

平成22年 6月 3日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19340177

研究課題名(和文) 微粒子プラズマによる臨界現象

研究課題名(英文) Critical Phenomena in Fine-Particle Plasma

研究代表者

林 康明 (HAYASHI YASUAKI)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授

研究者番号：30243116

研究成果の概要(和文)：

微粒子プラズマにおいて臨界現象を観測することを目的に、国際宇宙ステーション(ISS)を利用した微小重力実験を行った。ISS内に設置されたプラズマ実験装置と同型の装置を用いて、地上で実験条件とプラズマ状態との関係を調べ、理論解析の結果と照らし合わせながら、ISSにて行う実験条件を設定した。並行して、広い領域にわたり三次元等方的な微粒子プラズマを形成する方法について、実験による検討を行った。

研究成果の概要(英文)：

We carried out microgravity experiments in International Space Station (ISS) for the observation of critical phenomena in fine-particle plasmas. Experimental conditions were determined through the measurement of plasma parameters under gravity and theoretical analyses. Experimental examinations for the generation of three-dimensional isotropic fine-particle plasma in a large area were also carried out.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2008年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2009年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：プラズマ科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：(1) 微粒子 (2) プラズマ (3) 臨界現象 (4) 国際宇宙ステーション
(5) 微小重力

1. 研究開始当初の背景

微粒子と周囲の荷電粒子よりなるプラズマは全体として電氣的に中性である。したがって、微粒子を除いた背景電荷は正であり、そ

れが負帯電微粒子の束縛力となって、適当な条件が満足されると(全体の圧縮率が発散する)臨界点に達する。これは、本研究分担者・東辻教授により理論的に予測された。

一方、微粒子プラズマの結晶化現象は本研究代表者のグループなどにより発見され1994年に発表された。形成される微粒子プラズマ結晶は、微粒子の粒径が大きい場合は鉛直方向に連なった2次元の結晶であるが、粒径が $2\mu\text{m}$ 以下では実際の結晶のように面心立方や体心立方の3次元構造をなすことがわかってきた。しかし粒径が小さいほど粒径の揃った単分散微粒子を入手することは難しく、研究代表者のグループではプラズマ中その場で成長させた微粒子を利用してこうした3次元構造を形成することに成功してきた。

一般に微粒子は下部のシースとプラズマの境界に存在するため、必ずしも3次元等方的な力の場の中で形成されたものではなく電極軸に対して配向した構造を成す。正確に臨界現象を捉えるには、実際の3次元結晶が形成されるのに近い条件にするため、微粒子を制御してプラズマ中心部の等方的な力の場の中に置かなければならない。微粒子がシースとプラズマの境界に集まる原因は、イオン粘性力が静電界からの力を上まっていることと、重力の影響がある。前者の課題については、本研究協力者による実験から、球グリッドケージ放電を利用して微粒子をプラズマ中心部に捕捉できることが確認されている。一方後者の、重力の問題については、研究代表者・協力者のグループが、落下実験施設や航空機放物線飛行を利用した微小重力実験を実施してきた。また、ドイツ・ロシアの共同研究グループ（本研究協力者）が、ISS（国際宇宙ステーション）における微小重力実験を実施している。

2. 研究の目的

微粒子プラズマによる臨界を実現するには、これまでに行った理論的解析から、例えば、微粒子の帯電量 $\sim 10^4 e$ ；ダスト微粒子密度 $\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ；イオン密度 $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 、の条件を満たす必要があることが分っている

本研究では微粒子プラズマにおけるこの臨界状態を実現・検証すると共に、さらに微粒子の挙動を直接的にCCDビデオカメラで観測・記録してそれを画像解析するという、従来の実験方法とは全く異なる手法で揺動現象を捉え、臨界現象の解析を試みる。強結合微粒子プラズマにおいて臨界条件を満たすことにより、臨界現象のユニバーサリティ概念の確認ができると共に、臨界現象や相転移現象一般の解明への貢献が期待できる。

なお、微粒子プラズマにおける臨界現象では、気体状態と固体状態間の変化が見られると予測され（上記の条件でクーロン結合係数 Γ が大きい）、固体（結晶）側から微粒子配列を観測することにより精密な臨界現象の解析が可能となる。

