

平成 27 年 5 月 1 日
国立大学法人 千葉大学
自然科学研究機構 国立天文台

スーパーコンピュータによる、宇宙初期から現在に いたる世界最大規模のダークマターシミュレーション

概要

千葉大学、東京経済大学、愛媛大学、東京大学、文教大学による研究グループは、理化学研究所計算科学研究機構のスーパーコンピュータ「京（けい）」^{*1} と、国立天文台の「アテルイ」^{*2} を用いた世界最大規模の宇宙の構造形成シミュレーションを行い、宇宙初期から現在にいたる約 138 億年のダークマターの構造形成、進化過程を従来よりも格段に良い精度で明らかにしました。本成果は、日本天文学会刊行の欧文研究報告誌、*Publications of the Astronomical Society of Japan* 電子版に 5 月 1 日に掲載されます。

背景

宇宙には、われわれが直接見ている物質（バリオン^{*3}）のほかに、ダークマターと呼ばれる物質が質量で 5 倍程度存在するといわれています。ダークマターは重力でのみ相互作用し、宇宙の重力的な構造形成、進化の主要な役割を果たしています。そして重力によりダークマターハロー（以下、ハロー）とよばれる巨大な構造をつくっており、その大きさは、ハロー内部に存在する、光り輝く銀河のおよそ 10 倍にもなると考えられています。

ハローはまず小さいものから形成され、それらが合体を繰り返すことで大きく成長していきます。このように、階層的に構造を形成しながら、ハローの中でガスが冷えて収縮して星が誕生し、銀河や銀河団などの巨大な天体が形成していったと考えられています。またハローの合体に続いてハロー内部の銀河が合体すると、大量のガスが銀河中心に存在するブラックホールに供給され、ブラックホールが成長するとともに、活動銀河核^{*4}として光り輝いたと考えられています。

ハローの空間分布をシミュレーションから明らかにすることで、銀河や活動銀河核の空間分布も推定することができます。ところが、生まれて間もない宇宙では、まだ構造が十分には発達しておらず、銀河や活動銀河核を宿すような大きいハローは多くありません。このようなハローの進化を解明するためには、より広大な宇宙空間をシミュレーションし、たくさんのハローが現れるようにする必要があります。しかし、これまで世界中で行われてきたシミュレーションでは、用いる粒子数が不足していて、ひとつのシミュレーション粒子の質量が銀河に匹敵するほど大きくなってしまい、ハローの構造を理解するには不十分でした。

研究手法と結果

スーパーコンピュータ「京」や、「アテルイ」の強力な計算パワーを活かし、宇宙初期から現在にいたる約 5500 億個ものダークマター粒子の重力進化を計算しました。計算した空間サイズは、最大で一辺がおよそ 54 億光年にも及ぶ広大なものです。これほど大きい空間でのシミュレーションとしては世界最高の分解能であり、銀河スケールのハローの階層的形成を追うシミュレーションとしては世界最大です。

用いた重力多体シミュレーションコード、**GreM^{※5}** は、研究グループのメンバーが開発してきたもので、ハイ・パフォーマンス・コンピューティングに関する国際会議 SC12 (2012 年、米国・ソルトレイクシティ開催) で、ゴードン・ベル賞を受賞しました。

シミュレーション結果から、ハローを検出し、ハローの階層的構造形成史をモデル化しています。データはおよそ 1 ペタバイトにもおよびます。これほどのビッグデータになると、解析するだけでもスーパーコンピュータの利用が欠かせません。

今回、最大規模のシミュレーションの他に、空間サイズやひとつのシミュレーションダークマター粒子の大きさが異なる複数のシミュレーションを行いました。そうすることで、質量スケールに換算しておよそ 8 桁にもおよぶ範囲でのハローの構造形成史をモデル化することが可能となりました。初期宇宙から現在にわたって、矮小銀河から銀河団におよぶ多種多様な天体の形成、進化過程、そして空間分布を探ることができるようになったのです。

