

機関番号 : 13901

研究種目 : 若手研究 (B)

研究期間 : 2009~2010

課題番号 : 21740177

研究課題名 (和文) 宇宙構造形成におけるニュートリノの役割の解明およびその質量の決定

研究課題名 (英文) The role of neutrinos in large scale structure of the universe and the determination of their masses

研究代表者

市来浄与 (ICHIKI KIYOTOMO)

名古屋大学大学院理学研究科・助教

研究者番号 : 10534480

研究成果の概要 (和文) :

本研究は、将来の精密な観測との比較に耐えうる、有限質量のニュートリノ効果を考慮した非線形構造形成理論を徹底的に構築・整備することが目的である。主要な研究成果は、球対称な密度揺らぎの重力崩壊に及ぼすニュートリノ質量の効果を取り入れた計算コードを完成させたことである。これまで取り扱いが困難であったニュートリノの効果を我々は方程式系を波数空間と実空間に分割して解くことによってこれを可能とした。ニュートリノの質量により、 10^{15} 太陽質量の天体の数が 20%程度変化することが分かった。

研究成果の概要 (英文) :

We study the spherical, top-hat collapse model for a mixed dark matter model including cold dark matter (CDM) and massive neutrinos. By properly solving the Boltzmann equations for neutrino perturbations, we find that the neutrino cannot catch up with the nonlinear evolution of CDM plus baryon perturbations due to its large free-streaming velocity, and consequently slow down the top-hat collapse up to most massive cluster scales. Our finding of the spherical collapse model suggests that, when the initial density fluctuations are normalized to the cosmic microwave background anisotropies, the presence of massive neutrinos decreases the expected present-day abundance of massive clusters with virial masses $10^{15}M_{\odot}$ by more than about 20%.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,600,000	480,000	2,080,000

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：宇宙論、構造形成、ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

近年の太陽ニュートリノ・大気ニュートリノを始めとするニュートリノ振動実験の結果から、ニュートリノには質量があることが明らかになった。しかし、ニュートリノ振動実験は世代間の質量差の自乗を測ることができるが、その質量のスケールについては感度がないため、質量の大きさそのものは未だ分からず、現代物理学に残された大問題の一つである。

一方、宇宙背景ニュートリノは宇宙に最も多く存在する粒子の一つであり、宇宙の大規模構造の形成・進化に大きな影響を与えてきたと考えられている。そのため、ニュートリノの質量を制限する手法として、宇宙論的手法が注目されており、線形密度揺らぎ理論と大スケールの天文観測の比較から、およそ0.7eV程度の上限が得られている。この制限をさらに進めるものとして、大規模銀河サーベイから得られる、Ly α 雲や重力レンズ効果を用いた小スケールの密度揺らぎの観測が期待されている。特に重力レンズの観測は、日本が世界に先駆けて重要なデータを得るために観測計画が進みつつある。しかし、これまでの大スケールの研究と異なり、小スケールでは重力の非線形な効果が無視できないことが問題であった。

2. 研究の目的

1. で述べたように、宇宙論的観測からのニュートリノ質量への制限をさらに強めていくためには、重力の非線形効果を考慮することが大切になってくる。従って、N体重力計算などの大規模な数値的手法が、近い将来期待される精密な観測データと理論とを比較するために、ますます重要となるはずである。

したがって、本研究計画では、将来の精密な観測との比較に耐える、有限質量のニュートリノ効果を考慮した非線形構造形成理論を徹底的に構築・整備する。そして、実際に観測と比較することにより、ニュートリノ質量の検出・または世界で最も厳しい制限を得ることを目標とする。

3. 研究の方法

当初はこれまでに広く使われている既存の重力計算コードに、有限質量のニュートリノを導入して大規模なN体重力計算をする研究計画であった。しかし、研究を始めたのち、大規模な数値計算結果の妥当性を比較検証する研究が足りないことが明らかになった。従って、まず準備研究として、重力の非線形効果を取り入れたモデルとして比較的解析的に取り扱うことができると期待できる球対称重力崩壊モデルを構築することを目指すこととした。

ダークマター、バリオン、そしてニュートリノという複数構成要素を持つ球対称重力崩壊モデルを構築するにあたり、具体的な困難は大きく二つある。1つ目は宇宙が物質優勢期になり、密度揺らぎが崩壊を始める開始時刻では、これらの3成分のプロファイルが異なることである。特に、輻射優勢期に光子と強く結合しているバリオンと、無衝突で運動しているニュートリノは、ダークマターのプロファイルと比較してより一様分布に近い状態にある。これはその後のダークマターの運動にも影響するはずであり、正しく考慮することが必要である。この問題に対し、報告者は、線形摂動理論の予言と滑らかにつながることとした。具体的には、球対称な初期条件から既存の線形摂動を計算するコードを用いて物質優勢期までを解き、そのプロファ

