

氏 名	よし かわ こう じ 吉 川 耕 司
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2450 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 ・ 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Cosmological Hydrodynamic Simulations of Galaxies and Galaxy Clusters (銀河・銀河団の宇宙論的流体シミュレーション)
論文調査委員	(主 査) 教 授 稲 垣 省 五 教 授 大 谷 浩 助 教 授 太 田 耕 司

論 文 内 容 の 要 旨

この博士論文は宇宙論の数値流体シミュレーションを用いた銀河及び銀河団の形成・進化についての研究である。我々の宇宙に存在する銀河や銀河団は、宇宙初期のインフレーションにより発生した量子力学的な小さな密度揺らぎが重力不安定性により成長して形成されたと考えられている。この密度揺らぎの成長は非常に非線型性が強いために、一般には解析的に計算することは不可能で数値シミュレーションによる研究が不可欠である。従来のこの種の研究では宇宙の質量の大部分を占めると考えられる暗黒物質（ダークマター）の重力相互作用のみを考慮したシミュレーションが行われてきたが、申請者の研究はこれに加えて、我々が直接観測することができるバリオンの流体力学的効果を取り入れたものである。バリオンの流体力学的効果を取り入れることの利点は、我々が実際に観測する銀河や銀河団と直接比較可能な情報を数値シミュレーションで得ることができる点である。申請者は、自ら開発した宇宙論的な自己重力流体コードを用いて1辺が100Mpcという宇宙論的な領域でダークマターとバリオンの振る舞いを数値シミュレーションし、1) 銀河団の統計的性質の研究、2) 銀河の空間分布のダークマター分布に対する関係（バイアス）の研究を行った。

銀河団は我々の宇宙で最も大きな重力的に束縛された天体で、内部に千万度から1億度の高温プラズマが存在することがX線の観測で知られている。銀河団は質量が 10^{14} 乗から 10^{15} 乗太陽質量と非常に大きく、力学的タイムスケールが宇宙年齢に匹敵するため、銀河団の質量関数等の統計的性質は宇宙初期の密度揺らぎに非常に敏感に依存する。この性質を利用して銀河団ガスのX線観測から得られる温度関数やX線光度関数から、様々な宇宙論パラメータを決定する研究が行われている。この手続きには銀河団の質量と銀河団ガスの温度・光度の関係が必要になる。申請者は、遠方超新星や宇宙マイクロ波背景放射の観測から強く示唆される低密度宇宙において、世界で初めて統計的に有意となる領域で宇宙論的流体シミュレーションを実行し、銀河団の疑似サンプルを作成し、質量-温度関係やX線温度関数などの統計的性質を、統計的に意味のある大きさの領域で初めて調べた。その結果、銀河団の質量関数・X線温度関数は共に銀河団ガスの輻射冷却の有無に関わらず銀河団ガスの等温性や静水圧平衡を仮定した理論モデルとよく一致する事を明らかにした。これにより温度関数による宇宙論パラメータの決定はある程度精確であると言える。一方、光度関数は輻射冷却の強さやシミュレーションの分解能に非常に敏感で、理論モデルの予言は大きな不定性を有してしまっていることを明らかにした。

現在、2-Degree FieldやSloan Digital Sky Survey等の大規模な銀河の赤方偏移探査が行われており、これらの探査の目的は直接観測可能な銀河の分布からダークマターの質量分布を調べ、宇宙論パラメータや初期宇宙密度ゆらぎの性質を調べることである。この過程で重要になるのが、果たして銀河の分布はダークマターの分布を正確に反映しているかという問題である。近年の理論的及び観測的一連の銀河形成研究は、観測されている銀河分布とダークマター分布間の関係（バイアス）が非線型かつ確率論的であることを示唆している。その観測的証拠として、早期型銀河と呼ばれる銀河は晩期型銀河に比べて空間相関が強く、また銀河の数密度が高い領域では早期型銀河の占める割合が大きいという観測結果がある。申請者は、宇宙論的流体シミュレーションから決まる銀河の空間分布とダークマターの質量分布を調べ、10Mpc程度のスケール

では銀河のバイアスは従来の理論的予言通りダークハローのバイアスモデルと良く一致することを確認した。一方、銀河団などの高密度領域では銀河の分布はダークハローのバイアスモデルよりも数密度が低くなることを見出した。これは銀河団内の高温ガスによってバリオンの輻射冷却の効率が低くなり銀河形成が抑制されているためである。更に、申請者は銀河の形成時期によってバイアスの振る舞いが異なることを発見した。ダークマターの密度が高い領域において、古い銀河は新しい銀河よりも数多く存在することが分かった。また、古い銀河は銀河団スケールの大きなダークハローに偏在するのに対し、新しい銀河は比較的質量の小さいダークハローに存在するのである。一言で述べるなら、形成時期毎に銀河の分布が異なってくるのである。しかも、この傾向も、先の高密度領域における高温ガスによって銀河形成が抑制されることの一環として単純に理解できる。楕円銀河、渦巻銀河に類似したバイアスがあることを考えると、銀河の形成時期が銀河形態の起源の重要な要素であることが示唆される事を示した。

