amely képek feldolgozása során kell az egyes részecskéket beazonosítani, azok trajektóriáját meghatározni.

A poros plazma kísérletekhez kapcsolódó numerikus szimulációk általában molekuladinamikai vagy Monte Carlo típusú algoritmusokon alapulnak. Közös bennük, hogy a részecskék közötti

¹ Thomas H., Morfill G., Demmel V., Goree J. (1994) "Plasma crystal: Coulomb crystallization in a dusty plasma." *Phys. Rev. Lett.*, 73, 652.

Chu J.H., I Lin (1994) "Direct observation of Coulomb crystals and liquids in strongly coupled rf dusty plasmas" *Phys. Rev. Lett.* 72, 4009.

Melzer, A., Trottenberg, T., & Piel, A. (1994) "Experimental determination of the charge on dust particles forming Coulomb lattices." *Physics Letters-Section A*, 191, 301.

² Fortov V., Morfill G (Eds), "Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space" CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010

kölcsönhatást első közelítésben árnyékolt Coulomb (Debye-Hückel, vagy Yukawa) potenciállal veszik figyelembe:

$$V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^{-r/\lambda}}{r}$$

(ahol Q a részecskék töltése, λ a Debye árnyékolási hossz, r pedig a porszemcsétől mért távolság). Síkbeli rendszereknél ezen közelítés rendkívül sikeres, kitűnő kvantitatív összhangban van a kísérletekkel. Térbeli struktúrák esetén viszont figyelembe kell venni az eddig háttérnek tekintett gázkisülés töltött-részecske áramait, és azok anizotrop kölcsönhatását a porszemcsékkel. Jelen pályázat keretében, ezen nehézségeket elkerülendő, kizárólag síkbeli rendszereken végeztünk kísérleteket, ahol az említett áramok a porrétegre merőlegesek, így nem befolyásolják a kölcsönhatás izotrópiáját.

A kísérletek és a numerikus szimulációk során az adatgyűjtést követő (esetleg azzal párhuzamos) adatkiértékelés alapvető feladata, hogy a 10^3 - 10^6 részecske mikroszkopikus trajektóriájának ismeretében a rendszert jellemző makroszkopikus mennyiségeket határozzanak meg. Ehhez az alapokat a statisztikus fizika és annak kinetikus elméletei, valamint a hidrodinamika szolgáltatják.

Kutatási eredmények

A pályázat munkája az eredeti terveknek megfelelő fő célok irányába folyt, de a számos, időközben felmerült érdekes tudományos kérdés és probléma, illetve a kialakult új nemzetközi kapcsolatok számos nem várt eredmény eléréséhez segítettek hozzá, illetve vezettek az egyes részfeladatok prioritásának átgondolásához. Az alábbiakban az elért eredményeket foglalom össze.

Poros plazma kísérletekkel:

- Teljes egészében újfajta megoldást dolgoztunk ki a térbeli poros plazma kísérletekben használt háromdimenziós részecskedetektálásra. Hagyományos, sztereoszkopiai elven működő módszerek hátránya, hogy a szükséges két, vagy inkább három kamerás rendszerek drágák és nagy a helyigényük, valamint problémát okoz a korlátozott mélységélesség és a perspektíva hatása. Ezen hátrányokat fordítja előnyére az ú.n. fénymező (vagy plenoptikus) elvű fotográfia, melynek elméletét Gabriel Lippmann már száz éve lefektette, gyakorlati alkalmazása azonban csak napjainkban, a digitális képfeldolgozás korában vált lehetségessé. Jelen pályázat támogatásával beszereztünk egy első generációs Lytro kamerát, Európában elsőként. Kidolgoztuk az új detektálási módszerünk mérés technikáját és demonstráltuk a hatékonyságát saját poros plazma rendszerünkön.³
- A poros plazma kísérletek módszertani fejlesztésének másik iránya azt célozza, hogy a rendkívüli, k.b. 100 MB/sec képi adatfolyam tárolása és utólagos feldolgozása helyett a részecskedetektálás menet közben történhessen. Ehhez igen jelentős számítási kapacitásra van szükség az adatok nagy mennyisége (és nem a műveletek bonyolultsága) miatt. GPU-ra, vagyis grafikus processzorra fejlesztettünk programot, amely képes a kamerából érkező

