

IIII Complex Plasmas Experiments in Microgravity and Related Researches IIIII
(解説)

PK-3 Plus 微小重力実験への参加と将来計画

足立 聡^{1,2}・東辻 浩夫³・高橋 和生⁴

International Collaboration on Microgravity Experiments using PK-3 Plus Apparatus and Future Plans

Satoshi ADACHI^{1,2}, Hiroo TOTSUJI³ and Kazuo TAKAHASHI⁴

Abstract

International collaboration on complex plasmas was established in 2007. Since then, the Japanese science team joined microgravity experiments using PK-3 Plus on the International Space Station (ISS). Our main objective is to investigate the critical phenomena of charged systems. Operational conditions, based on the original theory and ground-based experiments, were proposed to the international science team. As a result, we successfully obtained opportunities of microgravity experiments. The operation on the ISS was terminated in 2013. The Japanese team continued analyzing the data to summarize the microgravity experiments by the end of March, 2014. A new apparatus PK-4 has already installed on the ISS and the operation begins. We are now seeking new objectives suitable for PK-4.

Keyword(s): Complex Plasmas, PK-3 Plus, Microgravity Experiments, ISS, PK-4

Received 1 June 2015, accepted 18 June 2015, published 31 July 2015

1. はじめに

ダストプラズマとは、イオン、電子、微粒子からなる、全体として電氣的に中性なプラズマのことである。微粒子は通常負に帯電し、かつその大きさを素電荷の数千倍から数万倍にすることができる。その結果、微粒子間のクーロン相互作用が非常に強くなる。クーロン相互作用が十分に強くなれば、微粒子が結晶構造と同様な規則的構造を形成し得ることが 1986 年 Ikezi によって予測された¹⁾。この規則的構造は、今日ではクーロン結晶またはプラズマ結晶と呼ばれ、1994 年に実験的な観測に初めて成功した²⁻⁵⁾。

しかしクーロン結晶は、地上ではプラズマ生成用の電極周囲に形成される遮蔽領域（シース領域）の電場を利用して浮遊している。このことは即ち、厳密には電氣的中性では無いことを意味すると同時に、遮蔽領域の電場で加速されるイオン流にクーロン結晶が曝されることを意味する。

このイオン流の影響により、地上ではクーロン結晶構造が大きく歪んでしまい、理論的には予測されない単純六方構造がしばしば観察される。そのため、地上では状態図⁶⁾の検証さえも困難である。

こういった理由から、かなり早い時期からダストプラズマの微小重力実験がドイツとロシアにより計画、実施されてきた。国際宇宙ステーション (ISS) 上での本格的なダストプラズマ微小重力実験は、2001 年 3 月 ~ 2005 年 7 月まで運用された。PKE-Nefedov⁷⁻⁹⁾を使用した実験である。PKE-Nefedov あるいはその後続く PK-3 Plus, PK-4 における実験の目的は単一では無いことが日本の実験とは大きく異なる。日本では、一人の代表研究者 (PI) = 実験提案者のための実験供試体を開発するのに対し、ヨーロッパでは、一つの装置に対して数十名の研究者が参加し、多様な実験を実施する。総合的に見て、ダストプラズマの物理的理解

1 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan.

2 総合研究大学院大学物理科学研究科 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

Department of Space and Astronautical Science, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan.

3 岡山大学 〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1

Okayama University, 3-1-1 Tsushimanaka, Kitaku, Okayama 700-8530, Japan.

4 京都工芸繊維大学電気電子工学系 〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎

Faculty of Electrical Engineering and Electronics, Kyoto Institute of Technology, Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan.

(E-mail: adachi.satoshi@jaxa.jp)

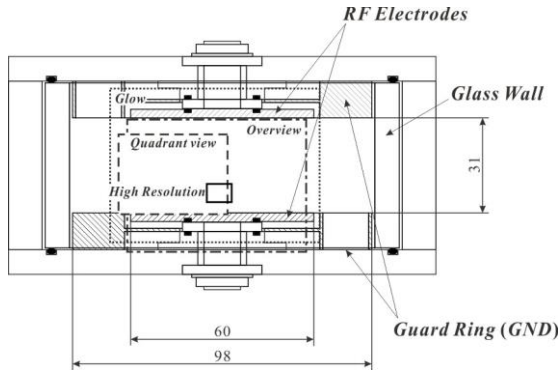


Fig. 1 Schematic View of PK-3 Plus Plasma Chamber.