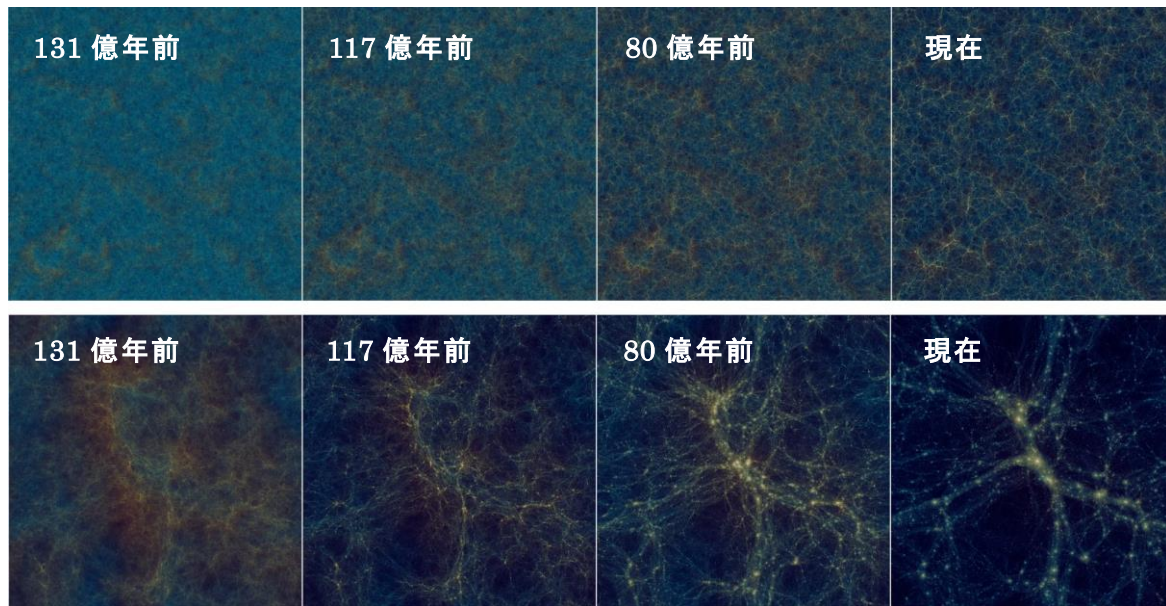


図 1：ダークマターの分布の進化

明るさはダークマターの空間密度を表し、明るいところは密度が高くなっています。宇宙が生まれてすぐはほぼ一様（左）ですが、時間が経つにつれて（順番に右へ）重力により集まり、大きな構造が形成されていきます。上段と下段は空間スケールが異なる 2 種類のシミュレーションで、上段は一辺約 54 億光年、下段は一辺約 3.3 億光年です。

今後の展望

シミュレーションではダークマター分布の重力的な進化のみ解き、ハローの階層的構造形成史をモデル化しました。現在、シミュレーションから得られたハローの進化史の上で、準解析的銀河形成モデルという手法を用いてバリオンの進化を解いています。そして我々が目にする銀河や活動銀河核などの大規模天体サーベイ観測と直接比較可能な、様々な天体の疑似カタログを整備し、公開していきます。

本研究は、HPCI 戦略プログラム 5—物質と宇宙の起源と構造（代表機関：筑波大学計算科学研究センター）のプロジェクトとして実施されました（課題番号：hp120286、hp130026、hp140212）。また科学研究費補助金（課題番号：24740115、25287041）、山田科学振興財団の援助を受けて実施されました。



