

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740115

研究課題名(和文) 銀河系内のダークマター微細構造の解明およびダークマター検出への応用

研究課題名(英文) Revealing fine structures of galactic dark matter halos and its implication for dark matter detection experiments

研究代表者

石山 智明 (Ishiyama, Tomoaki)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：90616426

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：大規模数値シミュレーションに基づき、最小スケールからその数百倍質量のダークマターハローの構造を調べた。最小ハローは密度プロファイルが半径の -1.5 乗程度のべきに比例するが、質量が大きくなるにつれて、べきは徐々に浅くなることを明らかにした。またハローの中心集中度は、従来使われてきたハロー質量と中心集中度の関係を表す、簡素なべき関数型のフィッティング関数とは矛盾し、後者は中心集中度を過剰評価することがわかった。新たに明らかとなったハローの構造に基づいて、ダークマター対消滅による銀河系全体のガンマ線フラックスの評価を行ったところ、従来のものに比べフラックスは最大67%程度大きくなることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The smallest dark matter halos are formed first in the early universe. According to recent studies, the central density cusp is much steeper in these halos than in larger halos. We present results of very large cosmological N-body simulations of the hierarchical formation and evolution of halos over a wide mass range, beginning from the formation of the smallest halos. We confirmed early studies that the inner density cusps are steeper in halos at the free streaming scale. The cusp slope gradually becomes shallower as the halo mass increases. The slope of halos 50 times more massive than the smallest halo is approximately 1.3. The cusp slope of halos above the free streaming scale seems to be reduced primarily due to major merger processes. The concentration, estimated at the present universe, is predicted to be 60-70, consistent with theoretical models and earlier simulations, and ruling out simple power law mass-concentration relations.

研究分野：天文学

キーワード：ダークマター サブハロー ダークマター検出 大規模シミュレーション 銀河

1. 研究開始当初の背景

ダークマターの自己重力によって束縛されたシステム、ダークマターハローは物理的な最小スケールから銀河団サイズまで広大なスケールにわたって、宇宙に存在している。シミュレーションに基づいた理論的な研究により、銀河や銀河団スケールのハローの構造は、密度プロファイルの中心のべきが半径の -1 乗程度に比例するカusp構造であると考えられてきた。一方、最近の研究により、最小スケールのハローでは中心がより高密度になる構造であることが示唆されている。しかし、なぜ小スケールと大スケールで違うか、中間スケールではどんな構造をしているかはよくわかっていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、大規模数値シミュレーションに基づき、最小スケールからその数百倍のハローの構造を明らかにし、小スケールと大スケールでハローの構造が異なるメカニズムを探る。そして小スケールのハローが、ダークマター対消滅によるガンマ線シグナルへ与える影響を評価する。

3. 研究の方法

100億個以上のダークマター粒子を用いた超大規模宇宙論的N体シミュレーションを行い、初期宇宙で形成する最小スケールからその数百倍のハローの形成を追う。また1000億個以上のダークマター粒子を用いた、大スケールのシミュレーションを行い、小スケールと比較するための理論テンプレートを作成する。

まず粒子数687億、領域400pcと200pcの超大規模宇宙論的N体シミュレーションを実行した(図1)。前者のシミュレーションの分解能は $3.42e-11$ 太陽質量であり、この規模の領域では我々の知る限り世界最高分解能である。これらシミュレーションデータを解析し、最小スケールから数百倍最小スケールまでのハローのカタログを得た。

4. 研究成果

ハローカタログを解析し、最小のハローである地球質量から数百倍地球質量のハローの密度構造を表すフィッティング関数を得た。また以下のことを明らかにした。

(i)地球質量のハローは密度プロファイルが半径の -1.5 乗程度のべきに比例するが、質量が大きくなるにつれて、べきは徐々に浅くなる(図2)。(ii)ハローの形成時刻とべきに大きな相関は見られない。(iii)質量が大きいハローでべきが徐々に浅くなるのは、ハロー同士の合体が主要なメカニズムである可能性が高い。(iv)ハローの内部質量の中心集中度を表すコンセンレーションというパラ

メータは、現在時刻の宇宙にスケールすると、およそ60-70程度である。これは様々な研究で良く用いられる、ハロー質量とコンセンレーションの関係を表す、簡素なべき関数型のフィッティング関数とは矛盾し、後者は中心集中度を過剰評価する。(v)銀河系ハローにおける、ダークマター対消滅によるガンマ線フラックスを評価することは非常に重要である。しかし従来は最小スケール付近の小ハローに、銀河スケールのような大きいハローの構造を当てはめて、フラックスを評価していた。今回高分解能シミュレーションによって新たに明らかとなった高密度な構造から評価を行った場合、従来のものに比べフラックスは最大67%程度大きくなることわかった(図3)。

