

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：12611

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654120

研究課題名(和文)自己重力系の構造進化を記述する現象論的理論構築

研究課題名(英文)Constructing a phenomenological theory for evolution of structure in self-gravitating systems

研究代表者

田代 徹 (Tashiro, Tohru)

お茶の水女子大学・理学部・研究員

研究者番号：80436724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：準平衡状態における自己重力系の異なる相と異なる次元にわたる普遍性を見出した。異なる相にわたる普遍性：昨今観測結果として注目を浴びている、ブラックホールの質量(M)と周りの星の速度ゆらぎ(σ)との間のべき的關係。この関係が自己重力系の数値計算でも成立するか調べた結果、 σ の M 依存性に関して、自己重力系に存在する2つの異なる相(力学平衡状態と準平衡状態)にわたって普遍的な性質が見つかった。異なる次元にわたる普遍性：1, 2, 3次元自己重力系の準平衡状態での密度分布が、中心にコアを持ち外側でべき的な振る舞いをすることを明らかにした。更にこの普遍的な密度分布を一つの現象論的理論で記述することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Universalities among different phases or different dimensions of self-gravitating systems in the quasi-equilibrium state were found in this study.

Universality among the different phases: Observations that there are power law relations between a mass of black hole (M) and a velocity dispersion of surrounding stars (σ) have a lot of attentions. Then, we investigated whether such a relation holds or not in numerical simulations of self-gravitating systems, and so it was unveiled that the dependence of σ on M has a universality among different phases, the dynamical equilibrium state and the quasi-equilibrium state.

Universality among the different dimensions: We made it clear that the number densities in the quasi-equilibrium states for 1, 2 and 3 dimensional self-gravitating systems have a universality that they have a flat core around the center and decay with power law outside the core radius. Moreover, we derived these universal densities from one phenomenological theory.

研究分野：非平衡統計物理学

キーワード：自己重力系 準平衡状態 負の比熱 球状星団 銀河 分子雲フィラメント構造

1. 研究開始当初の背景

宇宙で見受けられる、銀河、球状星団などの天体には、たくさんの星が存在している。それらの構成要素を秩序だった構造にしている最大の要因は重力である。これはつまり、遮蔽効果がない引力だけで多様な（しかも特殊な）構造が生まれることを意味し、たいへん驚くべきことである。また自己重力系では、近距離力が支配的な実験室で観測されるようなシステムでは見ることのできない、特殊な現象である負の比熱が明らかになっている。

今までの自己重力系に関する研究は、各次元、各時間ステージに対して独立の理論が混在している。そういった現状を踏まえて、共通した1つの現象論的切り口で、自己重力系の特異な構造・現象を統一的に記述できる理論を構築することを目指した。

2. 研究の目的

(1) 重力版 Langevin 方程式を拡張し、他の次元、他の時間ステージも記述できるようにする。

(2) (1)の理論にエネルギー一定の拘束条件を加え、非開放系の自己重力系の構造進化を記述する。

(3) 非開放系の準定常状態で用いられている Tsallis の q 指数の物理的意味を明らかにする。

(4) 完成した理論を基に自己重力系の非平衡熱力学を構築し、負の比熱の意味を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) グラフィックスプロセッサを利用して、今までの自己重力系の数値計算で報告されていない時間ステージの計算を行い、構造進化の様子を数値的に捉える。

(2) 3次元開放系の準定常状態の記述に成功している重力版 Langevin 方程式を拡張し、数値計算の結果得られた構造進化の様子を記述できる理論を構築する。

(3) (2)で完成した重力版 Langevin 方程式から自己重力系の非平衡熱力学を構築し、その枠組みの中で自己重力系の特異な性質、負の比熱を説明する。

(4) (2)で完成した理論を用いて、Tsallis の q 指数の物理的意味づけを行う。

(5) 球状星団等の構造進化のシナリオの作成、ブラックホール、ダークマターの存在予想をする。

4. 研究成果

(1) 3次元自己重力系での負の比熱

3次元自己重力系の数値計算の結果、全工

ネルギーを増加させると、準平衡状態（平衡状態とは別の安定状態）における1粒子あたりの運動エネルギー（これを温度と定義した）が減少することがわかった。これは比熱が負であることを意味している。従来負の比熱は、1次元重力リングモデルや HMF モデルなど低次元長距離力系で確認されていたが、3次元自己重力系で負の比熱が確認されたのは他に例を見ない。

(2) M - 関係に基づいた力学平衡と準平衡状態にわたる普遍性の発見

昨今、ブラックホールの質量 (M) と球状星団や銀河の星たちの速度ゆらぎ (σ) との間にベキ的關係 (M - 関係) があることが明らかになっており、球状星団や銀河の構造進化を解明する手がかりとして期待されている。そこでこの関係が自己重力系の数値計算でも成立するか調べた。すると σ の M 依存性に関して、力学平衡にある系と部分的に2体緩和に達している（すなわち準平衡状態にある）系との間に、共通する特徴が確認できた。これは自己重力系に存在する2つの定常状態 力学平衡と準平衡状態 との間に普遍的な性質が見つかったことを意味する。