論文審査の結果の要旨

現代的な宇宙論及び宇宙スケールでの構造形成とその進化は、宇宙のごく初期に発生した量子力学的密度揺らぎの重力を介した成長と合体過程として理解されている。また、現在観測される宇宙の基本構成要素が銀河であることより、銀河の形成自体もこのパラダイムの上で記述される必要がでてくる。申請者によりまとめられた学位申請論文は、スーパーコンピュータでの大規模な計算をし、現存の計算機の最高の能力を発揮させることにより、この巨視的宇宙論的構造形成と微視的銀河形成の統一的記述を目指し実現した、非常に野心的かつ画期的なものである。

宇宙初期揺らぎは重力不安定性により成長し銀河そして銀河団は形成されたと考えられているが、この密度揺らぎの成長の非線型性は非常に強く、解析的な計算はほぼ不可能である。つまり、数値シミュレーションによる研究が本質的となってくる。今までの研究の大半では、宇宙の質量の大部分を占めると考えられる暗黒物質の重力相互作用のみを考慮した計算が殆んどであったが、これは、計算機が十分に発展していなかったことだけが原因ではなく、その計算パフォーマンスの向上が十分でなかったためでもある。一方、申請者は、計算アルゴリズムの性能を飛躍的に向上させ、暗黒物質の動的記述に加えて、我々が直接観測することができるバリオンの流体力学的効果を取り入れることに成功している。この申請者自身が開発した計算プログラムを最大限に活用することにより、具体的には、(1)銀河団の統計的性質の研究、(2)銀河の空間分布のダークマター分布に対する関係（バイアス）の研究が行われた。

(1)銀河団とは、内部に1千万度から1億度の高温プラズマを有し、質量は太陽質量の 10^{14} 乗から 10^{15} 乗と非常に大きく、さらに、力学的進化の時間尺度は宇宙年齢程度の自己重力系である。また、銀河団の質量関数等の統計的諸性質は宇宙初期の密度揺らぎを非常に良く反映している。これらの性質から、銀河団ガスのX線観測より得られる温度関数やX線光度関数をヒントに、様々な宇宙論パラメータ、つまり、宇宙自体の進化を把握することができるのである。ただし、このためには銀河団の質量と銀河団ガスの温度・光度の関係の起源を解明する必要がでてくる。本学位申請論文において申請者は、観測的に強く示唆される低密度宇宙において、世界で初めて統計的に有意となる大きなダイナミックレンジで宇宙論的流体シミュレーションを実行し、質量—温度関係やX線温度関数などの統計的性質を統計的に意味のある大きさの領域で調べることに成功した。その結果によると、銀河団の質量関数・X線温度関数は共に銀河団ガスの輻射冷却の有無に関わらず銀河団ガスの等温性や静水圧平衡を仮定した理論モデルとよく一致した。これにより温度関数による宇宙論パラメータの決定はある程度妥当であることが保証されたのである。さらに、光度関数は輻射冷却の強さやシミュレーションの分解能に非常に敏感であることから、理論モデルの予言の不定性も詳かにした。これらの成果から、申請者の行った数値シミュレーションの信頼性が他の研究で行われてきた数値シミュレーションに比べて格段に高いことが分かり、その結果非常に優れた業績を上げたことは大いに評価できる。

(2)大規模な銀河の赤方偏移探索により、直接観測可能な銀河の分布から暗黒物質（ダークマター）の質量分布を調べ、宇宙論パラメータや初期宇宙密度ゆらぎの性質を調べる事が可能になりつつある。しかし、銀河の分布がダークマターの分布を正確に反映している保証はない。一方、近年の理論的及び観測的の一連の銀河形成研究は、観測されている銀河分布と暗黒物質分布間の関係（バイアス）が非線型かつ確率論的であることを示唆している。その観測的証拠として、早期型銀河と呼ばれる銀河は晩期型銀河に比べて空間相関が強く、また銀河の数密度が高い領域では早期型銀河の占める割合が大きくな

っている。申請論文では、宇宙論的流体シミュレーションから決まる銀河の空間分布とダークマターの質量分布を調べ、10Mpc 程度のスケールでは銀河のバイアスは理論的に予言されるダークハローのバイアスモデルと良く一致することを見出す一方、銀河団などの高密度領域では銀河の分布はダークハローのバイアスモデルよりも数密度が低くなることを明らかにした。これは銀河団内の高温ガスによってバリオンの輻射冷却の効率が低くなり銀河形成が抑制されているためである。更に、ダークマターの密度が高い領域において、古い銀河は新しい銀河よりも数多く存在することを見出した。古い銀河は銀河団スケールの大きなダークハローに偏在するのに対し、新しい銀河は比較的質量の小さいダークハローに存在しているのである。特に、この傾向を高密度領域における高温ガスによって銀河形成が抑制されることの一環として理解できることを示し、その結果として、銀河の形成時期が銀河形態の起源に大きく関わり得る示唆を与えていることは高く評価できる。

以上のように、申請者はスーパーコンピュータの計算能率を最大限まで生かすことにより、宇宙論的構造形成をその構成天体である銀河及び銀河団の統計的性質の解明に成功した。これらの研究は、これからの大規模な観測的企画により生産されてくる大量の銀河そして銀河団のデータの統計的理解のための雛形ともなり得、その学問の進展に与えるインパクトも計り知れないものがある。よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として十分に価値のあるものと認める。

なお、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心とし、これに関連した研究分野について口頭試問を行った結果、合格と認めた。