が進むことが目的であるので、参加者全員の一致した実験目標といったものはあまり存在しない。しかし PKE-Nefedov は、初めての本格的なダストプラズマ実験装置であることから、微小重力下でのクーロン結晶形成が主要な実験の一つであったことは確かである。ここで、クーロン結晶形成実験に対して大きな障害となったのが、粒子が存在しない領域（ポイド領域）の形成であった。ポイドについては、PKE-Nefedov 以前から報告されていたが^{10,11}、PKE-Nefedov ではポイド対策が結果として十分では無かったと言える。

PKE-Nefedov は多大な研究成果を上げたものの、最後までポイドに苦しめられた。研究対象によっては、ポイド領域の形成が本質的に悪影響を及ぼすとは言えないが、クーロン結晶に関しては、ポイドおよび渦の形成が障害となった。このため、PKE-Nefedov では軌道上運用の早い段階から、ポイドをどうすれば小さくできるかを精力的に調べた。その結果、ポテンシャル分布に起因する装置中心から外側に向かうイオン流の影響（Ion Drag Force）であるとの仮説が立てられた¹²。この仮説に基づき PKE-Nefedov を改良した装置が PK-3 Plus¹³⁻¹⁶ である。PK-3 Plus は、2006 年 1 月から 2013 年 6 月まで ISS 上で運用された。我々は、荷電粒子系における臨界点（等温圧縮率の発散）の観察を目指して、PK-3 Plus の国際研究チームに参加した。等温圧縮率の発散モデルは、日本研究チームの代表研究者であり、原著の共著者である東辻浩夫氏によって 1974 年に構築された¹⁷。このモデルを発展させ、ダストプラズマにおける臨界現象観察に適したモデルが 2008 年には概ね完成する¹⁸⁻²⁰。臨界点に関しては、東辻モデル以外に、Shadowing Force に基づく Khrapak モデル²¹が存在した。前者は One Component Plasma (OCP) モデルから導かれる熱力学的不安定性である点がユニークである。国際研究チーム内では、当初これら 2 つのモデルが競い合っていたが、やがて、より仮定の少ない東辻モデルに集約していった。これにより、日本チームが確固たる地位を築くことができたと言える。

PK-3 Plus では、制御可能な運転条件は、粒子径、投入する粒子の総量、RF 電力、ガス圧力、ガス種の 5 種類だけである。これらを組み合わせて、臨界点に少しでも近づけるにはどうしたら良いかを考えるためには、プラズマパラメータ計測が欠かせない。しかし、軌道上の PK-3 Plus にはほとんど計測系が無い。そのため、ラボモデル（地上実験用モデル）を使用して計測を行い、データの補完を行った²²。理論、地上実験、さらには微小重力実験結果のデータ解析を組み合わせ、運転条件の改良を積み重ねていくことができた。

本稿では、昨年度末で終了した PK-3 Plus ミッションにおいて我々が蓄積したノウハウを述べる。また併せて、次期国際協力ミッション PK-4 への参加に対する課題を挙げつつ、JAXA における国際協力ミッション実現の際の留意点を述べる。これらは、他分野にも共通的な要素を多く含むので、将来国際協力ミッションを実現したい研究者の方々にとって有益な情報となる。

2. PK-3 Plus プロジェクト

我々が参加した PK-3 Plus プロジェクトは独露共同のプロジェクトである。PK-3 は、2013 年 6 月の最終運用の後、同年 10 月に最終のサイエンスミーティングが開催され、独露のプロジェクトは終了した。その後も日本ではデータ解析が続行されたが、2015 年 3 月をもって JAXA の PK-3 Plus ミッションチームの活動も終了した。PK-3 Plus のデータ解析は、研究者の自由な発想に基づく研究として今後も継続されるだろう。

