



小特集「プラズマと微粒子」研究の諸分野における進展

2. 国際宇宙ステーションにおけるコンプレックスプラズマ研究

THOMAS Hubertus M., IVLEV Alexey V., MORFILL Gregory E., FORTOV Vladimir E.¹⁾,
LIPAIEV Andrey M.¹⁾, MOLOTKOV Vladimir I.¹⁾ and PETROV Oleg F.¹⁾

Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, 85741 Garching, Germany,

¹⁾Institute for High Energy Densities, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

(原稿受付：2010年9月15日)

国際宇宙ステーションISSでのコンプレックスプラズマ研究について報告する。2001年にロシア・ドイツ共同プロジェクトとして最初の実験がPKE-Nefedov装置を使って実施された。この装置では4年以上にわたって実験が行われた。2005年には次の世代の装置PK-3 Plusによって、コンプレックスプラズマ実験は受け継がれた。これにより精密な実験ができるようになり、コンプレックスプラズマの物理に新しい展開を切り拓いた。ここでは最近の研究結果、なかでも電気流動プラズマの観測、レーン形成、相分離、その他興味深い現象を紹介する。

Keywords:

ISS, complex plasma, PK-3, electrorheological plasma, lane formation, phase separation

2.1 はじめに

ダストプラズマ、あるいはコンプレックスプラズマといわれるものは弱电離気体と帯電した微粒子から成っている。ダストプラズマは宇宙空間ではいたるところに存在する。たとえば惑星の環、彗星の尾部、惑星間雲、星間雲、中間圏、雷雲、さらに人工衛星やスペースシャトル周辺にも見られる[1, 2]。微粒子の存在によってできるコンプレックスプラズマは、これまで地上の実験室でよく調べられてきた[3]。多くの応用も生まれており、ナノ物質の合成、ナノ粒子関連、廃棄物処理など様々なものに関連している[4]。しかし、コンプレックスプラズマのもっとも興味深い応用は、基礎物理に対するモデルシステムとなることであろう。そこでは、固体や液体の物理に対して、もっとも基本のレベル、つまり運動論的なレベルで、自然界におけるシステムでは達成できないような精密さによって議論ができる。地上の実験は必ず重力によって影響を受け、時に重力の存在が妨げとなることがある。重力は2次元系あるいは3次元系でも小さなクラスターの研究には問題を引き起こさないが、大きな均一の3次元系を作るのに大きな影響を与える。こうした3次元系の達成には無重力は不可欠で、最近、国際宇宙ステーションに積まれたPK-3 Plusラボで実験が行われた。

PK-3 Plusは国際宇宙ステーションでのコンプレックスプラズマ研究のための第2世代の実験装置で、2005年の終わりに打ち上げられたものである。ユニークなデータをいくつも生み出し、第1世代のPKE-Nefedovに比べると、格段に優れた診断装置が積載されているので、微小重力下におけるコンプレックスプラズマについての知見をもたらすことが期待されている。PK-3 PlusはRF電極を上下対称に設置して対称的に駆動されるRFプラズマ装置を持ち、アルゴンまたはネオンプラズマをガスフローの存在下あるいはフローのない状態で生成できるようになっている。さらに、1.5 μm と15 μm の間で様々な大きさの微粒子を、極板間に導入できるようになっている。装置の詳細は[5]を参照していただきたい。

2.2 最近の国際宇宙ステーションからの結果

コンプレックスプラズマの最も重要な特徴の一つは、微粒子が一つ一つ個別に観察可能であるということである。これは、たとえば相変化の物理で詳細な研究が可能になることを意味する。ここで報告する国際宇宙ステーションでの微小重力実験は以下のものを含んでいる。(1)コンプレックスプラズマがひも状の流体になる電気流動遷移(ER (electrorheological) transition)の初めての観測[6]、(2)駆動システムにおける非平衡相転移[7]、(3)2成分系における相分離[8]。それらはすべてより広い基本的な応用、とくに流体物理やソフトマターの観点から興味深い。

