

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540536

研究課題名(和文) ACトラップされた大容量複合帯電微粒子による強結合プラズマ物性研究の新しい展開

研究課題名(英文) Innovative research on strongly coupled plasma physics by using AC trapped large number of charged particles

研究代表者

庄司 多津男 (SHOJI, TATSUO)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50115581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ACトラップの四重極電場によって数万個の数十ミクロンの帯電微粒子を安定に閉じ込め、クーロン多体相互作用する粒子の集団現象、構造、揺らぎ、などを系統的に調べ、中性子星外郭の成分強結合プラズマの液体または固体、液体プラズマの物性等や、大自由度カオスの物理に対する新しい知見が得られた。主な結果は(1)強結合プラズマの固体の光学モードの音波分散特性を得た。(2)閉じ込め周波数、電場強度によって微粒子集団の固相、液相の分離する構造を見つけ微粒子密度の長時間にわたる揺らぎの観測により冪乗の周波数のパワースペクトルを得た。(3)結合度が強いと大偏差統計が実現することが観測された

研究成果の概要(英文)：AC trap of charged particles (few tens of thousands, few tens of micron in diameter) is developed to investigate collective phenomena, structure and fluctuation of particles, which are related to the phenomena predicted to be occurred in a crust of neutron star and, solid and liquid plasmas, and physics of large dimensional chaos. Main results are; (1)phonon mode in one component strongly coupled plasma was obtained. (2)Separation of particle structure to ordered and fluctuation (melted) regions was observed in AC frequency and voltage phase space. Power spectrum of long time density fluctuation ($1/f$) was observed. (3) Large deviation statistic of particle velocities are observed.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：ACトラップ クーロン多体相互作用 帯電微粒子 カオス 非線形 強結合プラズマ 揺動

1、研究開始当初の背景

白色矮星や中性子星の外殻などの高密度天体では、軽い電子が縮退して一様な背景電荷を形成し、高密度のため粒子間距離が非常に小さくなったイオンは強いクーロン相互作用を受けて振舞い、**一成分強結合プラズマ(OCP)**と呼ばれ、様々な物性を支配している。帯電した微粒子集団の振る舞いも強結合プラズマと同様な現象を持ち、宇宙に浮遊した帯電微粒子の凝集は惑星形成の初期の重要な課題であり、また地上では帯電して浮遊する微粒子は雲やほこりや煙なども広義の強結合プラズマの対象である。このような長距離多体相互作用の支配的な媒質は物理の普遍的な問題であり、ボルツマン統計には従わず、結晶等の平衡状態は研究されているが、揺らぎ、統計、流体的な巨視的振る舞い、ダイナミクスに関する研究はまだ十分に進んでいない。

2、研究の目的

この研究では我々が開発して来た AC 電場で大量の帯電させた微粒子を閉じ込める方法を発展させ、電荷量等の異なる多種類の微粒子の混合や、強結合プラズマの固相-液相界面のダイナミクス、多成分強結合プラズマの混合状態（合金配位または液体状態）の平衡、ダイナミクス、揺らぎ、速度分布関数などに関する強結合プラズマの微視的-巨視的な物理を解明する。

3、研究方法

ダストプラズマの様な微粒子に複雑な影響を与える媒質（プラズマ）を持たず、コロイドのような揺動や動的振る舞いを減衰させる液体媒質を

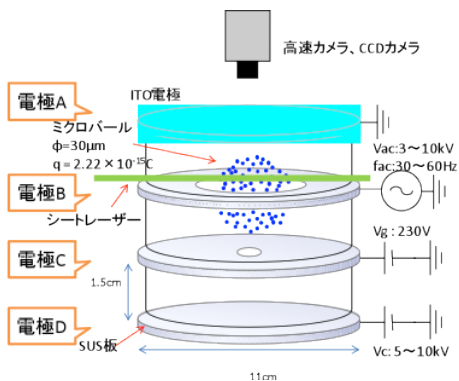


図1、AC trap 装置

用いず、且つ帯電量などの微粒子のパラメーターを正確に外部制御出来る強結合プラズマとして、AC 4重極電場 (ACトラップ) に閉じ込められた帯電微粒子があるが、我々はこれを改良して数万個以上の微粒子を、大気中で数週間にわたって長時間安定に閉じ込める配位を作った (図1)。これによって微視的な粒子の振る舞いや速度分布から、平均化された密度などの巨視的な物

理量に亘る観測が可能である。遮蔽誘電媒質がないために長距離相互作用の効果も大きく電荷の制御が簡単であり、長時間にわたる揺らぎや巨視的なスケールでの秩序構造形成のダイナミクスなどの物理現象を観測した。