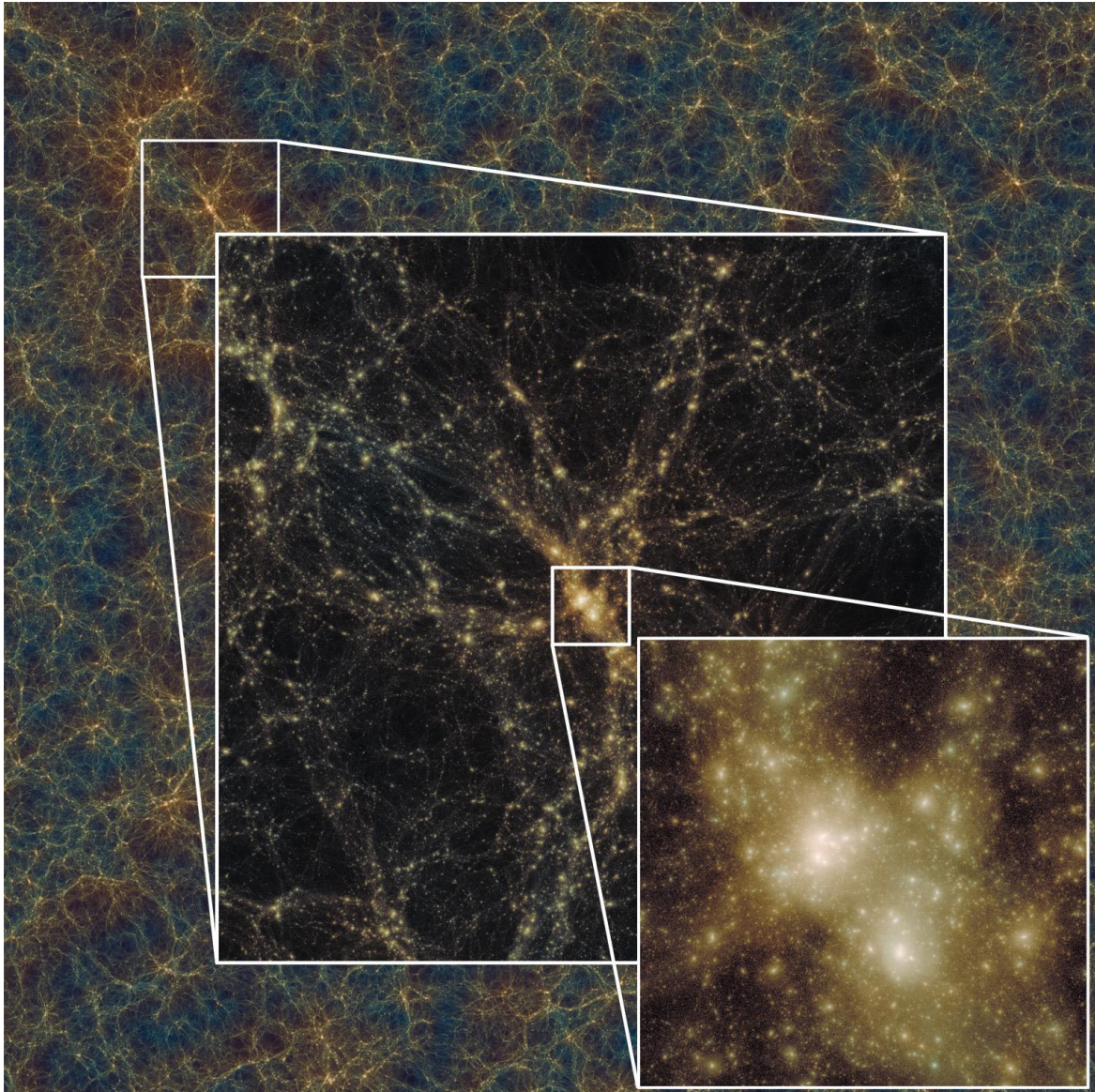


図 2 : 現在の宇宙でのダークマター分布

図 1 右上のパネル一部を順に拡大しました。右下はこのシミュレーションで形成した一番大きい銀河団サイズのアローです。多くのアローが形成され、その中心には銀河が、さらに銀河中心にはブラックホールが存在していると考えられています。

発表雑誌

雑誌名 : Publications of the Astronomical Society of Japan

タイトル : The ν^2 GC Simulations : Quantifying the Dark Side of the Universe in the Planck Cosmology

著者 : 石山智明 (千葉大学)、榎基宏 (東京経済大学)、小林正和 (愛媛大学)、真喜屋龍 (東京大学)、長島雅裕 (文教大学)、大木平 (文教大学)

DOI : 10.1093/pasj/psv021

参考資料

・シミュレーションデータの一部や画像は、以下の WEB サイトで公開されています。

<http://www.imit.chiba-u.jp/faculty/nngc/>

・国立天文台 4 次元デジタル宇宙プロジェクトによるムービー

http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/DarkMatterHalo2_v2.html

・最大のシミュレーションのムービー

<https://www.youtube.com/watch?v=kndzioHG8Uc>

本件に関するお問い合わせ先

千葉大学統合情報センター 石山智明

Tel : 043-290-3543

E-mail : ishiyama@chiba-u.jp

用語解説

※1 スーパーコンピュータ「京」

文部科学省が推進する「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（HPCI）の構築」プログラムの中核システムとして、理研と富士通が共同で開発を行い、2012年9月に共用を開始した計算速度10ペタフロップス級のスーパーコンピュータ。「京（けい）」は理研の登録商標で、10ペタ（10の16乗）を表す万進法の単位であるとともに、この漢字の本義が大きな門を表すことを踏まえ、「計算科学の新たな門」という期待も込められている。

※2 「アテルイ」

国立天文台天文シミュレーションプロジェクト（<http://www.cfca.nao.ac.jp>）が運用する天文学専用のスーパーコンピュータ（Cray XC30）。理論演算性能は1.058ペタフロップス（1ペタは10の15乗）で、天文学の数値計算専用機としては世界最速である。岩手県奥州市にある国立天文台水沢キャンパスに設置されており、平安時代に活躍したこの土地の英雄アテルイにあやかり命名された。「勇猛果敢に宇宙の謎に挑んで欲しい」という願いが込められている。

※3 バリオン

3つのクォークにより構成される粒子の総称。アップクォーク 2つとダウクォーク 1つから陽子、アップクォーク 1つとダウクォーク 2つから中性子ができる。

※4 活動銀河核

一部の銀河は中心部からエネルギーの大部分を放出している。この部分は活動銀河核と呼ばれ、銀河中心に存在する巨大ブラックホールに物質が落ち込み、明るく輝いていると考えられている。

※5 重力多体シミュレーションコード GreeM

粒子間の重力相互作用を高速に解き、その時間発展を追うシミュレーションコード。TreePM 法と呼ばれる、近距離力を Tree 法、遠距離力を Particle-Mesh (PM) 法で計算するアルゴリズムを用いている。10 万近い並列度まで非常に効率良く動作し、「京」のほぼ全体を用いて、5.67 ペタフロップスの実効性能を達成した。

参考 URL : <https://www.jicfus.jp/jp/121116pressrelease/>