

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2009

課題番号：18340114

研究課題名（和文） 長距離相互作用系の非平衡統計力学の構築

研究課題名（英文） Construction of non-equilibrium statistical mechanics for systems with long-range interactions

研究代表者

阪上 雅昭 (SAKAGAMI MASAOKI)

京都大学・大学院人間・環境学研究科・教授

研究者番号：70202083

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学

キーワード：長距離相互作用，負の比熱，ポリトロープ，準定常状態， q -変形パラダイム，重力多体系，HMFモデル，Tsallis エントロピー

1. 研究計画の概要

宇宙あるいは天体での物理現象は、重力が本質的な役割を果たすという点で地上の物理現象と大きく異なっている。球状星団に代表される、互いに重力で相互作用する N 個の質点系である重力多体系は、自己重力系の典型である。重力は（1）遠距離力である、（2）すべての物体に対して引力である、という2つの際だった特徴を持ち、Debye 遮蔽がないため本質的に長距離相互作用する系である。

申請者はこれまでの研究で、重力多体系の進化は重力の性質から非平衡になり、それはポリトロープ状態とよばれる準定常状態で記述できることを明らかにしてきた。ここでポリトロープ状態とは1粒子分布関数が q -変形を受けた Boltzmann 分布で与えられる状態である。さらに q -変形を受けた状態で準定常状態を記述しようとするアイデアを q -変形パラダイムとよぶ。

本研究では重力多体系以外の長距離相互作用系に対して q -変形パラダイムが有効性を研究し、さらに q -変形の起源を探ることを目的とする。

2. 研究の進捗状況

(1) ポリトロープ指数の発展方程式

以前の研究から断熱壁に囲まれた重力多体系の準定常状態はポリトロープ指数と密度比で記述されること明らかになっている。さらに全エネルギーが保存するので、準定常状態を表す分布関数はポリトロープ指数 n と

いう1個のパラメーターで記述される。また重力多体系の時間発展は Fokker-Planck 方程式を用いて解析できる。そこで本研究では上の Fokker-Planck 方程式を導く一般化された変分原理を利用した。変分の母関数に試行関数としてポリトロープ状態を代入しパラメータ n について変分をとることで n についての発展方程式を導出した。さらにこの n の発展方程式と N 体数値シミュレーションの結果を比較し、極めて良く一致することを示した。

(2) 負の比熱とポリトロープ

ポリトロープ状態による記述が、他の長距離相互作用系でも有効であることを示すため、2次元HMFモデルで数値シミュレーションを実行した。2次元HMFモデルでは、1次元HMFモデルと異なり2体衝突による緩和が存在する。この2体の緩和時間スケールで熱平衡状態に緩和してゆく準定常状態が存在することを確認した。またこの系は全エネルギーの値によって系の比熱が正の場合と負の場合が存在する。本研究では、数値シミュレーションにより、比熱が負の場合に限り、上の準定常状態がポリトロープ状態で記述できることを示した。

(3) 音のブラックホールの非平衡現象

ブラックホールは重力多体系とともに自己重力系の典型例である。また、ホーキング輻射や重力波放出など興味ある非平衡現象が

存在することが知られている。このようなブラックホールの非平衡現象と q -変形パラダイムに関連があるか否かは非常に興味ある問題である。その準備として、実験室で音のブラックホールをつくり、非平衡現象を検証する手法について研究した。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

(理由)

数値シミュレーションでの結果ではあるが、ポリトロープの出現する条件が負の比熱であることが明らかになった。また、”近距離相互作用系の研究を実施することで2温度状態からポリトロープへの移行の過程が理解できる”という今後の研究の明確な方向性が得られている。

4. 今後の研究の推進方策

(1) 相互作用の長距離性と q -変形パラダイム

これまでの研究で、重力多体系以外に、2体緩和の存在する2次元 Hamiltonian Mean Field (HMF)モデルにおいて準定常状態としてポリトロープ状態が存在することが数値シミュレーションにより示された。さらに、ポリトロープ状態が現れる条件が”比熱が負”であるという興味ある結果も得ている。本研究では、”負の比熱”および”長距離相互作用”がポリトロープ出現の条件であることを数値シミュレーションから確立する。

そのため、逆説的ではあるが、近距離相互作用系の数値シミュレーションも実施する。実は、近距離相互作用系でも引力であれば、負の比熱が現れることが知られている。また、この場合にも低エネルギーの粒子が集まってできるコアと高エネルギー粒子が空間的にほぼ一様に分布するハロー、すなわちコア・ハロー構造を出現する。このとき、コアとハローがそれぞれ温度の異なる Boltzmann 分布に従う、すなわち2温度状態になるという結果が1例ではあるが知られている。

そこで、本研究では湯川ポテンシャルのようにカットオフを有する系での数値シミュレーションを行う。カットオフの値を変化させることで、近距離系ではコアとハローは2温度状態に従うが、相互作用のレンジを伸ばすことでこの2つが分離できなくなり結果としてポリトロープが実現されることを示す。

(2) 運動論からの q -変形とポリトロープ状態の起源の研究

重力多体系および2次元HMFモデルと全

く異なる系で観測されたことで、ポリトロープ状態は比熱が負である系で普遍的に出現することが期待される。そこで何故分布関数が Boltzmann 分布からポリトロープへの q -変形を受けるのか、その機構を明らかにしなければならない。まずは Fokker-Planck 方程式等の解析方法が最も整備されている重力多体系で Boltzmann 分布まわりの摂動の性質を調べることで q -変形が生じる機構を研究する。これと平行して、HMFモデルの運動論的方程式を導出し、重力多体系と同じ解析を行うための基礎を構築する。

(3) 凝集する系への一般化

長距離相互作用する引力系では、一般的に凝集が起こりクラスターが形成される。惑星形成におけるダストの凝集や動物集団という、他の凝集系に対して q -変形パラダイムが適用できるか研究する。

5. 代表的な研究成果

(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)

(1) 奥住聡, 阪上雅昭, 実験室でブラックホールをつくる: 遷音速流を用いたブラックホールの模擬実験, 査読有, 日本物理学会誌, 63(11),(2008) pp.845-851

(2) S. Okuzumi, M. Sakagami, Quasinormal ringing of acoustic black holes in Laval nozzles: Numerical simulations, 査読有, Phys. Rev. D, (2007), pp.084927-1—084027-9

(3) A. Taruya, M. Sakagami, Description of quasi-equilibrium states in N-body self-gravitating systems, 査読有, Journal of Physics: Conference Series 31 (2006) pp.55-58

[学会発表] (計 16 件)

(1) 阪上雅昭, 2次元 Hamiltonian Mean Field Model の準定常状態, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008. 9. 23, 岩手大学

(2) 阪上雅昭, 自己重力系の非平衡物理, 研究会「熱場の量子論」, 2007. 9. 5, 京都大学基礎物理学研究所