³ Hartmann P, Donkó I, Donkó Z; "Single exposure three-dimensional imaging of dusty plasma clusters"; *Rev. Sci. Instrum.*, 84 (2013) 023501

képeket valós időben feldolgozni, a képfeldolgozási algoritmus paramétereit adaptívan szabályozni és a képek helyett az azokon talált részecskék pozícióját eltárolni.⁴

- Jelenleg több elméleti és kísérleti kutatás is irányul a mágneses térbe helyezett, azaz magnetizált, erősen csatolt poros plazmákra. A valódi mágneseket alkalmazó kísérletek két alapvető, elvi problémával állnak szemben: egyrészt a porszemcsék kicsiny töltés/tömeg aránya miatt rendkívül nagy mágneses térre (100-1000 Tesla) lenne szükség, másrészt, a háttérrel szolgáltató elektromos gázkisülés már jóval kisebb mágneses tereknél drasztikusan átalakul (örvénylik, filamentálódik, stb.) amely erősen hat a porfelhő struktúrájára. Ezen problémák megkerülésére dolgoztunk ki és használtunk fel egy új kísérleti eljárást, amelyhez drága elektromágnesek helyett egyszerűen forgást kényszerítettünk a rendszerre. Ez esetben, az együtt-forgó megfigyelő a Coriolis erő hatását figyelheti meg, amely a részecskék mozgásegyenletében a mágneses Lorentz erővel teljesen ekvivalens tagként jelenik meg. A forgás sebessége (néhány fordulat másodpercenként) elég gyors ahhoz, hogy több ezer Tesla mágneses tér hatását eredményezze, miközben elég lassú ahhoz, hogy az elektromos gázkisülési háttérplazma homogenitását ne változtassa meg. A saját tervezésű és építésű egyedi képforgató optikai leképező rendszer és az átalakított kisülési kamránk segítségével megmértük a 3000 Tesla ekvivalens mágneses indukció esetén a rendszerben keltett longitudinális hullámdiszperziós relációt, amely numerikus jóslatokkal jól egyezve magnetoplazmon karakterű, vagyis nulla hullámszám esetén a frekvenciája megegyezik a porszemcsék ciklotron-frekvenciájával.⁵
- Kétdimenziós plazmakristályban lézeres manipulációval megvalósítottunk homogén, nagy kiterjedésű nyírási erőteret. Az ennek hatására fellépő lassú nyírási deformáció megegyezik az anyagtudományban ismert "kúszás" jelenségével, amely szilárd anyagok lassú plasztikus deformációja. Kísérleteinkben megfigyeltük a deformáció mikroszkopikus mechanizmusát, amely során keletkeztek ellentétes Burgers-vektorú diszlokációpárok, a diszlokációk csúszó mozgást végeznek majd doménfalakon annihilálódnak.⁶
- A poros plazmák egyik ígéretes jövőbeli alkalmazása a nanoszemcsék reaktív plazmában való növesztése. Kimutatták, hogy az 1-100 nm mérettartományban monodiszperz méreteloszlással növeszthetők a szemcsék. Ezen eljárás előnye a folyadékban való szintetizáláshoz képest, hogy a szemcsék térben teljesen diszpergálva léteznek ameddig a kisülés üzemel. Az alkalmazások szempontjából kulcsfontosságú lépés lenne a létrehozott porszemcsék kontrollált transzportja a kisülési plazmán keresztül a felhasználásuk helyéig. Ehhez kapcsolódóan megmutattuk, hogy kettős rádiófrekvenciával gerjesztett plazmában a porfelhő vertikális pozíciója szabályozható a felharmonikus gerjesztő szinuszos feszültségek relatív fázisszögének hangolásával.⁷

⁴ Nagy Bakró András, "Poros plazma kísérletek támogatása multiprocesszoros környezetben", MSc diplomamunka, BMGE, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, 2014