Figure 1 に示す PK-3 Plus プラズマチャンバーは、ドイツの Max-Planck Extraterrestrial Physics (MPE) によって開発された。RF 電極の直径は 60 mm で、図の上下に 31 mm の間隔で配置されている。RF 電極の周囲には、外径 98 mm のグランド電位のガードリングが配置されている。側壁は石英ガラス製である。図には示していないが、合計 6 個の粒子散布装置を備えており、それぞれ直径 1.5, 2.5, 3.4, 6.8, 9.2, 14.9 μm の単分散微粒子が仕込まれている。主要な観察・計測装置として、4 種類の異なる視野を有するビデオカメラが搭載されており、それぞれ Glow Camera (視野を点線で示す)、Overview Camera (一点鎖線)、Quadrant View (QV) Camera (破線)、High Resolution (HR) Camera (実線) と呼ばれる。Glow Camera には粒子からの散乱光をカットするフィルタを入れてあり、中性ガスの励起光を観察することができる。

PK-3 Plus の開発完了後、ロシアの現 Joint Institute for High Temperatures (JIHT) に所有権が移管され、ロシアが打上げ、運用を行った。即ち、ロシアのプロジェクト

として実施された。ドイツは開発の見返りとして、全マシンタイムの半分を得た。このように国際協力の場合、お互いに持てる物を持ち寄るのが原則である。日本の研究チームのようにアイデアだけで参加する場合は、次にどのような実験を行うかの決定権は無いのが通常である。

しかし PK-3 Plus の場合は、これはドイツの実験、これはロシアの実験といった区切りはほとんど無く、むしろドイツ、ロシアを中核とし、そこに日本、フランスが加わった国際研究チームとしての実験が積極的に実施された点が日本の研究チームにとって幸運であり、かつ新しい。それぞれの実験においては、その実験の提案者がおり、データ解析やまとめの責任を負う。しかし、提案者、あるいは提案者を中心とするある研究グループの了解さえあれば、国際研究チームのメンバーであれば基本的には誰でもデータにアクセスできる。

このような方式は、これまでの日本の微小重力実験における主流の実施方法である、一人の代表研究者あるいは数人の研究チームのための実験と比べて、いくつかの明確な優位性がある。まず、大勢の研究者のそれぞれが良いと思うアイデアを持ち寄り、その中から優れたアイデアを実施することになるため、その時々における最善の実験が実施できる。次に、大勢が参加するため、多種多様な実験のアイデアが集まる。さらに、研究者間の活発な情報交換、議論が刺激となり、互いに切磋琢磨しながら新たなアイデアが生み出される。その結果、PK-3 Plus では数多くの優れた論文が公表されている。

国際研究チームの正確な人数は把握できていないが、ポストドクを含めると、30名以上と思われる。こういった規模の研究者が、一つの装置を利用するために集い、より良い実験を実施する。即ち、数は力である。実は欧州宇宙機関 (ESA) では、できる限り多くの研究者を国際的に集めることはかなり以前から行われている。ESA の Topical Team (TT) は、研究者を集わせるための仕組みである。そして、どれだけ多くの多国籍の研究者が参加しているかが、プロジェクトとして採択する際の判断指標の一つとなっている。今後は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の宇宙実験においても、ESA と同様に、国際協力、数十名規模の研究チームが重要なキーワードとなる。特に日本においては、少ない予算でより多くの成果が求められるため、むしろ ESA よりもそういった傾向が強くなる可能性もある。同時に、種々のアイデアを支えられるだけの汎用性の高い、繰り返し実験が可能な装置が必須と言える。

では、PK-3 Plus は理想的なダストプラズマ実験装置かという点、残念ながら主として 2 つの点でそうではない。1 点目は、前述のポイド領域が依然として形成される点である。PKE-Nefedov よりも改善されたと思われるが、ハイパワー