また大スケールのハローの形成、進化過程についても調べた。最大で粒子数5500億、領域1.12Gpc/hの、世界最大規模の宇宙論的N体シミュレーションを行い、矮小銀河スケールから銀河団スケールまで、質量でおよそ8桁におよぶハローの進化をこれまでにない精度で明らかにした。そしてこれらハローの質量関数や成長率、合体史をハロー質量や赤方偏移、合体の質量比であらわすフィッティング関数を得た。またハローの形成時刻をハロー質量で表すフィッティング関数を得たが、形成時刻は質量関数などと比べ、宇宙論モデルに敏感であることが示唆された。

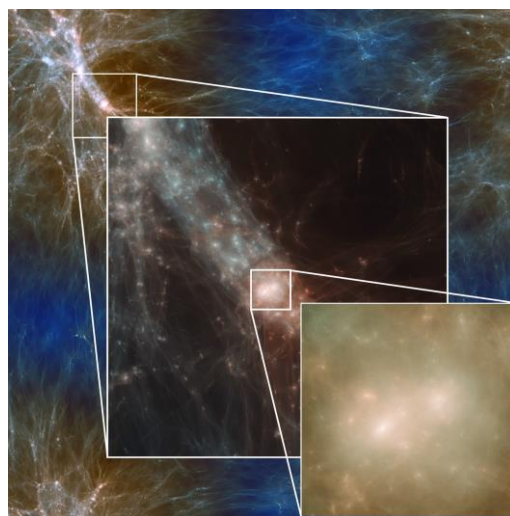


図1: 粒子数687億、領域400pcのシミュレーション

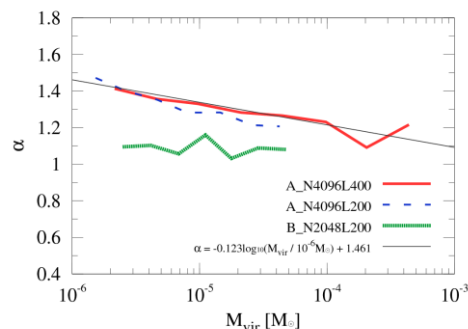


図2: ハロー質量と中心のべきの関係。赤線と

青線が最小スケールからのシミュレーション結果であり、緑線は大スケールを模倣するシミュレーション結果である。

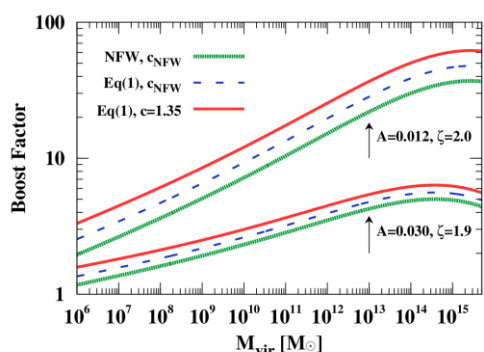


図 3: 対消滅のブーストファクター

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 “The ν^2 GC simulations: Quantifying the dark side of the universe in the Planck cosmology”, Ishiyama, T., Enoki, M., Kobayashi, M. A. R., Makiya, R., Nagashima, M., Oogi, T., 2015, PASJ, online, doi:10.1093/pasj/psv021, 査読あり
- ② “The impact of dust in host galaxies on quasar luminosity functions”, Shirakata, H., Okamoto, T., Enoki, M., Nagashima, M., Kobayashi, M. A. R., Ishiyama, T., Makiya, R., 2015, MNRAS, 450, L6–L10, doi:10.1093/mnras/slv035, 査読あり
- ③ “Constraints on warm dark matter from weak lensing in anomalous quadruple lenses” Inoue, K. T., Takahashi, R., Takahashi, T., Ishiyama, T., 2015, MNRAS, 448, 2704, doi:10.1093/mnras/stv194, 査読あり
- ④ “24.77 Pflops on a Gravitational Tree-Code to Simulate the Milky Way Galaxy with 18600 GPUs”, Bédorf, J., Gaburov, E., Fujii, S. M., Nitadori, K., Ishiyama, T., Portegies Zwart, S., SC '14 Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, 2014, doi:10.1109/SC.2014.10, 査読あり
- ⑤ “Anti-hierarchical evolution of the AGN space density in a hierarchical universe”, Enoki, M., Ishiyama, T.,

Kobayashi, M. A. R., Nagashima, M., 2014, The Astrophysical Journal, 794, 69–76, doi:10.1088/0004-637X/794/1/69, 査読あり