2.2 最近の国際宇宙ステーションからの結果

2.3 電気流動プラズマにおけるひも状構造形成

通常の電気流動(ER)流体は、異なる誘電率を持つ非伝導性流体の中に微粒子が浮いている懸濁液である[9, 10]。微粒子間の相互作用およびそれによる電気流動流体のレオロジー(流動学、物質の変形と流動に関する科学)は、外部電場により決まってくる。電場が微粒子の電荷を分極化

2.3 電気流動プラズマにおけるひも状構造形成

2. Complex Plasma Research on the International Space Station ISS

THOMAS Hubertus M., IVLEV Alexey V., MORFILL Gregory E., FORTOV Vladimir E., LIPAIEV Andrey M., MOLOTKOV Vladimir I. and PETROV Oleg F.

corresponding author's e-mail: oishihar@ynu.ac.jp

し、それによって双極子-双極子結合が引き起こされる。電場の強さにより、等方的な流体は電場に沿って規則正しい道筋を作り、いわゆるひも状構造を伴う流体、さらには電場に沿って圧縮膨張を伴った固体までを作ることができる[11, 12]。

たとえば、コロイドのような通常の ER では生じられる双極子は微粒子自身の分極効果によるものだが、コンプレックスプラズマでは微粒子を取り巻くプラズマが重要な役割を担っている。特に、負に帯電した微粒子のまわりにある過剰イオンの雲が重要な役割を果たしている。外から加えられる電場が微粒子の周りのポテンシャル分布の球対称性にゆがみを生じさせることになる。それによってイオンの集団的な動きを生み出し、微粒子に対し下流域に、いわゆるイオンウェイク（航跡）を形成することになる。もし、電場がダストプラズマ周波数よりもっと早い周波数で時間変動すれば、電場に沿って微粒子の両側にイオンウェイクができて、微粒子間相互作用は対称性を持つようになり、通常の ER 流体における相互作用と等価になる。我々は国際宇宙ステーションで、初めてそのような電気流動流体の振る舞いをするプラズマを PK-3 Plus により観測し、等方的な流体からひも状流体への遷移現象を詳細に調べた。図 1 では外部電場に依存した二つの異なる相が示されている。

2.4 駆動システムにおける非平衡相転移

いわゆる『開放系』とは、エネルギーと物質の流入を許すシステムのことである。非線形な開放系の顕著な特徴の一つは自己組織化がある[13, 14]。それは安定な空間的（あるいは時間的）な構造が自然に現れる現象である。その構造は散逸過程が関与することからしばしば「散逸構造」と呼ばれることがある。

非平衡相転移現象の一例として、レーン形成を上げることができる。2種類の粒子が互いに反対方向に駆動されるときに自然界でおこる現象である。駆動力が十分に強いと、駆動力に応じる粒子は「流れのライン」を形成し、集団の動きをしてレーンを形成する。典型的に、レーンは一方向を向いた非等方的な構造を示し、移動度の増加を伴っている。こうした現象は非常に人通りの多い道での通行人の行動パターンとして知られている[15]。またこの現象



図1 電気流動プラズマにおける微粒子のひも状構造の形成。微粒子は垂直方向の交流電場に平行なシート状のレーザーにより照射されている。左は弱電場、右は強電場の場合で、強電場のときにひも状の構造ができる。それぞれ交流印加電圧の値が示されている（参考文献[6]参照）。

は、コロイド分散において粒子が駆動された場合に起こる現象として知られている[16, 17]。他にも格子気体[18]や分子イオン[19]で同じような現象が知られている。言い換えると、これは至る所に見られる現象であり、物理の諸分野において非常に興味深い現象といえるだろう。

国際宇宙ステーションに搭載された PK-3 Plus 装置はそのような実験を行うのには非常に適したものである。大きな微粒子の安定した集団を形成して、その中に側面から小さな微粒子を注入して大きな微粒子集団の中に入れる。大きな微粒子と小さな微粒子は空間的に異なる平衡位置を持つため、小さな微粒子は衝突することなく大きな微粒子の中に侵入していくことになる。プラズマ条件により、個々の微粒子の運動はレーン形成へと変化していく。微粒子は数珠つなぎりになって鎖状になる（図 2 参照）。これはコンプレックスプラズマで初めてレーン形成が見つかった実験である。

