博士（理　学）　羽　生　千亜紀

学位論文題名

# The nonextensive approach to the differential energy distribution of the universal density profile of dark halo

（ダークハローの微分エネルギー分布についての非加法的手法による研究）

## 学位論文内容の要旨

様々な観測的な事実から、宇宙には、電磁波によって直接観測できない質量、ダークマターが存在していることが明かとなっている．宇宙初期の元素合成の研究からバリオン物質の質量は限定されるため、ダークマターは、非バリオン物質であると考えられる．コールドダークマター (CDM) シナリオは、最も有力な宇宙の構造形成シナリオである．CDM は宇宙初期の熱エネルギーが 0 に近い、重力相互作用をする（弱い相互作用をしてもよい）素粒子であると考えられている．そのため、CDM 宇宙における構造形成は、初めに大変小さなスケールの密度ゆらぎが成長し、それが合体することを通じて、より大きなスケールの構造へ成長して行く階層的構造形成過程である．

このようにして、銀河、銀河団のダークマターの分布（ダークマターハロー）は、階層的に形成される．銀河団は、ほぼ力学平衡にある最も質量の大きい天体、つまり宇宙で最近形成された天体である．銀河団は形成（緩和）直後の状態にあるので、その緩和の過程を研究することは、宇宙の構造形成を理解する上で重要である．

銀河団の緩和は非線形現象であり、自己重力多体系の数値計算シミュレーションで調べられている．Navarro, Frenk, and White (1995,1996,1997, NFW) は、標準 CDM 宇宙、開いた CDM 宇宙、$\Lambda$ 項入りの CDM 宇宙など、様々な宇宙論パラメータの下で CDM の $N$ 体計算を行った．彼らは、ダークハローの密度分布が自己相似、$\rho(r) = \rho_0/(r/r_s)/(1+r/r_s)^2$ で表されることを示した．他の研究者もまた彼らの数値計算と良い一致を示した．この NFW プロファイルは、銀河や銀河団の形成の理解のために重要である．しかし、その物理的根拠は、依然十分研究されていない．それを明かにするため、われわれは、自己重力系の統計力学的な理解が必要であると考えた．このようなアプローチとして Lynden-Bell (1967) の試みがあるが、それには次の様な問題がある．

彼は、Boltzmann のエントロピーを最大化することにより、ダークマターに対して自己重力等温分布が得られる事を示した．しかし、この等温分布は、幾つもの問題を抱え、NFW プロファイルに一致しない．このことから、われわれは、自己重力多体系に対して、Boltzmann-Gibbs 統計を用いることが不適切であると考えた．

Boltzmann-Gibbs 統計の一般化の必要性は、長時間の記憶を持つ系や、長距離力の働く系や、多重フラクタル時空等の分野で多くの研究者により議論されている．その一つとして、Tsallis (1988) の統計力学がある．彼は、多重フラクタル時空で用いられる非加法的統計力学について研究した．彼の統計力学は、エントロピーの加法性がない．その統計力学の確率分布関数は、指数関数的ではなく、べき関数的である．Plastino and Plastino (1993)

は、長距離相互作用の働く系である星のポリトロープにこの統計力学を適用し、その後、広く応用されるようになった．この統計力学を用いて、ダークハローの統計的性質を理解できる可能性がある．

そこで、われわれは、NFW プロファイルが Tsallis 統計によって理解できるかどうかを調べた．系の統計力学を調べるには、分布関数を得る事が重要であるが、$N$ 体計算から分布関数を直接得るのは困難である．われわれは、$N$ 体計算から NFW プロファイルの微分エネルギー分布を求め、その統計的性汁について調べた．

本研究では、標準 CDM 宇宙の $N$ 体シミュレーションを行い、銀河団の形成を計算した．その結果から、微分エネルギー分布と、微分エネルギー分布をその質量で割った量であるフラクショナルな質量分布を求め、それが Tsallis のエスコート分布の形、$P(E,T') = P(0,T')[1+(1-q)E/T']^{q/(1-q)}$ に一致する事を明かにした．ここで、$T'$ は、温度パラメータ、$q$ は、エントロピー示数である．エントロピー示数は、$q = 0.6-0.7$ となった．Tsallis の統計力学では、物理量の期待値がエスコート分布で与えられ、$q$ は系のエスコート分布の形を変える重要なパラメータである．Tsallis の統計力学では、$q \longrightarrow 1$ の極限で、Boltzmann-Gibbs 統計が再現される．NFW プロファイルでは、$q = 0.6-0.7$ であることは、宇宙論的に形成されたダークハローでは Boltzmann-Gibbs 統計が成立していないことを意味している．微分エネルギー分布とフラクショナルな質量分布が、エスコート分布であることは、NFW プロファイルが形成された際のダークマターの過程が確率論的であることを示している．