時には明確にポイドが形成される。このため、日本が提案した臨界現象観察にとっては、観察領域が小さくなり、その結果長波長領域の振る舞いが不明確となるため、好ましくない。もう 1 点が計測系の不足である。フライト品は寸法、重量の制約があるため、様々な計測系を搭載することは困難であるが、さすがにビデオカメラのみでは厳しい。臨界現象に対しては、軌道上でのプラズマの密度、温度の情報が必要となる。プラズマ生成に関しては、おそらく重力の影響がほとんど無いと期待されるため、我々は前述のとおりラボモデルにプローブを組み込み、計測を行うことでデータを補完した。しかし、粘性流領域での低真空プラズマにおいても、本当に地上と宇宙ではプラズマの状態は変わらないのか、熱対流の影響は無いのか、といった検証は今後必要であろう。

PK-3 Plus プロジェクトの運用体制、研究チームは、日本の宇宙実験に対して大いに示唆に富む。今後、2020 年で終わるか、2024 年まで運用が延長されるかは不明だが、「きぼう」での実験においても、可能な限り多数の研究者が参加し、一つの装置あるいは供試体を利用して多様な実験を実施することが求められよう。政府が求めるコストミナマムかつ成果の最大化を実現するには、それ以外の方法はあまり無いように思える。

なお、ロシアの Multipurpose Laboratory Module (MLM) の完成は 2027 年頃と見込まれていることから、ロシアは仮に単独であっても宇宙ステーションを当面維持すると思われる。従って、PK-3 Plus のようなロシアとの共同ミッション方式であれば、長時間の宇宙実験は今後も実施できる可能性がある。そのためには、国際的な研究コミュニティを形成しつつ、多くの研究者の希望に則した装置を開発できる能力が、これまで以上に研究者に求められる。折しも、政府が求めるコストミナマムかつ成果の最大化達成のために、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) において、宇宙実験実施に至るプロセスの変化が始まっている。

「きぼう」を利用したい場合、新しくなったきぼう利用推進委員会において採択される以外の方法が無いことは従来通りである。変わった点は、Phase A に相当するフェーズビリティスタディを、研究者が獲得した外部研究資金等で行うことになった点である。単純に書くと、CREST 等の場合は国の戦略的施策に沿った課題解決型の研究、科研費の場合は自由な発想に基づくチャレンジングな研究が想定されている。外部資金を獲得しているということは、提案内容の意義が JAXA 以外の組織に認められたことを意味する。第三者に意義を認められることが、「きぼう」利用の成果の最大化とイコールでは無いが、従来よりも観的指標であると、少なくとも役所は考えているようである。

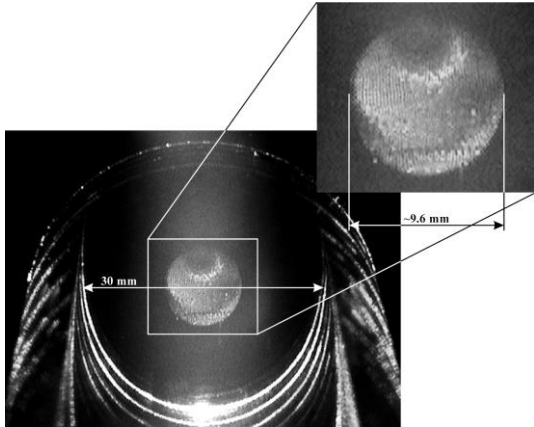


Fig. 2 Void-free Plasma Using PK-4-like Apparatus.

一方「きぼう」利用の公募では、海外装置利用等は以前から守備範囲外であった。そして、利用のための選定プロセスも明確では無かった。今回新たに、宇宙科学研究所 (ISAS) 内に小規模プロジェクトという枠組みが整備されたので、今後は国際協力による海外装置利用を実現しやすくなるのが期待できる。小規模プロジェクトでは、宇宙理学、宇宙工学と横並びで評価され、競争的に選定される。その際に要求されるレベルは、「きぼう」利用公募とは比べ物にならない高い水準である。実質的に Phase A が終わっていないとおそらく勝負にならないであろう。しかし選定されれば、予算の裏付けがなされ、JAXA/ISAS の正式なプロジェクトとして実施できる。