4、研究成果

(1) 帯電微粒子群の集団構造

微粒子群の横からシート状のレーザーを照射し、高速カメラ、あるいは CCD カメラで上方から撮影を行った。

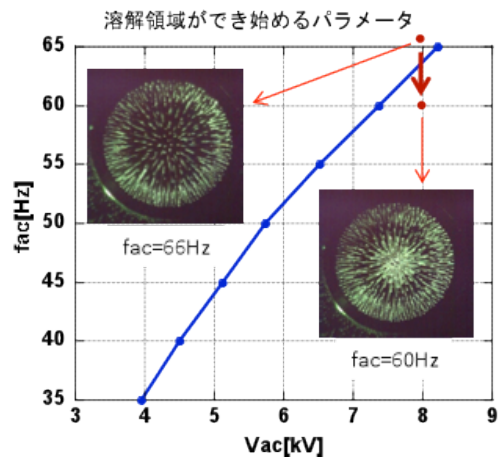


図2 fac-Vac 空間での中心近傍に溶解領域の発生するパラメータ

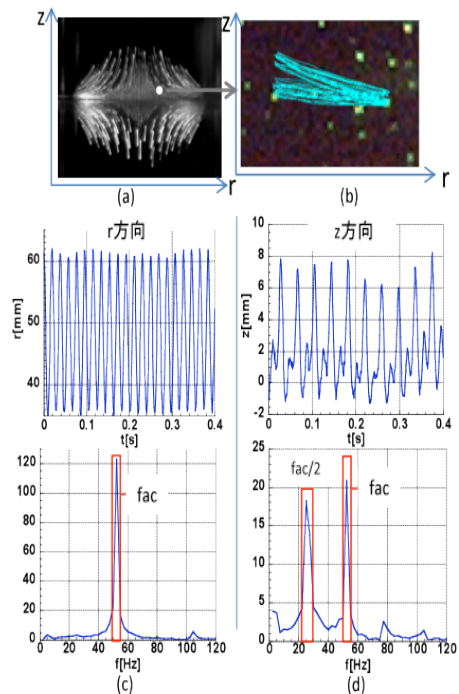
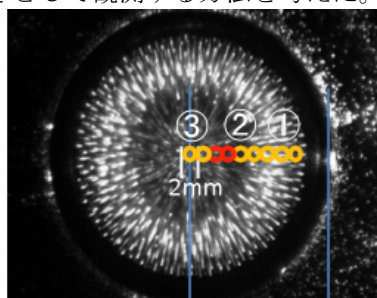


図3 溶解領域付近の微粒子軌跡の様子 (Vac=8.0kV, fac=52Hz) (a)長時間露光画像 (20×Tac) (b)微粒子の軌跡 20 周期分 (400ms) (c),(d) r,z 方向の粒子軌道の振動の周波数スペクトル

AC トラップによる閉じ込め力は非線形で、およそ $\propto \text{Vac}^2/\text{fac}^2$ である。そこで、Vac あるいは fac を変化させることにより、帯電微粒子群の構造の変化を調べ、微粒子の振舞いを解析した。AC の 10 周期分の露光時間で撮った、微粒子の振動を平均化した画像から微粒子群の運動の大きい溶解領域が出現する結果を図 2 に示す。図中の画像は微粒子群の断面をシートレーザーで照らし、上から高速カメラで撮影したデータから、微粒子の閉じ込め 10 周期分の軌跡の重ね合わせを行ったものである。さらに溶解領域の微粒子の振舞いを調べるために、帯電微粒子群を横から高速カメラを用いて撮影し、溶解領域付近の微粒子の軌跡を追跡した(図 3)。境界付近の微粒子は r 方向は AC 周波数に同期した振動をするが、z 方向には AC 周波数の 1/2 の周波数の振動が現れることが分かった。

(2) 帯電微粒子群の遅い揺らぎ

より長時間微粒子 1 つ 1 つの追跡を行うためには、1 秒あたり 1000 フレームの高速カメラの映像から追跡する方法では追跡の労力が大きく、映像自体のサイズも莫大になるため限界がある。そこでより効率的に長時間の揺らぎを観測するため、微粒子数個分の散乱光の時系列を微粒子の密度揺らぎとして観測する方法を考えた。



Vac=7.7kV, fac=50Hz

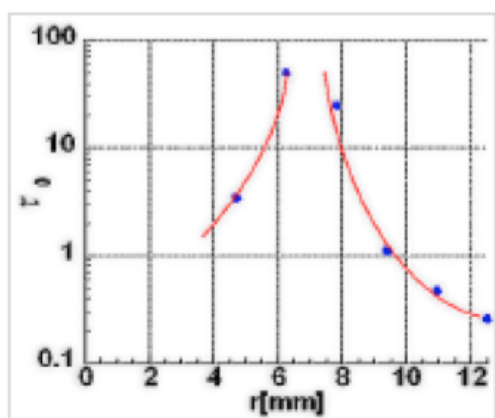


図 4 相関時間 τ_0 の径方向分布

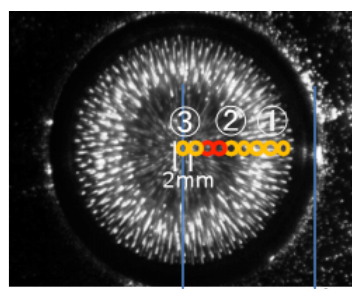
溶解領域の有無による帯電微粒子群の長時間の揺らぎのマクロな物理量を調べるため、微粒子群

