

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 24 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21654026

研究課題名（和文）6次元ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション

研究課題名（英文）Numerical Simulations of Self-Gravitating Systems Through Collisionless Boltzmann Equation on Six-Dimensional Phase Space

研究代表者

吉川 耕司 (YOSHIKAWA KOHJI)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号：70451672

研究成果の概要（和文）：

6次元位相空間上での無衝突ボルツマン方程式を数値的に解くことによって、自己重力系の数値シミュレーションコードを開発し、世界で初めて科学的に意味のある規模での自己重力系の数値シミュレーションを行った。更に、N体シミュレーションと比較することによって、その妥当性及びN体シミュレーションに対する長所・短所を調べた。また、宇宙論的な大規模構造形成の数値シミュレーションを実行できるよう、宇宙論的共動座標系での無衝突ボルツマン方程式の数値シミュレーションにも対応し、その結果をN体シミュレーションと比較することで妥当性を確認することができた。

研究成果の概要（英文）：

We develop a numerical simulation code for self-gravitating systems which directly integrates the collisionless Boltzmann equation coupled with the Poisson equation on the six-dimensional phase space, and perform, for the first time, a set of numerical simulations of self-gravitating systems using the collisionless Boltzmann equation with a scientifically meaningful problem size. Furthermore, by comparing the results obtained from both of our numerical simulations and conventional N-body simulations, we confirm the validity of our numerical method and estimate its advantage and disadvantages over the conventional N-body method. We also adopt our method to numerical simulations of the large-scale structure formation in the universe by extending our implementation into the cosmological comoving frame, and confirm its validity again by comparing the results with those from conventional N-body simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	0	1,100,000
2010年度	900,000	0	900,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	300,000	3,300,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：数値シミュレーション・自己重力系

1. 研究開始当初の背景

銀河・銀河団・宇宙の大規模構造などの無衝突自己重力系の数値シミュレーションでは、過去 20 年間以上にわたって、物質の分布を超粒子の分布に置き換えてその運動を数値計算する N 体シミュレーションが採用されてきた。その他の手法としては、無衝突ボルツマン方程式を数値的に解く手法も存在し、N 体シミュレーションに見られる人工的な二体緩和や物理量に含まれるショットノイズなどの問題が存在しないなどの優位性は認識されていたが、必要なメモリ容量と計算コストが N 体シミュレーションと比較して膨大になるために、低次元の数値シミュレーションでしか行われてこなかった。

一方、近年注目されている宇宙大規模構造形成におけるニュートリノの無衝突減衰などの影響や銀河円盤などの自己重力系の永年進化を正確にシミュレーションするには、N 体シミュレーションでは困難で、無衝突ボルツマン方程式を直接数値的に解く手法が有効であり、そのような手法の開発が期待されていた。

2. 研究の目的

近年の計算機技術の向上によって、以前は「不可能」のレッテルを張られて試みられなかった無衝突ボルツマン方程式のフルシミュレーション（空間 3 次元 + 運動量 3 次元の 6 次元位相空間での数値シミュレーション）を世界で初めて行い、その妥当性の評価と N 体シミュレーションとの比較による長所・短所の見極めを目的とした。

また、宇宙の大規模構造形成の数値シミュレーションを実行するのに必要となる、宇宙論的な共動座標系での無衝突ボルツマン方程式の数値シミュレーションのコード開発及び実行を目的とした。

本研究の枠を超えた最終的な目的としては、宇宙初期に輻射と脱結合した非相対論的なニュートリノが宇宙の大規模構造の大規模構造形成において、ダークマターの密度揺らぎにニュートリノの大きな速度分散による無衝突減衰効果の痕跡が残ることが理論的に予想されるが、その無衝突減衰の効果を非線形領域まで考慮した数値シミュレーションを行うことである。これによって将来の大規模銀河探査によってニュートリノ質量に素粒子実験で得られるよりも厳しい制限を課すことが可能になる。

また、無衝突ボルツマン方程式は無衝突自己重力系だけではなく、Poisson 方程式の代わりに Maxwell 方程式と組み合わせることによって宇宙電磁プラズマの数値シミュレ

ーションを行うことも可能である。宇宙プラズマの分野では、Particle-In-Cell 法による粒子法の数値シミュレーションが主流であるが、N 体シミュレーションと同様の弱点を抱えている。無衝突ボルツマンを用いることによって、宇宙プラズマにおいて最大の問題となっている無衝突衝撃波における粒子加速等についてその機構を解明することも最終的な目的となる。

3. 研究の方法

6 次元位相空間上での無衝突ボルツマン方程式を解くために、位相空間を有限体積法で離散化し、方向分割によって無衝突ボルツマン方程式を 6 本の 1 次元移流方程式に帰着させて解く数値シミュレーションコードの開発を行った。また、N 体シミュレーションの結果と比較することによって、数値シミュレーションの結果の妥当性を評価した。無衝突ボルツマン方程式の数値シミュレーションでは、必要となるメモリ容量や計算コストから必然的に並列化されたシミュレーションコードを開発することが求められるが、高い並列化効率をもつシミュレーションコードを開発することも今後のスーパーコンピュータでより大規模な数値シミュレーションを行う上で重要であるため、並列化効率の向上も開発上の目標となる。