「きぼう」を利用したい場合も、小規模プロジェクトは活用できる。科学的意義が認められた上で予算の裏付けがなされ、実質的に Phase A まで終わった提案が、きぼう利用推進委員会での評価で落とされることは非常に考えにくい。しかし、小規模プロジェクトで勝ち抜くのは簡単では無い。フライト品の概念設計を行った上で、コアコンポーネントを試作し、やりたい実験が確実にできることを示すことが研究者自身に求められる。また、多種多様な文書も JAXA の人間の協力を得つつ、研究者が作成する必要がある。

従来はアイデアレベルの提案が採択されたこともあった。その結果、供試体開発が難航し、時には実験内容を見直す必要が生じることもあった。これは同時に、コスト上昇および開発期間遅延を意味する。「きぼう」利用を目指すにせよ、他国モジュール利用を目指すにせよ、コストミナムで成果の最大化の観点からは望ましい変化であると言える。しかし従来に比べると、実験提案に至るまでの道は険しくなったと言える。その険しさを緩和する方策の一つが、宇宙環境利用科学委員会が公募していたワーキンググループ (WG) /リサーチチーム (RT) である。残念ながら宇宙環境利用科学委員会は昨年度末で解散し、それに伴い、WG/RT 公募も中止

されている。今後、宇宙環境利用科学委員会に類する委員会が立ち上がり、WG/RT 公募が再開されることを願うが、本稿執筆時点では、確定的なことをお伝えできる状況に無い。

3. PK-4 プロジェクト

PK-3 Plus の後継装置である PK-4 の運用が、今年 4 月から始まっている。こちらも PK-3 Plus 同様、国際研究チームが構成されているが、実施主体は ESA であり、装置は Columbus モジュールに搭載されている。PK-4 は PK-3 Plus とは異なり、円柱プラズマを形成する装置である。PK-3 Plus プロジェクトへの参加における、我々の反省点は、海外装置であったためとはいえ、PK-3 Plus の能力を良く知らないまま参加した点である。このため参加した時点では、臨界点にどの程度近づけるかが分からない状況であった。この反省点を踏まえ、我々は PK-4 と同様な円柱プラズマを形成する装置を製作し、どのような実験が PK-4 で可能か、そのためにはどういった運転条件が必要かということをも 2009 年度から調べ始めた。2010~2012 年度には、航空機を利用した短時間微小重力実験機会を得ることができ、一定の前進を遂げた。その中で最大の成果は、ボイドフリープラズマが得られたことである。Figure 2 に航空機実験で得られたボイドフリープラズマの例を示す。内径 30 mm の石英チャンパー内に、直径 10 mm 弱のボイドフリーの微粒子群を得ることができた。この実験結果を契機として、ボイド形成メカニズムの研究が進み、現在ボイド形成理論が概ね構築できたところである。このボイド形成理論の検証が PK-4 で可能か、即ちボイドが形成される運転条件が実現可能かといった実験的検討が今後必要となる。その上で、ボイド形成メカニズムの検証が国際研究チームの興味を惹けば、PK-4 プロジェクトへの参加の可能性が大きく高まるであろう。

PK-4 プロジェクト参加に際しての現実的な問題は、実験実施に至るまでの日本の研究チーム活動経費の確保である。PK-4 は Columbus モジュールに搭載されているので、「きぼう」利用公募は使えない。一方小規模プロジェクトでは、プロジェクト資金の下限が 5,000 万円と規定されている。下限は厳密なものでは無いと考えているが、下限が存在するという事は、研究チームが科研費等を獲得することが強く期待されていることを意味している。そのため、長くても 2~3 年、できれば 1~2 年のうちに、少なくとも基盤研究 (B) の獲得を目指したいと考えている。なお、WG/RT は前述のとおり公募が中止されているが、公募が再開されたとしても、Phase が異なる活動であるので WG がプロジェクトを実施することはできない。WG でカバーしているのは、小規模プロジェクト提案のための準備活動である。

PK-4 の場合, 小規模プロジェクトに提案する前に, 1~2 キャンペーンの航空機実験がさらに必要と考えている. 航空機実験機会を宇宙環境利用科学委員会が実質無償で得られた時期もあったが, 既にそういう機会は無くなっている. WG 公募が再開すれば, 航空機実験機会を購入するための費用を獲得するために応募したいと考えている.