の密度揺らぎを微粒子群断面を照射したシートレーザーの散乱光の時系列を測ることにより調べた。揺らぎのスペクトルより、揺らぎの相関時間を $\tau_0 \sim 1/\omega_0$ と見積もると溶解領域が有るときに τ_0 と r の関係が求められる(図 4)。

微粒子密度の境界付近である $r=7\text{mm}$ 付近を r_0 とすると、 $\tau_0 \sim 1/(r-r_0)^\alpha$ の形になっている。これは結晶領域と溶解領域の間を転移点 r_0 として長時間相関が強くなっていることを示しており、内側の多自由度なカオティック領域と外側の秩序的な領域の狭間で起きる特徴的な現象ではないかと考えられる。

(3) べき乗揺動指数

図 5 に揺らぎのパワースペクトルでのべき乗領域における累乗の値 $I(\omega) \propto \omega^{-K}$ を、中心を $r=0[\text{mm}]$ としてプロットしたグラフを示す。溶解領域無しの場合には径方向によらずほぼ一定で 1 である。一方溶解領域有りの場合は縁から次第に傾きが小さくなり、溶解領域の境界付近で不連続に変化していることが分かる。これは系の巨視的相転移と対応するのではないかと考える。溶解領域と秩序的な領域とで K の値が 0 と 1 に分かれているように見える。これは秩序的な領域とそうでない領域との違いを表わしているのではないかと考えられる。



Vac=7.7kV, fac=50Hz

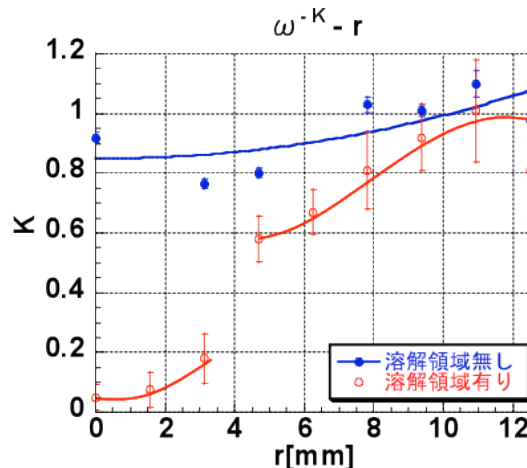


図 5 揺動スペクトルのべき乗指数の径依存における ω^{-K} 傾き

5、主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計2 件)

- ① R. Ishizaki, H. Hata, T. Shoji and Y. Furuta, Statistical properties of fluctuation of charged fine particles in an AC trap, Procedia IUTAM, 査読有、5巻、2012、234-239
- ② T. Shoji, T. Ishikawa and H. Hata, Self-organized chain of charged particle oscillators, American Journal of Physics and Applications Science PG, 査読有、3巻、2015、7-11

〔学会発表〕 (計9件)

- ① 諏訪部元樹、庄司多津男、秦浩起、上村 鉄雄、AC トラップ中の二成分帯電微粒子群の巨視的な振る舞い、日本物理学会秋季大会、2012、20pAA-11
- ③ 古田洋輔、庄司多津男、石崎龍、秦浩起、トラップ中の少数帯電微粒子群の秩序構造と転移、日本物理学会秋季大、2012、19aPS-16AC
- ④ 庄司 多津男、帯電微粒子系の非線形現象、プラズマ科学のフロンティア研究会、核融合科学研究、2012
- ⑤ 諏訪部元樹、古田洋輔、庄司多津男、秦浩起、石崎龍二、上村鉄雄、AC トラップ中の帯電微粒子の粒子数と電荷量に依存した構造と運動の解析、日本物理学会年会、2013、27pPSB-6
- ⑥ 石崎龍二、秦浩起、庄司多津男、AC トラップ中の少数帯電微粒子群の秩序構造と安定性、日本物理学会秋季大会、2013、28aKG-6
- ⑦ 庄司 多津男、荷電粒子群の非線形現象、日本物理学会秋季大会、2014、28pAE-6
- ⑧ 石崎龍二、秦浩起、庄司多津男、濱岡 翔太、日本物理学会秋季大会、2014
- ⑧ 濱岡翔太、庄司多津男、秦浩起、石崎龍二、上村鉄雄、ACトラップに閉じ込められた帯電微粒子群の3次元大域的構造の解析、日本物理学会秋季大会、2014、30aPS-41
- ⑨ 秦浩起、庄司多津男、濱岡翔太、帯電微粒子系の大自由度カオスが示す遅い運動、日本物理学会年会、2015、22pPSB-40

6、研究組織

(1)研究代表者

庄司多津男 (SHOJI, Tatsuo)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50115581

(2)研究分担者

有本英樹 (ARIMOTO, Hideki)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：80242882