⁵ Hartmann P, Donkó Z, Ott T, Kählert H, Bonitz M; "Magnetoplasmons in Rotating Dusty Plasmas", *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 155002

⁶ Hartmann P, Kovács A Zs, Douglass A M, Reyes J C, Matthews L S, Hyde T W; "Slow Plastic Creep of 2D Dusty Plasma Solids"; *Phys. Rev. Lett.* 113 (2014) 025002

⁷ Iwashita S, Schüngel E, Schulze J, Hartmann P, Donkó Z, Uchida G, Koga K, Shiratani M, Czarnetzki U; "Transport control of dust particles via the electrical asymmetry effect: experiment, simulation and modelling", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46 (2013) 245202;

Iwashita S, Schüngel E, Schulze J, Hartmann P, Donkó Z, Uchida G, Koga K, Shiratani M, Czarnetzki U; "Dust hour glass in a capacitive RF discharge"; *IEEE Trans. Plasma Science* 42 (2014) 2672

- Szintén a kisülésben lebegő porszemcsék irányított mozgását célzó fejlesztési irány az egy-rádiófrekvenciás (RF) kisülések gyors váltóáramú elektromos táplálásához hozzáadott egyenfeszültség (DC) változtatásán alapul. Ezen területen kísérleteket és plazma-por kölcsönhatást is tartalmazó részecskeszintű gázkisülés-szimulációkat valósítottunk meg. Megmutattuk, hogy az RF+DC kisülések DC szintjének változtatásával a porszemcsék egyensúlyi lebegési magassága széles tartományban hangolható.⁸
- Porszemcsék elektromos gázkisülésekben nem csak erősen csatolt rendszerek megvalósítására alkalmasak, ezen túlmenően a gázkisülés diagnosztizálására is használhatók. Forgóelektrodás kísérletekkel meghatároztuk a hengerszimmetrikus RF gázkisülésben lévő elektromos tér vízszintes komponensét. Méréseinket hitelesítettük saját kétdimenziós PIC (particle-in-cell) kisülés-szimulációkkal és megmutattuk, hogy az általunk kidolgozott kísérleti módszer jóval érzékenyebb és pontosabb minden korábbi módszernél.⁹

Numerikus szimulációkkal:

- Folyadékok (és gázok) jellemző tulajdonsága, hogy nem képesek effektíven ellenállni a mechanikai nyírásnak. Ez alól kivételt képezhetnek az erősen csatolt folyadékok rövid (a tipikus részecsketávolsághoz képest) távolságokon. Ilyen rendszerekben megfigyelhető a transzverzális hullámok diszperziós relációjában egy véges hullámszámú levágás, amely alatt nem figyelhető meg csúcs az áramfluktuációs spektrumban. Munkánk során, numerikus szimulációk segítségével, feltártuk az összefüggéseket, amelyek összekapcsolják az említett küszöbhullámszámot a rendszer transzverzális sebesség-autokorrelációjában fellépő antikorrelációval és a rendszerre jellemző frekvenciafüggő komplex viszkozitással. A komplex viszkozitás rugalmas és disszipatív tartományai közötti átmenetet a Maxwell relaxációs idő jó közelítéssel jellemzi.¹⁰
- Poros plazmák elméleti modellezésében a legelterjedtebb közelítés a párkölcsönhatás leírására a Yukawa (Debye-Hückel, vagy árnyékolt Coulomb) párpotenciál. Vannak azonban, a por-plazma kölcsönhatás részleteit figyelembe vevő megfontolások, amelyek ehhez egy, rövid távolságokon hatásos vonzó jellegű korrekciót javasolnak. Szimulációk és analitikai modellek segítségével meghatároztuk, hogy az irodalomban javasolt módosított párpotenciál milyen szerkezeti és dinamikus következményekkel jár. Feltérképeztük a rendszer stabilitásának tartományát a Debye-árnyékolás függvényében.¹¹
- Elméleti modellek és numerikus szimulációk segítségével feltérképeztük a két, különböző tömegű és töltésű komponensből álló Yukawa sokrészecske rendszerekben fellépő kollektív hullámok diszperziós relációit, folyadék és kristályos fázisokban. Meghatároztuk a kristályokban megfigyelhető, a kristályszerkezet által meghatározott számú akusztikus és optikai hullámmódusok tömeg-, és töltésaránytól való függését. Kvázilokalizált töltés közelítés (QLCA - quasilocalized charge approximation) elmélet folyadékfázisra érvényes jóslatait