イルを初期条件としてその後は非線形な方程式系を解くこととした。これにより、ダークマターの分布に対して、現実的なバリオンとニュートリノの分布を用意できたことになる（図1）。

二つ目は、ニュートリノは無衝突粒子であり、その熱運動が考えているスケールに対して無視できないという問題である。したがって、ニュートリノについては、流体の方程式の代わりにボルツマン方程式を直接解くことが必要になる。一般に流体の方程式に比べてボルツマン方程式は複雑であるが、幸いニュートリノの分布の揺らぎは小さいことが予想されるため、外力である重力ポテンシャルについては非線形効果を考慮するが、方程式自体は線形化することができる。従って、この困難については、ダークマター、バリオンについては従来どおり実空間で運動を追って非線形重力ポテンシャルを計算するが、同時にニュートリノについてはフーリエ空間でその時間発展を追うこととし、両者を各時刻でフーリエ変換することにより両立して解くことで解決した。

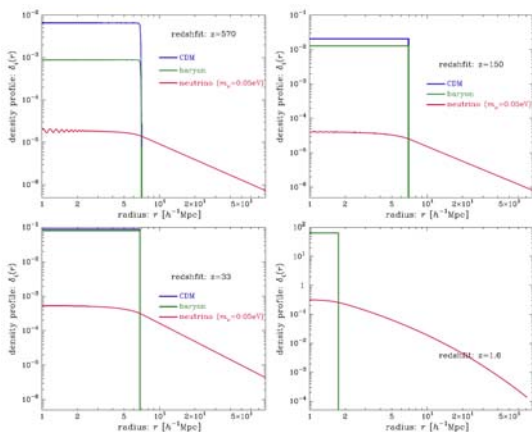


図1：ダークマター（青線）、バリオン（緑線）、ニュートリノ（赤色）の半径方向プロファイルの時間発展（左上→右上→左下→右下）。バリオンは次第にダークマターの揺らぎに引きずられ一緒に崩壊してゆくが、ニュートリノはその大きな熱速度のために現在でも崩壊せずに分布している。

4. 研究成果

まず、有限質量のニュートリノを含んだ球対称重力崩壊における密度揺らぎの時間発展が初めて計算できたことが研究成果の一つである。この発展の図を図2に示す。

光子との相互作用により小さな揺らぎであったバリオンの密度揺らぎは物質優勢期に入り急速にダークマターの揺らぎに追いついてゆく。ニュートリノも非相対論的な粒子になるに従い密度揺らぎを増幅していくが、その大きな熱速度のために、ダークマター、バリオンが重力崩壊する時刻でも崩壊することはない。また、その密度揺らぎの大きさはほぼ全ての時刻において1以下であり、ボルツマン方程式を線形化した妥当性を示している。また、図には示されていないが、初期のダークマターの揺らぎの大きさを固定すると、ニュートリノの有限質量の効果は重力崩壊の時刻を数パーセント遅らせることも定量的に示している。

非線形重力崩壊の効果を定量的に示す重要な量として臨界密度揺らぎ（critical overdensity, δ_c ）がしばしば用いられる。これは、球対称な密度揺らぎが重力崩壊する時刻まで線形理論を外挿した場合の線形密度揺らぎの値である。ダークマターだけのモデルでは解析解が存在しその値はおよそ1.686程度となる。臨界密度揺らぎは線形理論と非線形な構造形成を結び付けて予言する際に重要な物理量となるため、この値が球対称崩壊モデルにニュートリノやバリオンが加わった場合にどのように変わるかを調べることは重要である。