4. 研究成果

本研究では、6 次元位相空間上での無衝突ボルツマン方程式を有限体積法で離散化して直接数値シミュレーションすることに世界で初めて成功した。シミュレーションコードの開発には、プラズマ物理学の研究者が近年開発した分布関数の正值性・無振動性などを保証した 1 次元移流方程式の数値解法を援用した。並列化は、座標空間のみを賽の目に分割する領域分割方式を採用し高い効率の弱スケールリングを持たせることができ、さらに大規模な数値シミュレーションも可能である。

数値シミュレーション自体の妥当性を評価するためのテストシミュレーションとして以下の 4 つを実施した。

(i) 無衝突自己重力系の安定な定常解である King 球が、定常状態を保つことを確認するテスト

(ii) 一様な密度分布に密度揺らぎと速度分散を与えたときの、密度揺らぎの重力不安定性による成長と無衝突減衰 (Landau damping) による揺らぎの減衰が解析的な線形摂動理

論と一致することを確認するテスト

(iii) 系に一定の並進速度を与えた時にガリレイ不変性を保っていることを確認するテスト

(iv) 二つの King 球を衝突させたシミュレーションを行い、同じ初期条件から始めた N 体シミュレーションと同等の結果が得られるか確認するテスト

いずれのテストシミュレーションも我々の開発したシミュレーション手法が正しく自己重力系の数値シミュレーションが実行できていることを示した。

更に、宇宙論的な大規模構造形成の数値シミュレーションに我々の手法を応用するために、宇宙論的共動座標系での無衝突ボルツマン方程式を数値シミュレーションで直接解く手法を開発し、実際に数値シミュレーションを実行した結果と従来の N 体シミュレーションで得られた結果を比較して、正しくシミュレーションできていることを確認した。これによって、宇宙の大規模構造形成における非相対論的ニュートリノの無衝突減衰の効果を正確に数値シミュレーションすることが可能になった。

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)

- ① Akahori, T., Yoshikawa, K., “Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure in the Bullet Cluster 1E0657-56”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 2012, 64, 12 査読有
- ② Okamoto, T., Yoshikawa, K., Umemura, M., “ARGOT: Accelerated radiative transfer on grids using oct-tree”, Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, 2012, 419, 2855 査読有
- ③ Tanikawa, A., Yoshikawa, K., Okamoto, T., Nitadori, K., “N-body simulation for self-gravitating collisional systems with a new SIMD instruction set extension to the x86 architecture, Advanced Vector eXtensions”, New Astronomy, 2012, 17, 82 査読有
- ④ Prokhorov, D. A., Colafrancesco, S.,

Akahori, T., Million, E. T., Nagataki, S., Yoshikawa, K., “A high-frequency study of the Sunyaev-Zel'dovich effect morphology in galaxy clusters”, Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, 2011, 416, 302 査読有

⑤ Prokhorov, D. A., Dubois, Y., Nagataki, S., Akahori, T., Yoshikawa, K., “Unveiling the 3D temperature structure of galaxy clusters by means of the thermal Sunyaev-Zel'dovich effect”, Monthly Notice of the Royal Astronomical Society, 2011, 415, 2505 査読有

⑥ Prokhorov, D. A., Colafrancesco, S., Akahori, T., Yoshikawa, K., Nagataki, S., Seon, K.-I., “Can electron distribution functions be derived through the Sunyaev-Zel'dovich effect?”, Astronomy & Astrophysics, 2011, 529, 39 査読有

⑦ Akahori, Takuya; Yoshikawa, Kohji, “Hydrodynamic Simulations of Merging Galaxy Clusters: Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure”, 2010, Publications of the Astronomical Society of Japan, 62, 335 査読有

[学会発表] (計 3 件)

- ① 吉川耕司、“新しい SIMD 拡張命令セット Advanced Vector eXtensions を用いた高性能無衝突系 N 体計算ライブラリの開発”、日本天文学会 2011 年秋季年会、2011 年 9 月 21 日、鹿児島大学
- ② 吉川耕司、“6 次元位相空間上での Vlasov 方程式の直接計算による自己重力系の数値シミュレーション”、日本天文学会 2010 年秋季年会、2010 年 9 月 24 日、金沢大学
- ③ 吉川耕司、“衝突銀河団における Sunyaev-Zel'dovich 効果”、日本天文学会 2009 年秋季年会、2009 年 9 月 14 日、山口大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 耕司 (YOSHIKAWA KOHJI)
筑波大学・数理物質系・講師
研究者番号：70451672

(2)研究分担者

梅村 雅之 (MEMURA MASAYUKI)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：70183754