3. 研究の方法

(1) プラズマ生成と微粒子制御

臨界現象を観測するためには、広い領域にわたり三次元等方的な微粒子プラズマを形成する必要がある。そこで、微粒子をプラズマ中心部に安定に捕捉するために、比較的高い密度のプラズマを、高い圧力領域で（100～10kPa 台）、周辺部に生成する技術を開発する。

これまで、球グリッドケージ放電を利用する技術が本研究協力者により開発されてきた。この方法は、イオン流が内側中心部に向くような拡散プラズマを利用し、結晶化には到ってはいないが球の中心部に構造があり結合定数がそれなりに大きい微粒子配列が形成されることが確認されている。本研究ではこの技術を発展させ、平行平板RFプラズマ装置において下部電極上にリング状のプラズマを生成するよう電極構造を工夫し、中心かつ上方向に拡散するプラズマを利用して微粒子を中心部に輸送すると共に浮遊させる方法を開発する。

リング状プラズマ生成のため、円盤形RF電極を円筒形の接地電極が接近して取り囲む構造の装置を設計・製作する。また別の方法として、高周波マグネトロンプラズマの利用を検討する。スパッタリングなどに用いられるマグネトロンプラズマではリング状に高密度プラズマが生成し、上の目的に合致した微粒子制御が期待できる。

(2) 理論・シミュレーション

これまで開発されてきた微粒子群に着目した粒子シミュレーションの方法を発展させ、微粒子群の振る舞いを精密に解析するのに必要な、微粒子と共存するプラズマを含めた数値モデルの構築を行う。新たに構築したモデルをシミュレーションコードに組み込み、臨界現象発現の条件を求め、理論予測と比較検討する。また、自己無撞着的に形成する電位、あるいは外部から与えられた固定電位によって、プラズマ中で閉じ込められた帯電微粒子群がどのような構造をとるかについて、シミュレーションを行う。微粒子群の動的な振る舞いを追うことによりマクロな物理量の時間発展をモニターし相転移現象を観測し、相転移近傍で臨界点を求め、密度揺らぎの観測から超臨界状態の達成条件を見出す。さらに具体的な実験と対応させ、電子密度、電子温度、微粒子密度、微粒子温度などの実験パラメータの範囲を確定する。

(3) 宇宙実験に向けた地上実験

ドイツのマックスプランク研とロシアの科学アカデミー・高エネルギー密度研が共同で進めてきた、ISSを利用した宇宙実験用微粒子プラズマ実験装置（PK-3 Plus）と全く同じ構造・構成からなる装置（GM:Ground Model）のプラズマ槽、電源部などの主要部

を入手する。この GM 装置を用いて、ISS での実験条件に近づけるべく、これまでの実験結果を元にして微粒子制御を行い、さらに臨界現象実験を行う。

地上では微粒子の重力の影響があり、ISS における宇宙実験と同じ条件にはならない。このため、下部電極を加熱し、上向きの熱泳動力を利用して重力による下方の力と釣り合わせる。ISS 内と同等の実験環境の下で、2. 研究の目的 で記載した条件において臨界点近傍の現象の一端が観測され得るかどうかを確かめる。

また、実験装置を航空機に搭載して放物線飛行による 20 秒間の微小重力環境を地上で実現し、その間における微粒子挙動を観測する。微小重力環境の質と時間は ISS での実験に及ばないが、臨界現象の兆候の観測を試みる。

これらの実験結果に基づき、ISS 内での実験条件の範囲を設定する。

(4) 宇宙微小重力実験

国際宇宙ステーションのロシア側モジュール内で微小重力実験を実施する。地上における予備実験に基づいた実験条件の範囲を設定し、プログラムに沿った実験を宇宙飛行士が実施する。地上との交信を行いながら、必要に応じて宇宙飛行士に指示を与える。