- ⑥ “Hierarchical Formation of Dark Matter Halos and the Free Streaming Scale”, Ishiyama, T. 2014, ApJ, 788, 27, doi:10.1088/0004-637X/788/1/27, 査読あり
- ⑦ “The connection between the cusp-to-core transformation and observational universalities of DM haloes”, Ogiya, G., Mori, M., Ishiyama, T., Burkert, A. 2014, MNRAS, 440, L71, doi:10.1093/mnrasl/slu023, 査読あり
- ⑧ Rieder, Steven; Ishiyama, Tomoaki; Langelaan, Paul; Makino, Junichiro; McMillan, Stephen; Portegies Zwart, Simon: “Evolution of star clusters in a cosmological tidal field” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 436. 3695–3706 (2013), doi:10.1093/mnras/stt1848, 査読あり
- ⑨ Ishiyama, Tomoaki; Rieder, Steven; Makino, Junichiro; Portegies Zwart, Simon; Groen, Derek; Nitadori, Keigo; de Laat, Cees; McMillan, Stephen; Hiraki, Kei; Harfst, Stefan: “The Cosmogrid Simulation: Statistical Properties of Small Dark Matter Halos” The Astrophysical Journal 767. 146–159, doi:10.1088/0004-637X/767/2/146, 査読あり
- ⑩ Ishiyama, Tomoaki; Nitadori, Keigo; Makino, Junichiro: “4.45 Pflops Astrophysical N-Body Simulation on K computer — The Gravitational Trillion-Body Problem” SC '12 Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Article No. 5, 2012 doi:10.1109/SC.2012.3, 査読あり

[学会発表] (計 18 件)

- ① 石山智明, 「大規模シミュレーションと大規模データ」, 第 27 回 理論懇シンポジウム (2014 年 12 月 24 日~26 日, 国立天文台, 三鷹市)

- ② 石山智明, 「New Numerical Galaxy Catalog (ν^2 GC) Model における超大規模宇宙論的 N 体シミュレーション」, 平成 26 年度 CfCA ユーザーズミーティング (2015 年 1 月 20 日~21 日, 国立天文台, 三鷹市)
- ③ Ishiyama, T. “Structures of Dark Matter Halos Near the Free Streaming Scale and Their Impact on Indirect Detections”, (poster), Fifth International Fermi Symposium (Oct 20-24, 2014, Nagoya, Japan)
- ④ 石山智明, 「New Numerical Galaxy Catalog (ν^2 GC) Model . II. 超大規模宇宙論的 N 体シミュレーション」, 日本天文学会 2014 年秋季年会 (2014 年 9 月 11 日~13 日, 山形大学, 山形市)
- ⑤ Ishiyama, T. “Hierarchical Formation of Dark Matter Halos and the Free Streaming Scale”, IAUS308: The Zeldovich Universe: Genesis and Growth of the Cosmic Web (Jun 23-28, 2014, Tallinn, Estonia)
- ⑥ 石山智明: “ペタフロップス級 N 体シミュレータの開発 —ダークマターの超大規模シミュレーション— 「京」における高速化ワークショップ(招待講演). 理化学研究所 計算科学研究機構
- ⑦ 石山智明: “Supercomputer Simulations of Structure Formation in the Universe” Taiwan-Japan Symposium on Celestial Mechanics and N-Body Dynamics(招待講演). (20131206-20131208). 台湾 国立清華大學
- ⑧ 石山智明: “スーパーコンピューターの中で生まれる宇宙” 日本物理学会 2013 年度 大阪支部公開シンポジウム(招待講演). 甲南大学
- ⑨ 石山智明: “最小のダークマターハローからの、階層的構造形成” 2013 年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクト・ユーザーズミーティング. (20140128-20140129). 国立天文台
- ⑩ 石山智明: “最小スケールからはじまる階層的ダークマターハロー形成” 日本天文学会 2013 年秋季年会. (20130910-20130912). 東北大学
- ⑪ 石山智明: “The formation and evolution of earth-mass dark matter microhalos and their impact on indirect probes of dark matter” Probes of Dark Matter on Galaxy Scales. (20130714-20130719). Monterey, USA
- ⑫ 石山 智明: “ペタフロップス級宇宙論的 N 体シミュレーション” 2012 年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクト・ユーザーズミーティング. (20121211-20121212). 国立天文台
- ⑬ 石山 智明: “ダークマターシミュレーション” 第 25 回理論懇シンポジウム(招待講演). (20121222-20121224). つくば国際会議場
- ⑭ 石山 智明: “Large scale dark matter simulation” ALMA 時代の宇宙の構造形成理論: 第 1 世代から第 n 世代へ(招待講演). (20130126-20130128). 北海道大学
- ⑮ 石山 智明: “京速計算機による無衝突系重力多体シミュレーション” 日本天文学会 2012 年秋季年会. (20120919-20120921). 大分大学
- ⑯ 石山 智明: “The Gravitational Trillion-Body Problem on K computer” The Fifth East Asian Numerical Astrophysics Meeting (EANAM 2012). (20121029-20121102). 京都大学
- ⑰ 石山 智明: “Petascale Cosmological N-body Simulations” Conference on Computational Physics (CCP2012). (20121014-20121018). ニチイ学館
- ⑱ 石山 智明: “The Formation and Evolution of First Dark Matter Microhalos” FIRST STARS IV - From Hayashi to the Future. (20120521-20120525). ハートピア京都

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石山 智明 (ISHIYAMA, Tomoaki)
筑波大学・計算科学研究センター
研究者番号: 90616426