4. まとめ

PK-3 Plus プロジェクトが終了したことに伴い, 我々の経験, 失敗, あるいは今後求められる実験提案, さらには次世代ダストプラズマ実験装置 PK-4 等, できる限りの情報を PK-3 Plus ミッションの纏めとして述べた. PK-3 Plus プロジェクトと同種の国際共同ミッションに参加したい方々への一助となれば幸いである.

国際研究チーム内における発言権を得るためには, 優れた理論に基づく実験提案だけでは不十分であり, その理論に基づいた装置の運転条件にまでブレイクダウンする必要がある. この変換プロセスは必ずしも容易では無く, 従って地上あるいは短時間微小重力を使った予備実験が必要となる. PK-3 Plus では予備実験は必ずしも十分では無かったが, PK-4 では万全の準備で臨みたいと考えている.

現在, 「きぼう」の 2024 年までの延長問題がクローズアップされている. 「きぼう」が 2020 年あるいは 2024 年で運用を終了したとしても, そのことは必ずしも長時間微小重力実験の終焉を意味しないことを強調しておきたい. 少なくともロシアはその先も運用を続ける予定である. 従って, 研究者の今後の努力次第では, 国際研究チームによる宇宙実験は十分実現の可能性がある.

JAXA の研究開発法人移行に伴う組織変更, および宇宙開発戦略本部をはじめとする ISS 利用に関する厳しい批判に伴う「きぼう」利用公募プロセスの変更があり, 研究者の中には戸惑いを感じる方がいるかもしれない. 新設された小規模プロジェクトと再開された「きぼう」利用公募のどちらも, 資金のおよび技術開発的な意味で, これまで以上に研究者の自助努力を求めている. しかし, 本当に宇宙実験をやりたい方々にとっては, 新しいチャンスとも言える. ISAS は, 優れた科学を本気で実現したい研究者を支援するのが役割の一つである. そのために, 研究委員会を組織し, 宇宙科学コミュニティの中で競争的に研究資金や実験機会を勝ち取る方式を採用している. そして, 小規模プロジェクトでは, 宇宙理学や宇宙工学と横並びで評価される. 従って, 小規模プロジェクトとして採択されることは, 宇宙環境利用科学が宇宙科学の重要な一部であると ISAS が認めたことと同義である. これまでは, 宇宙環境利用科学は宇宙科学の一部かという点, 実態としては必ずしもそうとは言

えなかった. しかし今後は, 自分たちが頑張りさえすれば, 状況は変わり得るのである. そして, 優れた宇宙環境利用科学を宇宙科学の一部として ISS で実施することは, 最終的には ISS 利用に関する世の中の評価を変えていく大きな駆動力になり得る. さらには, 宇宙開発戦略本部をはじめとする, ISS 利用が役立っていないという批判に対する答えを用意できる.

宇宙環境を長時間利用できる仕組みは, 少なくとも当面は ISS しか考えられない. 回収カプセル等の他の手段もあり得るが, 搭載可能な容積, 重量, 電力等の制約が大きい. 未来は自分自身で築く気概でこれからも頑張っていきたい.

謝辞

PK-3 Plus プロジェクトに参加することを許し, 貴重な実験機会を与えてくれた, MPE, JIHT をはじめとする国際研究チームの全ての方々に感謝する.