⁸ Bastykova N Kh, Kovács A Zs, Korolov I, Kodanova S K, Ramazanov T S, Hartmann P, Donkó Z; "Controlled Levitation of Dust Particles in RF+DC Discharges"; *Contrib. Plasma Phys.* 55 (2015) 671-676

⁹ Hartmann P, Kovács A Zs, Reyes J C, Matthews L S, Hyde T W; "Dust as probe for horizontal field distribution in low pressure gas discharges"; *Plasma Sources Sci. Technol.* 23 (2014) 045008

¹⁰ Goree J, Donkó Z, Hartmann P; "Cutoff wave number for shear waves and Maxwell relaxation time in Yukawa liquids"; *Phys. Rev. E*, 85 (2012) 066401

¹¹ Donkó Z, Hartmann P, Shukla P K; "Consequences of an attractive force on collective modes and dust structures in a strongly coupled dusty plasma"; *Phys. Lett. A* 376 (2012) 3199

összehasonlítottuk molekuladinamikai szimulációinkkal. Megmutattuk, miként alakul át a kristályban megfigyelt nagyszámú hullámmódus a folyadékra jellemző négy módussá. Feltérképeztük a hangsebesség és az optikai módusokra jellemző gap-frekvenciák töltés-, és tömegarány függését. Fano típusú rezonanciát azonosítottunk ezen rendszerek sűrűség-, és áramfluktuációs spektrumaiban.¹²

- Poros plazma kísérletekben az egy helyben lebegő töltött porszemcse kölcsönhat a körülötte áramló töltött atomi plazma komponensekkel (elektronokkal és ionokkal). Ezen kölcsönhatás instabilitásokat gerjeszthet, amelyek hatására a porszemcse nagy amplitúdójú rezgésbe kezdhet az egyensúlyi pozíciója körül. Kvázilokalizát töltés közelítésben (QLCA) és molekuladinamikai szimuláció segítségével meghatároztunk, hogy milyen mértékben módosítja az instabilitások megjelenését az, hogyha a porszemcse része egy erősen csatolt sokrészecske rendszernek. Azt találtuk, hogy az erős csatolás leginkább a hullámdiszperziós reláció negatív meredekségű tartományához tartozó hullámhosszok esetén eredményez nagyobb instabilitásokat.¹³
- Amennyiben a porszemcsék szuper-paramágneses anyagból készülnek, egy gyenge külső mágneses tér hatására jelentős saját mágneses dipólus momentumot keltenek. Ezen párhuzamos dipólusok jelentős anizotrópiát hozhatnak be az egyébként izotrop Yukawa pár-kölcsönhatással leírható rendszerbe. Ilyen kétdimenziós Yukawa + dipólus rendszerek áramfluktuációs spektrumait és diszperziós relációit határoztuk meg molekuladinamikai numerikus, és kvázilokalizát töltés közelítés (QLCA) elméleti módszerekkel a részecskesíkra merőleges és döntött mágnesezettség esetén. Kimutattuk az anizotrópia hatását és a hullámmódusok keveredését.¹⁴
- Yukawa rendszerek numerikus (mikrokanonikus és NPT molekuladinamikai) szimulációja segítségével kimutattuk, hogy a korábbi numerikus eredmények sokasága által jósolt Kosterlitz-Thouless-Halperin-Nelson-Young (KTHNY) mechanizmus valójában csak akkor figyelhető meg, hogyha a fázisátalakulás nem egyensúlyi, vagyis a hexatikus fázis metastabil. Azt találtuk, hogy a korábbi számítások során a pontosabb eredmények reményében megnövelt rendszer méret mellett a legtöbb szerző nem fordított kellő gondot a relaxációs idő növelésére, vagyis a vizsgált rendszerek a szimulációk kezdeti konfigurációjából nem biztos, hogy eljutottak a valódi termikus egyensúlyba.¹⁵
- Különböző nemegyensúlyi molekuladinamikai szimulációs módszereket fejlesztettünk ki és alkalmaztunk kétdimenziós szilárd és folyadék Yukawa rendszerek periodikus nyírásra adott mikroszkopikus válaszána meghatározására. Megmutattuk, hogy a gerjesztésből betáplált energia egy része átmenetileg rugalmasan tárolódik, míg másik része disszipálódik. Ezek