実験終了後、実験データを収集し、日本に持ち帰る。

(5) データ解析

大型コンピュータおよびパーソナルコンピュータを用いて、実験データを解析する。

各大学における解析結果をまとめ、研究会を開催して集まり、臨界現象発現の有無、物理的意味などについて議論を行う。

次の宇宙実験機会に向けて、実験条件や地上実験について議論し検討する。

(6) 海外研究者との研究交流

海外研究者との研究交流を行い、臨界現象実験、微小重力実験について討論と検討を行う。

4. 研究成果

(1) プラズマ生成と微粒子制御

直径 30cm の大きな真空槽の下部電極内にネオジウム・鉄・ボロン系焼結体の強力な永久磁石（残留磁束密度 1.4 T）をループ状に配置し、13.56MHz の高周波を印加した。上部フランジの中心に覗き窓を設置し、その周囲は接地電位となっているため、上部フランジが高周波放電の対向接地電極の役割をなしている。これら二電極間の間隔は、約 14cm である。

高周波電極上にループ状のプレーナマグネトロンプラズマが生成していることを確認した。その中に直径 $2.27 \mu\text{m}$ のジビニルベンゼン球状微粒子を投入し、微粒子の配列をレー

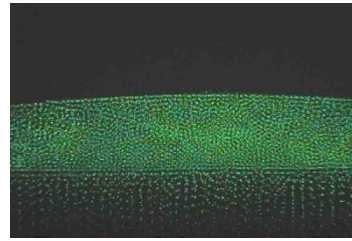


図1 マグネトロン電極上部の微粒子配列

ザー光散乱と CCD カメラにより横方向から記録した。その画像を図 1 に示す。微粒子配列が明確に上部と下部に分かれ、上部は 3 次元の、下部は鉛直方向に並んだ微粒子列の集合である 2 次元の構造を成していることが分かる。この結果は、上方に拡散していくプラズマ中のイオンの粘性力と重力とが拮抗して微粒子が上部ではプラズマ中に入り込み、一方、下部では微粒子が RF 電極近傍のシース内に入り込み、マッハ数を超えた速度のイオン流による航跡場の影響を受けているものと解釈できる。このように、地上で微粒子の 3 次元配列が得られるようになり、臨界に向けた実験の範囲を拡張することができるようになった。図 2 は、3 次元構造を成す微粒子配列を拡大した画像である。

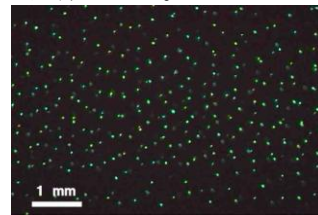


図2 3次元構造を成す微粒子配列

さらに、微小重力実験を実施するため、小型のプラズマ装置真空槽を設計・製作した（図 3）。真空槽は、3 軸方向に対称な一辺が 15cm の立方体とし、6 面にマグネトロン放電用の磁石を貼り付けた。各面には、15mm × 30mm × 30mm [磁化方向] の磁石を 8 個取り付け 8 角形状に配置した。

さらに、本実験装置を、日本無重量総合研究所 (MGLAB) にある落下実験棟のカプセル内に収め、微小重力実験を実施した。

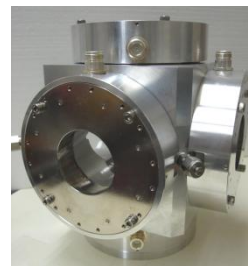


図3 微小重力実験用マグネトロンプラズマ装置

(2) 理論・シミュレーション

ISS 内宇宙実験用微粒子プラズマ実験装置 (PK-3 Plus) と同型の地上実験用装置 (GM) において測定したプラズマパラメータの値と照らし合わせながら、臨界点およびその近

傍における、電子密度、電子温度、微粒子密度、微粒子温度などの実験パラメータの範囲を確定した。

規格化されたクーロン結合係数(Γ/Γ_0)と遮蔽パラメータ(ξ)との相図において、スピノーダル曲線、二相共存線と臨界点を明らかにし、実験において実現可能な条件の範囲と対応させながら、臨界点に接近して臨界現象を観測するために、ISSにおける実験方法と条件の絞り込みを行った。その結果、これまで行ってきた実験よりも、大きなサイズの微粒子を用い、微粒子密度を高くして、大きな放電電力の条件が適当であることが分かった。