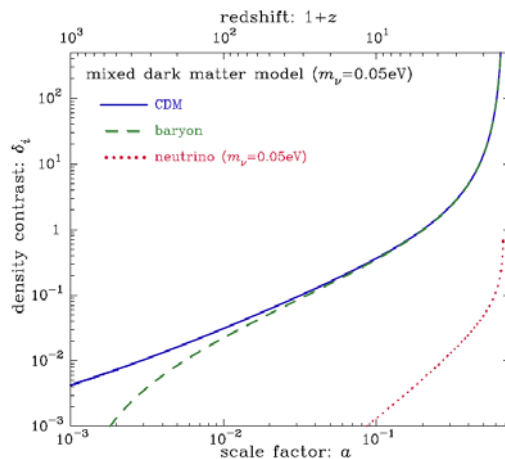


図2：天体の総質量を 10^{14} 太陽質量とし、ニュートリノ質量を 0.05eV とした例での、密度揺らぎの大きさの時間発展。線の色は図1と同様。

我々の計算を用いて求めた臨界密度揺らぎの値を図3に示す。

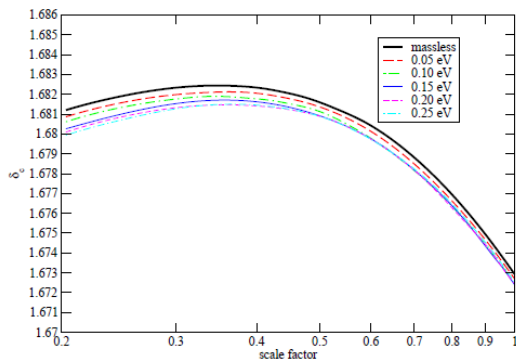


図 3: 重力崩壊時刻と臨界密度揺らぎの関係。色の違いはモデルパラメータであるニュートリノ質量の違いに対応している。天体の大きさは質量 10^{14} 太陽質量を仮定。

まず分かったことは球対称崩壊モデルに、初期条件として輻射優勢期の光子との相互作用を考慮したバリオン成分を導入すると、臨界密度揺らぎの値は小さくなることである。値が小さくなることは、対応する線形揺らぎの大きさが小さくても非線形な構造が形成されることを意味する。この結果は関連研究 Naoz&Barkana (2007) と無矛盾である。

さらに本研究で初めて明らかになったことは、ニュートリノ質量 ($< 0.2\text{eV}$) を加えていくと、臨界密度揺らぎはさらに数%程小さくなっていくということである。このことを考慮すると、天体の質量関数をニュートリノの質量ごとに予言することができるようになる。この計算結果を図 4 に示す。

図では、ニュートリノに質量がなかったと仮定した場合と、質量を 0.05eV , 0.1eV を持っていた場合の割合を描いてある。また点線は、ニュートリノの質量の効果、線形揺らぎの全体的な大きさのみに取り込んで近似した場合の理論線であるが、これは 10^{14} 太陽質量程度の天体で正しくないことが分かる。

また結果としてニュートリノ質量が 0.05eV (0.1eV) の場合、巨大な銀河団に対応する質量の天体で、20% (40%) 程度の天体数の減少が予言されることが分かった。これらの結果は、将来の大規模な重力 N 体計算などの結果と比較できるものである。

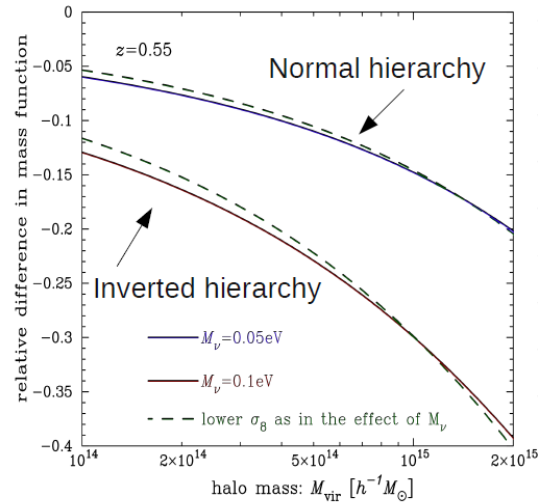


図 4: ニュートリノ質量ゼロの場合で規格化した、ニュートリノに質量があった場合の形成される天体の数 (割合)。色の違いはニュートリノ質量の違いを表わす。点線と実線の違いが、本研究で正しく考慮された効果によるものである。

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 10 件)

- (1) D.G. Yamazaki, K. Ichiki, T. Kajino, G.J. Mathews, Constraints on the neutrino mass and the primordial magnetic field from the matter density fluctuation parameter σ_8 , Physical Review D, 81, 10519 pl - p5, 2010, 査読有
- (2) K. Ichiki, R. Nagata, A Brute force reconstructin of the primordial fluctuation spectrum from five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe observations, Physical Review D, 80, 083002 p1-p8, 2009, 査読有
- (3) M. Shiraishi, K. Ichikawa, K. Ichiki, N. Sugiyama, M. Yamaguchi, Constraints on neutrino masses from WMAP5 and BBN in the lepton asymmetric universe, Journal of Cosmology and Astroparticle physics, 7, 005 p1-p17, 2009, 査読有

[学会発表] (計 6 件)

- (1) 市来淨與, 宇宙論的球対称重力崩壊におけるニュートリノ質量の効果、日本天文学会、2010年、金沢大学

- (2) Kiyotomo Ichiki, Weak lensing and Massive Neutrinos, APCTP-Topical Resarch-Program 2010, From Quarks to the Cosmos, 2010年, APCTP office, Soel, Korea
- (3) Kiyotomo Ichiki, A spherical collapse model with massive neutrinos, HORIBA international conference COSMO/CosPA, 2010, university of Tokyo

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市來淨與 (ICHIKI KIYOTOMO)

研究者番号：10534480

(2) 研究分担者 なし
()

研究者番号：

(3) 連携研究者 なし
()

研究者番号：