

A visualization of the cosmic web, showing a complex network of filaments and nodes of matter. The background is a deep blue-green, with a central bright yellow-orange cluster. The filaments are composed of numerous small, glowing points connected by thin lines, creating a dense, interconnected structure.

# ダークマターと 宇宙の構造形成進化

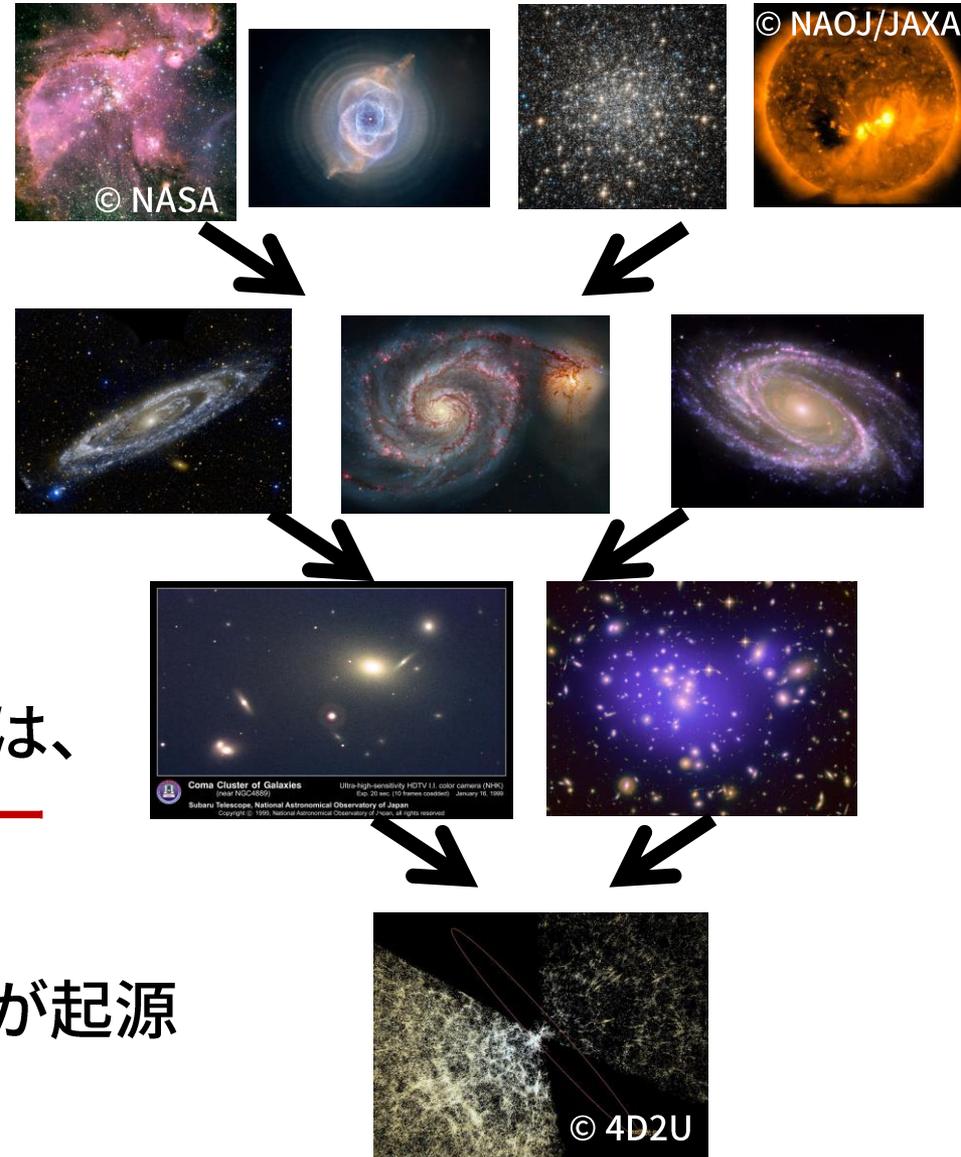
石山 智明  
千葉大学

# Hierarchical Universe

- 星の集団 = 銀河
- 銀河の集団 = 銀河団
- 銀河、銀河団の集合 = 宇宙の大規模構造

宇宙の構造は階層的