(3) 宇宙実験に向けた地上実験

PK-3 Plus 同型実験装置(図4、チャンバ横一辺の寸法は約10cm)の主要部分をマックスプランク研究所より借り受け、ガス導入系、排気系、架台部など用意して、地上実験用装置を組み立てた。この装置において制御可能な範囲内(圧力、高周波パワー)でのプラズマパラメータの変化(電子温度と電子密度)を、ラングミュアプローブ法により、重力下、微粒子を含まないプラズマ中で測定した。実験条件として、放電ガスにアルゴンを用い、放電電力0.8-3.2W、ガス圧力20-100Paとした。

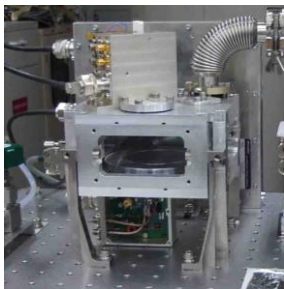


図4 PK-3 Plus 同型実験装置

結果は、PK-3 Plus 同型実験装置における電子密度の範囲は $10^{-4} \sim 10^8 \text{cm}^{-3}$ 、電子温度の範囲は1.1-1.8eVであった。また、これらのパラメータはガス圧力には顕著な相関はないが、放電電力が大きくなるほど、電子密度は増加し、電子温度は低下する傾向があることがわかった。

また、PK-3 Plus 同型実験装置を航空機放物線飛行実験用のラックに収め(図5)、微小重力実験を実施した。重力下では微粒子は下の方に沈むものの、プラズマバルク内にも侵入し層状に配列している様子が観察された。しかし、微小重力下では、放電電力が大きくなるほど“ボイド”が大きくなり境界が明瞭に現れた。

臨界点に接近する条件を探索するためには、プローブ法などを用いてプラズマ診断を行う、すなわち、プラズマ密度・温度などのプラズマパラメータを評価する必要がある。



図5 微粒子プラズマ放物線飛行実験システム

しかし、ラングミュアプローブ法では、プラズマ中に探針を直接挿入するため微粒子が存在した状態での評価はできない。そこで、プラズマ全体の密度を評価する周波数シフトプローブ法を利用した。測定の結果、微粒子が存在しない状態で、両者のプラズマ密度は、30%の範囲内で一致した。

(4) 宇宙微小重力実験

2009年5月に、4名(林、東辻、高橋、足立)がドイツのマックスプランク研究所に赴き、PK-3 Plus を用いた ISS 実験を担当している研究者と共に、実施する実験条件の詳細な検討を行った。その結果に基づき、2009年7月と2010年1月に実験を実行した。

2009年7月に行った第1回目の実験結果は次のとおり。粒径 $9.2 \mu\text{m}$ の微粒子を用いて、アルゴンガス圧力40Pa、放電電力1W、DC変調実施の下では、中心にボイドが消滅するまで微粒子をプラズマ中に導入することができた。しかし一方で、Heartbeat Instabilityが生じ、結晶状の微粒子配列は得られなかった。放電電力2Wや、粒径 $14.9 \mu\text{m}$ の微粒子を用いた実験も行われたが、途中で放電が停止するトラブルが生じた。なお、第1回目の実験では、臨界点に向けた実験条件における微粒子プラズマの性質の概要を把握できた。

2010年1月に実施した第2回目の実験では、粒径 $14.9 \mu\text{m}$ の微粒子のみを用いた。今回は問題なく放電が持続し、微粒子の配列が観察できた。特に、DC変調を行わずボイドの無い状態で大量の微粒子を導入することができ、一部において結晶状の配列が観察されたことは注目に値する(図6)。微粒子配列など、詳細な解析は現在進めている。

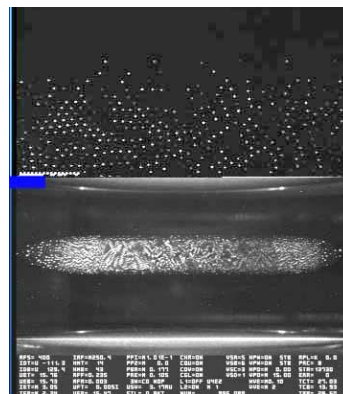


図6 ISS 実験における微粒子配列

なお、2010年(本年)7月にも第3回目の実験を予定しており、今後も継続して、ISS内微小重力実験を実施していく予定である。

(5) データ解析と討論

研究会を二回開催した。第1回目は平成20年9月26日(金)~27日(土)、第2回目は平成21年9月18日(金)~19日(土)。研究会で話し合われた内容は次のとおり。