2.5 2 粒子系における相分離

多粒子混合系では、相分離はどこにでも見られる現象である[20]。たとえば、分子流体[21] やコロイド[22] の中での現象はよく知られている。この現象は古くから研究されているが、現在でもなお基本的な重要研究課題となっている。特に臨界点近傍で 2 粒子系の振る舞いは、通常の液体-気体相変化（ただし粒子間相互作用が十分短いことが必要）、一軸磁石におけるフェロ磁性転移、あるいは 3 次元イジングモデルが示すような普遍性クラス（universality class）に分類することができる[23]。

異なる種類の粒子が混合するか、あるいは分離していくかは基本的には相互作用の強さに依存する[24]。ここで注目すべきことは多成分系における相転位は相互作用する粒子間に引力の存在は必要ではないことである。1 種類の粒子からなる系では、流体相転移が引き起こされるためには粒子間に引力が必要であることとは異なっている。

2 粒子系における実験の初期の状態は前節で取り上げられたレーン形成である。

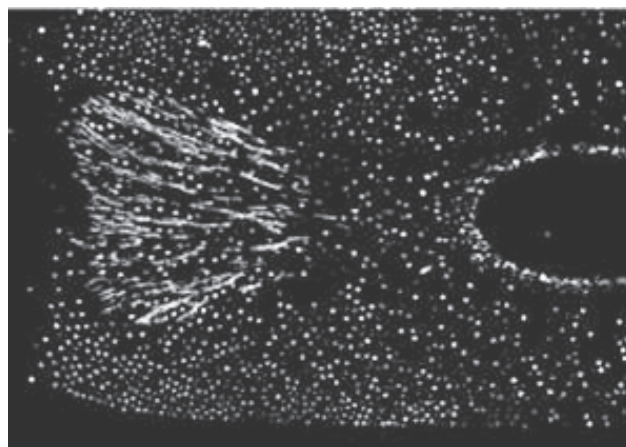


図2 2 粒子系（2 種類の微粒子を含んだ）コンプレックスプラズマにおける非平衡な相変化。一種類の粒子群が他の種類の微粒子集団の中に突き進む様子が示されている（参考文献[7]参照）。

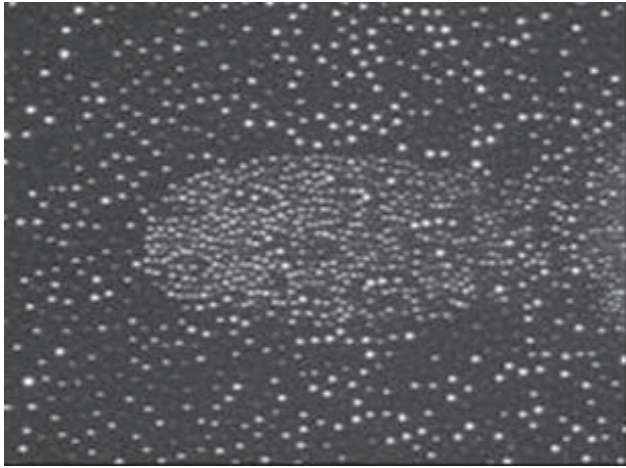


図3 国際宇宙ステーションの中で観測された2粒子系コンプレックスプラズマにおける相分離（ドロップレット（小滴）の形成）（参考文献[8]参照）。

終状態は図3に示されている。小さい微粒子が駆動力の影響がなくなる、装置の中心に向かってきたとき、相分離が観測され、その時明確に定義できる楕円形の形状をした小さな微粒子の集合体であるクラスターができている。

結 論

ここに示した結果は、コンプレックスプラズマが相転移とそれに関連する現象を原子レベルで解明する理想的なモデルシステムであることを示している。相転移に関連する現象としては表面張力、臨界現象などがあげられる。中でも興味ある現象としては臨界点近傍において見られる現象であろう。