参考文献

- 1) H. Ikezi: *Phys. Fluids*, **29** (1986) 1764.
- 2) H. Thomas, G.E. Morfill, V. Demmel, J. Goree, B. Feuerbacher and D. Möhlmann: *Phys. Rev. Lett.*, **73** (1994) 652.
- 3) J.H. Chu and I. Lin: *Physica A*, **205** (1994) 183.
- 4) A. Melzer, T. Trottenberg and A. Piel: *Phys. Lett. A*, **191** (1994) 301.
- 5) Y. Hayashi and K. Tachibara: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) L804.
- 6) R.T. Farouki and S. Hamaguchi: *J. Chem. Phys.*, **101** (1994) 9885; S. Hamaguchi, R.T. Farouki and D.H.E. Dubin, *J. Chem. Phys.*, **105** (1996) 7641; S. Hamaguchi, R. T. Farouki, and D.H.E. Dubin, *Phys. Rev. E*, **56** (1997) 4671.
- 7) G.E. Morfill, H.M. Thomas, B.M. Annaratone, A.V. Ivlev, R.A. Quinn, A.P. Nefedov, V.E. Fortov and PKE-Nefedov Team: *Third Conference on the Physics of Dusty Plasmas*, AIP Conf. Proc. **649**, Durban, Republic of South Africa, 2002, 91.
- 8) A.P. Nefedov, G.E. Morfill, V.E. Fortov, H.M. Thomas, H. Rothermel, T. Hagl, A.V. Ivlev, M. Zuzic, B.A. Klumov, and A.M. Lipaev *et al.*: *New J. Phys.*, **5** (2003) 33.1.
- 9) V.E. Fortov, O.S. Vaulina, O.F. Petrov, V.I. Molotkov, A.M. Lipaev, V.M. Torchinsky, H.M. Thomas, G.E. Morfill, S.A. Khrapak and Y.P. Semenov *et al.*: *Phys. Rev. Lett.*, **90** (2003) 245005.
- 10) G. Praburam and J. Goree: *Phys. Plasmas*, **3** (1996) 1212.
- 11) D. Samsonov and J. Goree: *Phys. Rev. E*, **59** (1999) 1047.
- 12) J. Goree, G.E. Morfill, V.N. Tsytovich, and S.V. Vladimirov: *Phys. Rev. E*, **59** (1999) 7055.
- 13) H.M. Thomas, G.E. Morfill, V.E. Fortov, A.V. Ivlev, V.I. Molotkov, A.M. Lipaev, T. Hagl, H. Rothermel, S.A. Khrapak and R.K. Suetterlin *et al.*: *New J. Phys.*, **10** (2008) 033036.
- 14) H.M. Thomas, G.E. Morfill, A.V. Ivlev, T. Hagl, H. Rothermel, A. Khrapak, K.R. Suetterlin, M. Rubin-Zuzic, M. Schwabe and S.K. Zhdanov *et al.*: *Fifth International Conference on the Physics of Dusty Plasmas*, AIP Conf. Proc. **1041**, Ponta Delgada, Portuguese Republic, 2008, 41.

- 15) P. Hofmann, R. Seurig, A. Stettner, J. Burfeindt, G. Morfill, H. Thomas, M. Thoma, H. Höfner, W. Fortov and W. Molotkov *et al.*: *Acta Astronautica*, **63** (2008) 53.
- 16) K. Takahashi, H.M. Thomas, G.E. Morfill, A.V. Ivlev, Y. Hayashi and S. Adachi: Fifth International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, AIP Conf. Proc. **1041**, Ponta Delgada, Portuguese Republic, 2008, 329.
- 17) H. Totsuji and S. Ichimaru: *Prog. Theor. Phys.*, **52** (1947) 42.
- 18) H. Totsuji: *Phys. Plasmas*, **15** (2008) 072111.
- 19) H. Totsuji: *Plasma Fusion Res.*, **3** (2008) 046.
- 20) H. Totsuji: *J. Phys. A: Math. Theor.*, **42** (2009) 214022.
- 21) S.A. Khrapak, G.E. Morfill, A.V. Ivlev, H.M. Thomas, D.A. Beysens, B. Zappoli, V.E. Fortov, A.M. Lipaev and V.I. Molotkov: *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 015001.
- 22) K. Takahashi, Y. Hayashi and S. Adachi: *J. Appl. Phys.*, **110** (2011) 013307.