

## 別紙 4

報告番号	※ 甲 第 号
------	---------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目

Impacts of Supersonic Streaming Motion between Baryons and Dark Matter in the Dark Ages on Cosmological Structure Formation

(バリオン-ダークマター間の超音速相対運動が暗黒時代における宇宙論的構造形成に与える影響)

氏 名 浅羽 信介

## 論 文 内 容 の 要 旨

宇宙論において、星や銀河、銀河団などの構造がどのように形成されてきたのかを知ることは重要な研究課題である。ここ 20 年の宇宙マイクロ波背景放射や宇宙大規模構造の観測結果から、標準的な宇宙モデルである  $\Lambda$ CDM モデルが確立された。そして近年、宇宙の晴れ上がり以後の光源が全く存在しない時代である暗黒時代の構造形成や、宇宙で最初に形成した星や銀河に関する研究が盛んに行われている。また暗黒時代の終焉となる宇宙の再電離についても、その起源や時期など様々な面から精力的に研究されている。多くの理論的研究がなされる一方で、今までの観測ではこの時代を観測することは難しく、この時代の構造形成の物理を明らかにできるほどの観測データは未だにない。しかし、現在計画されている大型電波干渉計による観測によって、初代天体が形成される時期の直接観測が期待されている。この様な背景の中、将来観測の結果と比較可能な、暗黒時代から宇宙再電離期にかけての構造形成の詳細な理論モデルの構築が強く望まれている。初代天体形成が起きると考えられている宇宙初期での小スケールの構造形成の研究では、大規模構造形成の議論では無視されているようなバリオン物理の影響が重要になってくると考えられている。そのため、理論モデル構築においても、バリオン物理を適切に取り扱わなければならない。

申請者は、初代天体が形成される時期である暗黒時代や宇宙再電離初期における構造形成に着目し、特に Tseliakhovich & Hirata (2010)によって指摘された宇宙の晴れ上がり時に存在するバリオンとダークマター間の超音速相対運動が小スケールの構造形成に与える影響に関して研究を行った。この相対運動は、宇宙の晴れ上がり以前のバリオンはトムソン散乱によって光子と強く結合しており、ダークマターと違った速度場を持つことに起因する。また、相対運動の相関長はバリオン音響振動のスケール（およそ 100Mpc）と等しいため、初代星の形成などの議論が行われているような 1Mpc 以下の

小スケールの構造形成に対してはバリオンのダークマターに対する一様背景速度と見なすことができる。先行研究では線形摂動理論の枠組みの中で、相対速度の構造形成への影響を調べた。その結果、超音速相対速度の効果は圧力項の形で現れ、宇宙再電離期以前に  $10^8$  太陽質量以下のスケールの揺らぎの成長を抑制させることを示した。またこの他にも、相対速度の影響は環境効果と呼ばれる構造形成が起きる場所の周りの密度に依存するのではないかという先行研究がある。しかしながら、これらの線形理論の研究においては、フーリエ空間での密度揺らぎの成長について議論しており、実空間での構造形成に超音速相対速度が与える影響は不明瞭なところがある。また、初代天体の形成を議論する上では、ハローと呼ばれるダークマターの高密度領域の非線形成長に相対速度が与える影響が重要になってくる。

そこで申請者は N 体シミュレーションを用いて、相対速度のハローの非線形成長に与える影響の研究をおこなった。まず、シミュレーションの初期状態として粒子を一様に分布させ、その中に球対称のわずかなダークマターの高密度領域をつくり、孤立系でのハロー形成を再現した。そして、一様に分布している粒子のうちバリオンの存在割合に相当する数の粒子をバリオンとみなして、一様速度を加えることで、ハロー形成に相対速度が与える影響を調べた。その結果、相対速度がある場合でもハローの形成過程は近似的に球対称崩壊モデルで説明できることを確かめた。また、線形理論が予想する質量スケール以下のハローの形成時刻が遅れることがわかった。さらに、崩壊時刻の遅れは球内のバリオンの質量割合の変化に強い相関があることを示した。次に、超音速相対速度が宇宙再電離期以前のハローの数密度に与える影響を見積もった。ハローが形成される密度の閾値と初期密度パワースペクトルからハローの数密度を計算する方法として、**Press-Schechter** 理論がある。この理論において、シミュレーションから見積もった崩壊時刻の変化をハロー形成の臨界密度に変換しすることで、ハローの質量関数の変化を計算した。そして、この相対速度の効果により、 $10^8$  太陽質量以下のハローの数は従来予言されていた数よりも減少し、特に  $10^5$  太陽質量のハローについては半減するという結果を得た。最後に、この相対速度の効果によるハローの数密度の減少がハロー形成の周囲の密度にどのように依存するかを調べた。そのために、ハローへと重力崩壊するダークマターの高密度領域の周りの密度を変化させて、ハロー形成のシミュレーションをおこなった。結果として、ハローの周囲の密度が大きい場合、相対速度の影響が弱まることがわかった。また、この性質は宇宙論的シミュレーションの結果と一致することを確かめた。そして、環境効果を含め超音速相対速度がハローの数密度に与える影響を計算することに成功した。これらの結果はバリオンとダークマター間の相対速度が暗黒時代の構造形成に与える影響の基礎的な研究として大いに役立つと期待している。