¹² Kalman G J, Hartmann P, Donkó Z, Golden K I, Kyrkos S; "Collective modes in two-dimensional binary Yukawa systems", *Phys. Rev. E*, 87 (2013) 043103;

Kalman G J, Donkó Z, Hartmann P, Golden K I; "Second plasmon and collective modes in binary Coulomb systems"; *Europhysics Letters* 107 (2014) 35001;

Silvestri L, Kalman GJ, Donkó Z, Hartmann P, Kählert H: Fano-like anti-resonances in strongly coupled binary Coulomb systems, *Europhysics Letters* 109 (2015) 15003

¹³ Rosenberg M, Kalman G J, Hartmann P, Goree J; "Effect of strong coupling on the dust acoustic instability"; *Phys. Rev. E*, 89 (2014) 013103

¹⁴ Hartmann P, Donkó Z, Rosenberg M, Kalman G J; "Waves in two-dimensional superparamagnetic dusty plasma liquids"; *Phys. Rev. E*, 89 (2014) 043102

¹⁵ Derzsi A, Kovács A, Donkó Z, Hartmann P; "On the metastability of the hexatic phase during the melting of two-dimensional charged particle solids"; *Physics of Plasmas* 21 (2014), 023706

aránya a gerjesztés frekvenciájának függvényében pozitív és negatív rezonanciákat mutat. A rendszer áramfluktuációs spektrumában felharmonikusok jelennek meg páratlan kiválasztási szabályt követve.¹⁶

- Miután kísérletekkel és PIC szimulációval vizsgáltuk a rádiófrekvenciás gázkisülésekben lebegő porszemcsék egyensúlyi helyzetét és annak célzott hangolásának lehetőségét a kisülésre kényszerített DC egyenfeszültséggel, PIC szimuláció segítségével feltártuk a több rádiófrekvencia alkalmazásával gondosan megtervezett hullámformával táplált kisülések karakterisztikáit. Megmutattuk, hogy a tápfeszültség hullámformájának függvényében az elektromos aszimmetria effektuson keresztül kialakuló önbeálló DC feszültség szint hasonló hatással bír mint a kívülről rákényszerített feszültség, továbbá az elektródára érkező ionok energiaeoszlása is jól hangolható.¹⁷

A kutatási eredmények visszhangja, publikációk

A pályázat keretében végzett munkából született publikációk száma:	20
Nemzetközileg referált folyóiratcikkek száma: (ebből 2 db Phys. Rev. Letters)	17
Megjelent folyóiratcikkek össz impakt faktora:	47.9
A megjelent cikkekre eddig ismert független hivatkozások száma:	42
Szóbeli előadások nemzetközi konferenciákon	6
PhD értekezés	1
MSc diplomamunka	1

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

Nemzetközi kapcsolatok

Az elméleti kutatásokban továbbra is nagy segítséget nyújtanak prof. Kalman Gabor (Boston College) és prof. Kenneth Golden (Univ. Vermont) amerikai kollégák, akikkel évtizedes múltú szoros szakmai együttműködésünk van.

Prof. Marlene Rosenberg (Univ. California, San Diego) szintén elméleti szakember, akivel közösen poros plazma rendszerekben fellépő instabilitások tulajdonságait és a szuper-paramágneses poros plazma dinamikáját vizsgáltuk. Mindkét fél szándéka szerint az együttműködést erősíteni szeretnénk.