ISS搭載PK-3 Plus実験の提案に関して、東辻教授の計算による Γ - ξ 相図における臨界点・スピノーダル曲線と実験的に可能な条件の範囲を照らし合わせ、臨界点に近づくためのプラズマパラメータの設定について、現在のISS搭載PK-3 Plusを用いた実験を前提にした議論を行った。その結果、微粒子密度をもっと高くできなければ、プラズマ密度を増大するかイオン温度を低下させてデバイ長を小さくする必要があることが分かった。

KIT(京都工芸繊維大学)仕様PK-3 Plus装置による実験の計画に関して、ISS搭載PK-3 Plusでは実験範囲に限界があるため、航空機実験あるいは次期PK-3 Plus改造装置による実験を想定し、ボイド除去の点からPK-3 Plus装置の改良点について議論を行った。

平成21年の研究会では、東辻教授、高橋准教授より、7月に行った「微粒子プラズマの臨界現象に関する国際宇宙ステーションでの基礎実験」について概要報告があった。

なお、ISSにて行った実験結果のデータ解析は現在進めているところである。

(6) 海外研究者との研究交流

平成19年10月に奈良にて行われた宇宙における物理学国際シンポジウムのサテライトミーティングを開催し、マックスプランク研究所の教授、研究員と、微小重力下での微粒子実験について発表と討論を行った。

平成20年5月にポルトガルにて開催された、第5回ダストプラズマ物理国際会議に出席して、発表と討論を行った。

平成20年10月に中国で開催された日中微小重力科学ワークショップに出席して発表を行い、中国の微小重力科学に関する研究者と討論を行った。

平成21年5月に、東辻、高橋、足立、林の4名がドイツのマックスプランク研究所に赴き、PK-3 Plusを用いたISS実験を担当している研究者と共に、実施する実験条件の詳細な検討を行った。

平成21年9月にドイツにて開催された、欧州小重力学会シンポジウムに出席して発表と討論を行った。

平成19, 20, 21年に、核融合科学研究所で行われた、第8, 9, 10回微粒子プラズマワークショップにおいて、ドイツ、ロシアやその他海外からの出席者と共に、微粒子プラズマ科学に関する討論を行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計26件)

- 1) Y. Hayashi, M. Imano, Y. Mizobata, and K. Takahashi: "Developments of fine-particle plasma systems for basic and applied research", Plasma Sources Sci. Technol. 19, 034019--1-5, 2010 査読有
- 2) G. Tan, T. Mieno, "Synthesis of single-walled carbon-nanotubes by arc-vaporization under high gravity condition", Thin Solid Film, 査読有、518, 3541-3545 (2010).
- 3) Y. Hayashi, Y. Mizobata, and K. Takahashi: "Behaviors of Fine Particles in a Planar Magnetron Plasma", J. Plasma Fusion Res. SERIES, 2009, pp.298-301 査読有
- 4) H. Totsuji, "Thermodynamic instability and critical point of fine particle (dusty) plasmas: enhancement of density fluctuations and experimental conditions for observation", Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 査読有, Vol.42, pp.214022-214030, 2009.
- 5) H. Totsuji, "On estimation of three-dimensional pair distribution function from two-dimensional sliced data", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.78, No.6, pp.065004-1--065004-2, 2009.
- 6) T. Ogata, Y. Tatamitani, T. Mieno, "A simple carbon growth mechanism using atomic carbon addition by ring opening", CARBON, 査読有, 47, 683-689 (2009).
- 7) Y. Nakamura and O. Ishihara, Measurements of electric charge and screening length of micro-particles, Physics of Plasmas 16, 043704-1-5 (2009). 査読有
- 8) O. Ishihara, Complex plasmas in cryogenic environment, J. Plasma and Fusion Research 85, 511-519 (2009). 査読有
- 9) Y. Tomita, T. Yamada, O. Ishihara, Charging of dust particles in magnetic field, J. Plasma and Fusion Res. Series 8, 273-276 (2009). 査読有
- 10) Y. Hayashi, K. Takahashi, H. Totsuji, O. Ishihara, S. Hamaguchi, N. Sato, Y. Watanabe, S. Adachi, and M. Takayanagi: "Experiments of fine particle plasmas toward observation of critical phenomena", J. Jpn. Soc. Microgravity Appl. 25(3), pp.353-356, 2008 査読有