国際宇宙ステーションの微小重力実験はコンプレックスプラズマの地上実験を補完する役割を果たしている。実験装置の新たな改造や、新たな科学的な目標設定がなされ、PK-3Plusの次の装置が現在準備中である。

謝 辞

この研究はドイツ航空宇宙センター（DLR）宇宙機構の支援を得て行われたものである（Gefördert von der Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt e. V. mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 50 WP 0203）。またロシア研究グループの経済的支援はロシア基礎科学財団（Grant No. N08-02-00444-a）から出ていることを記して感謝の意を表したい。（翻訳：石原 修）

参 考 文 献

- [1] C.K. Goertz, Rev. Geophys. **27**, 271 (1989).
- [2] E.C. Whipple, Rep. Prog. Phys. **44**, 1197 (1981).
- [3] V.E. Fortov *et al.*, Phys. Rep. **421**, 1 (2005).
- [4] A. Bouchoule, Editor, *Dusty Plasmas* (Wiley, 1999).
- [5] 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, R.K. Suetterlin, M. Rubin-Zuzic, O.F. Petrov, V.I. Tokarev and S.K. Krikalev, New J. Phys. **10**, 033036 (2008).
- [6] A.V. Ivlev, G.E. Morfill, H.M. Thomas, C. Rath, G. Joyce, P. Huber, R. Kompaneets, V.E. Fortov, A.M. Lipaev, V.I. Molotkov, T. Reiter, M. Turin and P. Vinogradov, Phys. Rev. Lett. **100**, 095003 (2008).
- [7] K.R. Sütterlin, A. Wysocki, A.V. Ivlev, C. Rath, H.M. Thomas, M. Rubin-Zuzic, W.J. Goedheer, V.E. Fortov, A.M. Lipaev, V.I. Molotkov, O.F. Petrov, G.E. Morfill and H. Löwen, Phys. Rev. Lett. **102**, 085003 (2009).
- [8] A.V. Ivlev, S.K. Zhdanov, H.M. Thomas and G.E. Morfill, Europhys. Lett. **85**, 4 (2009).
- [9] T. Chen, R.N. Zitter and R. Tao, Phys. Rev. Lett. **68**, 2555 (1992).
- [10] U. Dassanayake, S. Fraden and A. van Blaaderen, J. Chem. Phys. **112**, 3851 (2000).
- [11] A. Yethiraj, J.H.J. Thijssen, A. Wouterse and A. van Blaaderen, Adv. Mater. **16**, 596 (2004).
- [12] A.-P. Hynninen and M. Dijkstra, Phys. Rev. Lett. **94**, 138303 (2005).
- [13] I. Prigogine, *From Being to Becoming* (Freeman, San Francisco, 1980).
- [14] A. Hasegawa, Adv. Phys. **34**, 1 (1985).
- [15] D. Helbing, I.J. Farkas and T. Vicsek, Phys. Rev. Lett. **84**, 1240 (2000).
- [16] M.E. Leunissen *et al.*, Nature **437**, 235 (2005).
- [17] J. Dzubiella, G.P. Hoffmann and H. Löwen, Phys. Rev. E **65**, 021402 (2002).
- [18] B. Schmittmann and R.K.P. Zia, Phys. Rep. **301**, 45 (1998).
- [19] R.R. Netz, Europhys. Lett. **63**, 616 (2003).
- [20] G.E. Morfill *et al.*, New J. Phys. **8**, 7 (2006).
- [21] J.S. Rowlinson and F. Swinton, *Liquids and Liquid Mixtures* (Butterworths, London, 1982).
- [22] J.P. Hansen and H. Löwen, Annu. Rev. Phys. Chem. **51**, 209 (2000).
- [23] M.E. Fisher, Rev. Mod. Phys. **46**, 597 (1974).
- [24] J.P. Hansen and I. McDonald, *Theory of Simple Liquids* (Academic, New York, 1986).
- [25] D.G.A.L. Aarts, R.P.A. Dullens and H.N.W. Lekkerkerker, New J. Phys. **7**, 40 (2005).