¹⁶ Kovács A, Hartmann P, Donkó Z; "Periodically sheared 2D Yukawa systems"; *Physics of Plasmas* 22 (2015) 103705

¹⁷ Schüngel E, Donkó Z, Hartmann P, Derzsi A, Korolov I, Schulze J; "Customized ion fux-energy distribution functions in capacitively coupled plasmas by voltage waveform tailoring"; *Plasma Sources Sci. Technol.* 24 (2015) 045013

Prof. Michael Bonitz (Christian Albrechts Universität zu Kiel) és csoportja elméleti ötletekkel és szimulációs háttérrel járulnak hozzá közös munkánkhoz. Velük az erős külső mágneses tér hullámmódusokra kifejtett hatását tanulmányoztuk. Szakmai kapcsolatunk folyamatos.

Prof. John Goree (University of Iowa) egyike a tudományterület úttörőinek, mind kísérleti, és szimulációs területeken aktív. Együttműködésünk keretében kezdtük a viszkozitás és egyéb transzport jelenségek szimulációs tanulmányozását.

Dr. Julian Schulze (West Virginia University) egy fiatal kutatócsoportot irányít, amely rádiófrekvenciás gázkisülések kísérleti tanulmányozására szakosodott és így értékes együttműködő partnerünk. Együttműködésünk keretében összevetjük méréseiket az általunk számolt numerikus eredményeinkkel.

Prof. Truell W. Hyde (Center for Astrophysics, Space Physics, and Engineering Research, Baylor University, Waco, Texas) kísérleti erőforrásait bocsájtotta a rendelkezésemre. Ezen együttműködés keretében vizsgáltuk a lassú nyírési deformáció mikroszkopikus részleteit és fejlesztettük ki a forgóelektródás plazmadiagnosztikai módszerünket. Ezen együttműködés az egyik pillére a jelen projektnek.

Személyi változások

A jelen pályázat NN jellegéből következően két (egy hazai és egy külföldi) kutatócsoport közös munkája köré szerveződött. Az elmúlt 3 és fél év alatt mindkét csoportban a senior kutatók személye változatlan maradt, de a diákok / posztdoktorok személyi összetételében volt változás. Nálunk Derzsi Aranka az utolsó 18 hónapban gyermeknevelési szabadságon volt, valamint Nagy Bakró István a BMGE Villamosmérnöki és Informatikai Kar MSc hallgatója csatlakozott csoportunkhoz és a jelen pályázat témához kapcsolódóan elkészítette és "Poros plazma kísérletek támogatása multiprocesszoros környezetben" címmel megvédte diplomamunkáját. Kovács Anikó Zsuzsa, a PTE doktorandusza és egyben jelen pályázat kulcsfontosságú kutatója, doktori szigorlatát sikeresen letette, "Erősen csatolt sokrészecske rendszerek kollektív dinamikája" c. PhD disszertációjának védését szervezi.

A kutatási téma lehetséges további irányai

Az itt ismertetett kutatási területeken munkám szerencsére tovább folytatódhat a K-115805 sz. „Komplex plazmák akcióban” című, 2015 és 2019 között futó NKFIH pályázat keretében. Az új pályázat tematikája három csoportba sorolható: erősen csatolt sokrészecske rendszerek, por-plazma kölcsönhatás, és nanorészecske szintézis gázkisülésekben.

Az elért eredmények hasznosításának lehetőségei

Az erősen csatolt plazmák tanulmányozása során alapvető, esetenként évszázados (pl. áramlások, deformációk, fázisátalakulások. stb.) tudományos kérdések megválaszolásához járultunk hozzá. Új kísérleti módszereket dolgoztunk ki, amelyek tudásunk szerint legalább egy japán és egy német csoport elkezdett alkalmazni.

* * *

Végül megköszönöm az OTKA támogatását, amelynek köszönhetően az ismertett munkát elvégezhettük és az eredményeket elérhettük.



Hartmann Péter
(témavezető)

Budapest, 2015. december 21.