- 11) H. Totsuji, “Thermodynamics of strongly coupled repulsive Yukawa particles in ambient neutralizing plasma: Thermodynamic instability and the possibility of observation in fine particle plasmas”, *Physics of Plasmas*, 査読有, Vol.15, No.7, pp.072111-1 -- 072111-14, 2008.
- 12) S. Adachi and M. Takayanagi, “Experimental investigation on dependency of interparticle distance in Coulomb crystal on various parameters”, *JAXA RR-06-018E* (2007) pp. 1-10. (査読有)

[学会発表] (計 30 件)

- 1) O. Ishihara, “Cryogenic complex plasma experiment”, *International symposium on cutting edge plasma physics* (August 25, 2009, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy). (招待講演)
- 2) Y. Hayashi: ” Developments of fine-particle plasma systems for basic and application researches”, 29th *International Conference on Phenomena in Ionized Gases* (July 15, 2009, Cancun, Mexico) (招待講演)
- 3) 林康明: “微粒子プラズマの微小重力下実験”, 日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月 21 日, 岩手大学) (招待講演)

[図書] (計 5 件)

- 1) Y. Hayashi, K. Takahashi, H. Totsuji, O. Ishihara, N. Sato, Y. Watanabe, and S. Adachi, *Ordering of Fine Particles in a Planar Magnetron Plasma, Multifacets of Dusty Plasmas* (AIP Conference Proceedings 1041), pp. 221-222 (2008).
- 2) Kazuo Takahashi, Hubertus M. Thomas, Gregor E. Morfill, Alexei V. Ivlev, Yasuaki Hayashi and Satoshi Adachi, *Diagnosis in Complex Plasmas for Microgravity Experiments (PK-3 plus), Multifacets of Dusty Plasmas* (AIP Conference Proceedings 1041), pp. 329-330 (2008).
- 3) 林康明: “プラズマ中の微粒子”, *プラズマエネルギーのすべて*, プラズマ・核融合学会編, (日本実業出版社, 2007), pp. 33-34

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 康明 (HAYASHI YASUAKI)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
研究者番号: 30243116

(2) 研究分担者

高橋 和生 (TAKAHASHI KAZUO)
京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・
准教授
研究者番号: 50335189

白谷 正治 (SHIRATANI MASAHARU)
九州大学・システム情報科学研究所・教授
研究者番号: 90206293

三重野 哲 (MIENO TETSU)
静岡大学・理学部・教授
研究者番号: 50173993

石原 修 (ISHIHARA OSAMU)
横浜国立大学・工学研究院・教授
研究者番号: 20313463

東辻 浩夫 (TOTSUJI HIROO)
岡山大学・名誉教授
研究者番号: 40011671

上村 鉄雄 (KAMIMURA TETSUO)
名城大学・理工学部・教授
研究者番号: 20023731

足立 聡 (ADACHI SATOSHI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究本部・准教授
研究者番号: 80358746 (H21: 連携研究者)

依田 眞一 (YODA SHIN-ICHI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究本部・教授
研究者番号: 00344276 (H21: 連携研究者)

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

佐藤 徳芳 (SATO NORIYOSHI)
東北大学・名誉教授

渡辺 征夫 (WATANABE YUKIO)
九州大学・名誉教授

Dr. Hubertus M. Thomas
Max Planck Institute, Germany

Prof. Gregor E. Morfill
Max Planck Institute, Germany

Dr. Vladimir I. Molotkov
Russian Academy of Sciences, Russia