(3) 1, 2, 3次元にわたる準平衡状態での密度分布の普遍性

3次元自己重力系の準平衡状態での密度分布 中心にコアを持ちその外側でベキ的に減少 が安定であることは、研究代表者の先行研究や球状星団の観測結果で明らかである。そこで1, 2次元自己重力系での安定な密度分布はどのようなものかを数値計算で調べた。具体的には、初期条件をポリトロープ指数 n のポリトロープ解として、 n や初期ビリアル比を様々かえて、密度分布の変化を追った。その結果以下のことが明らかになった。初期ビリアル比が0の場合、3次元の様に、準平衡状態での密度分布がコアを持ちその外側でベキ的な振る舞いをする（ただしベキ指数は3次元とは異なる）、準平衡状態での分布はポリトロープ指数 n に依存せず普遍的、特に2次元の場合は、その普遍的密度分布は星間ガスのフィラメント構造（重力相互作用はその対称性により実行的に2次元）で観測されるそれと、ベキ指数を含め同一。つまり1, 2, 3次元にわたる準平衡状態での普遍的な密度分布を得ることが出来た。

次に次元に依らない自己重力系の統一的記述を目指し、一般次元で重力版 Langevin 方程式を構築し、それに対応する Fokker-Planck 方程式の定常解を求めた。すると、その結果は、先に述べた普遍的な密度分布とベキ指数も含めて整合性を持つことが明らかになった。これはつまり1, 2, 3次元にわたる自己重力系の普遍的な密度分布

が一つの現象論的理論で記述できたことになり、本研究の大きな目標が一つ達成されたことを意味している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

Tohru Tashiro, Universal quasi equilibrium state of self-gravitating systems not depending on dimensions, J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 574, 012154 (2015).

doi:10.1088/1742-6596/574/1/012154

(査読有)

Tohru Tashiro, Hiroe Minagawa and Michiko Chiba, Hierarchical logistic equation to describe the dynamical behavior of penetration rates, Physica A Vol. 430, 57-64 (2015).

doi:10.1016/j.physa.2015.01.076

(査読有)

Tohru Tashiro, Hierarchical Bass model, J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 490, 012181 (2014).

doi:10.1088/1742-6596/490/1/012181

(査読有)

Tohru Tashiro and Wakako Kakuta, How does the diffusion dynamics reconnect the magnetic field?, J. Phys. Sci. Appl. Vol. 3, 184-190 (2013).

(査読有)

Tohru Tashiro, Hiroe Minagawa and Michiko Chiba, New model describing the dynamical behaviour of penetration rates, J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 410, 012026 (2013).

doi:10.1088/1742-6596/410/1/012026

(査読有)

田代徹, 皆川紘恵, 千葉路子, 階層ロジスティック方程式とその応用 普及率の動的挙動のメカニズム, 力学系の作る集団ダイナミクス 12 (京都大学数理解析研究所講究録), 195-202 (2012).

(査読無)

田代徹, 皆川紘恵, 千葉路子, 普及率の動的変化を記述する階層ロジスティックモデル, 第 18 回交通流のシミュレーションシンポジウム論文集, 41-44 (2012).

(査読有)

[学会発表](計 13 件)

田代 徹 「自己重力系の普遍的構造とその背後の物理 II」日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 22 日, 早稲田大学 (東京都).

Tohru Tashiro, Universal structure of self-gravitating systems not de-

pending on dimensions and its physics, New Challenges in Complex Systems Science, 25 Oct. 2014, Waseda University (Tokyo).

田代 徹 「自己重力系の普遍的構造とその背後の物理」日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 8 日, 中部大学 (愛知県).

Tohru Tashiro, Universal quasi-equilibrium state of self-gravitating systems not depending on dimensions, 3rd International Conference on Mathematical Modeling in Physical Science 2014, 31 Aug. 2014, Madrid (Spain).

田代 徹 「2 次元自己重力系のポリトロープ解」日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学 (神奈川県).

田代 徹 「階層バスモデル」日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 28 日, 徳島大学 (徳島県).

Tohru Tashiro, Hierarchical Bass model, 2nd International Conference on Mathematical Modeling in Physical Science 2013, 1 Sep. 2013, Prague (Czech Republic).

Tohru Tashiro, M- relation in self-gravitating system, XXV IUPAP International Conference on Statistical Physics (StatPhys 25), 26 Jul. 2013, Seoul (Korea).

田代 徹 「自己重力系における M- 関係」日本物理学会 2013 年第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学 (広島県).

田代 徹 「大質量ブラックホールを含む天体における M- 関係」日本天文学会 2013 年春季大会, 2013 年 3 月 21 日, 埼玉大学 (埼玉県).

Tohru Tashiro, Hierarchical logistic model to describe penetration rates, 2012 International Conference on Modeling, Analysis and Simulation, 8 Nov. 2012, Meiji University (Tokyo).

田代 徹 「普及率の動的挙動を記述する新しいモデル」日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 19 日, 横浜国立大学 (神奈川県).

Tohru Tashiro, New model describing the dynamical behavior of penetration rates, International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, 6 Sep. 2012, Budapest (Hungary).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田代 徹 (TASHIRO, Tohru)

お茶の水女子大学・理学部・研究員

研究者番号: 80436724

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者

立川 崇之 (TAKAYUKI, Tatekawa)
福井大学総合情報基盤センター