$q = 0.6-0.7$ 以外の場合に、ダークハローの密度分布がどの様になるのかを次のように調べた．用いた手法は反復法である．異なる $q$ は、密度分布のカスプの傾きを変える．$q = 0.25 \sim 0.5$ では、ダークハロー中心部の密度部分は平坦になり、$q > 0.7$ では、NFW プロファイルよりも急な傾きとなった．最近の高解像度数値シミュレーションは、NFW プロファイルよりも急な密度分布のカスプを示している．これらは、$q = 0.75-0.8$ に対応する．Tsallis の統計力学を宇宙論的な構造に適用する試みは、Lavagno *et al.* (1998) によってなされている．彼らは、銀河団の特異速度分布の割合を、Tsallis のエスコート積分で説明することができることを明かにし、$q = 0.23$ を得ている．これは、われわれが得た値よりも小さい．系が緩和に近づくに連れて、系の $q$ が 1 に近づくという仮説がある (Tsallis 1999)．銀河団のダークマターの分布は、銀河団の特異な運動よりも緩和が進んでいることから、われわれの結果は、Lavagno *et al.* (1998) の結果と矛盾していないと考えられる．

われわれは、NFW プロファイルの分布関数を解析的に求めた．結果は等温分布関数とも、楕円銀河のモデルである King モデルの分布関数とも一致せず、われわれが得た分布関数は、高い束縛エネルギーにおいてカットオフがある形をしている．

今後の課題として、なぜ分布関数がそのような形を持つのかを研究する必要がある．そのため、Tsallis 統計以外の非加法的統計力学について検討する必要がある可能性がある．また、階層的集団化シナリオの下で $q = 0.6-0.7$ となる理由を研究する必要がある．そのために、階層的集団化以外の環境で形成される自己重力系について研究することが重要である．

# 学位論文審査の要旨

主　査　　教　授　　藤　本　正　行
副　査　　教　授　　石　川　健　三
副　査　　教　授　　和　田　　功
副　査　　助教授　　羽　部　朝　男
副　査　　助教授　　兼　古　　昇

学 位 論 文 題 名

## The nonextensive approach to the differential energy distribution of the universal density profile of dark halo

（ダークハローの微分エネルギー分布についての非加法的手法による研究）

宇宙の質量の大半はダークマターによって占められており、宇宙論的な構造形成にはダークマターが重要な役割を果たしていることが、これまでの研究で明らかにされている。ダークマターは、銀河や銀河団のまわりに集中しており、いわゆるダークハローを形成している。銀河が形成される過程では、まずダークハローが形成されて、それによる重力で集められたガスが冷却して星形成が起こると期待されることから、ダークハローの構造は銀河形成にとって重要と考えられているが、その構造について統一的な理解は得られていない。最近の宇宙論的な構造形成の数値計算による研究によって、ダークハローの構造は自己相似である可能性が指摘された。その後、この結果は多くの研究者によって確かめられたため、現在非常に注目されている。このように重要な指摘であるにもかかわらず、その物理的理由は明らかにされていない。

本学位論文の著者は、このダークハローの自己相似性の物理的理由を明きらかにするため、ダークマターが非加法的な統計力学に従うことで説明できる可能性に注目して研究した。

著者は、宇宙論的な構造形成の数値計算を宇宙論的な初期条件から出発して行い、相似的なダークハローが形成されることを確かめた。次に、その数値計算の結

果から、ダークハローに分布したダークマターの微分エネルギー分布を求め、これが非加法的統計力学で用いられているエスコート分布で近似できることを示した。著者が求めた微分エネルギー分布関数からダークハローの構造が再現できることを示し、この場合の微分エネルギー分布の重要なパラメータであるqパラメータの値が0.67であり、このqパラメータが1であると通常の統計力学であるボルツマン統計力学から予想されるダークハロー構造となることを解析的に示した。また、著者は微分エネルギー分布から求めた分布関数は、ボルツマン統計力学とも、有力な非加法的統計力学であるTsallis統計の分布関数とも異なっていることを示した。この結果は、ダークハローの性質を非加法的な統計力学で理解できる可能性をはじめて明らかにした研究であり、非加法的統計力学の課題を新たに提起した研究として評価される。

これを要するに、著者は宇宙物理学における宇宙論的な構造形成の問題にとって重要な、ダークハローの構造の自己相似性の可能性について新しい知見を得たものであり、宇宙物理学における宇宙論的な構造形成の研究に対して貢献するところ大なるものがある。

よって審査員一同は、著者が北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。