- これらの階層的な構造形成には、重力のみ作用する**ダークマター** (暗黒物質)が必要不可欠
- 宇宙初期の微小な密度揺らぎが起源



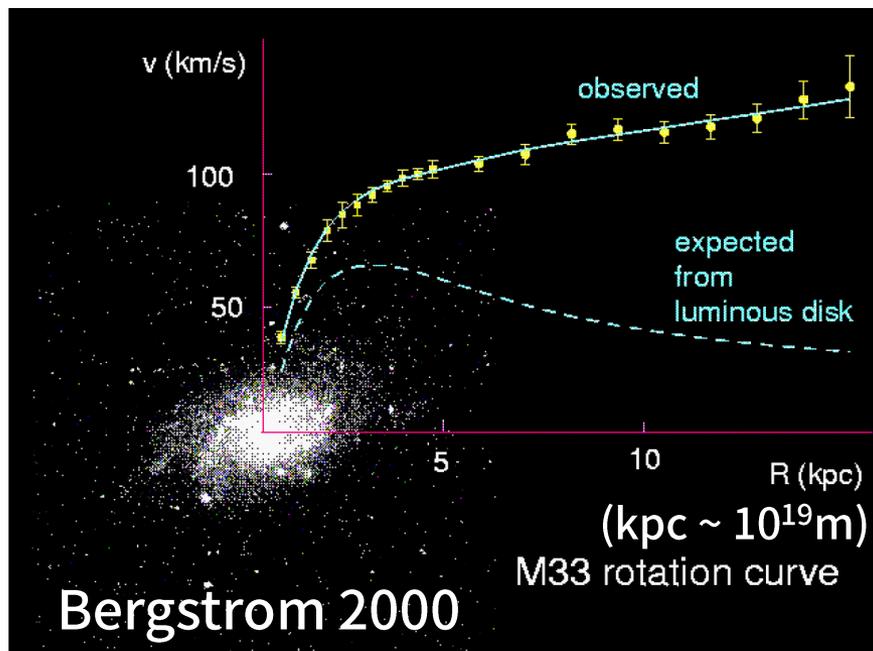


(C) 4D2U, NAOJ

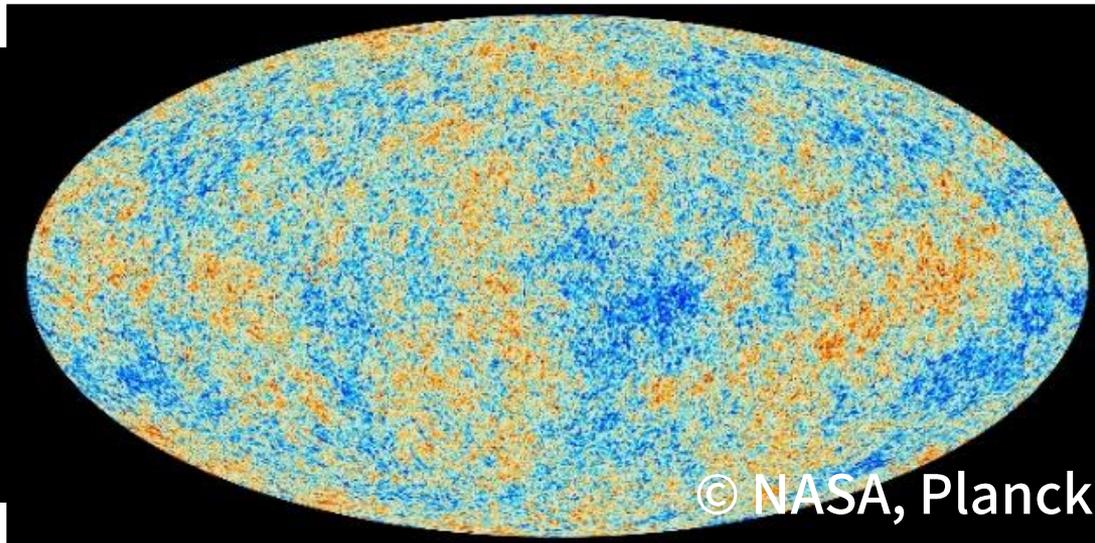
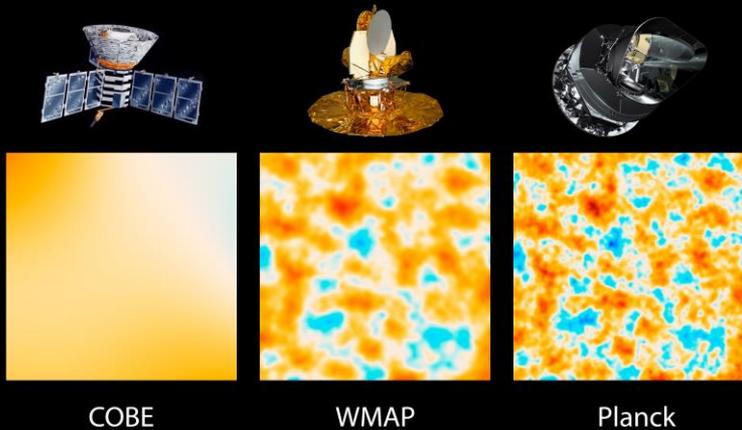
[http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/DarkMatterHalo2\\_v2.html](http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/DarkMatterHalo2_v2.html)  
<https://www.youtube.com/channel/UCX7NvqThctrjhLecSGsmc4A>

# ダークマターの観測的証拠 銀河の星の回転速度

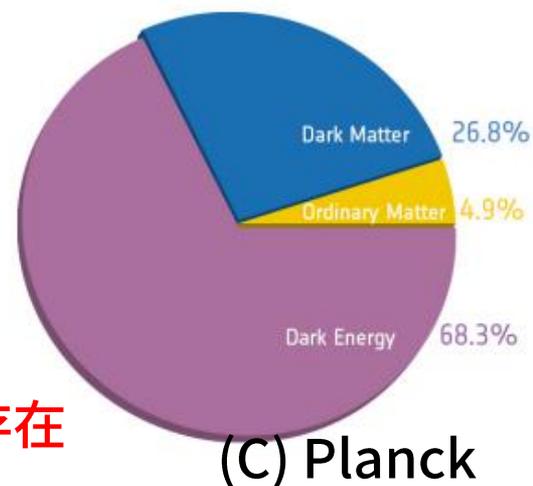
- 銀河の星の回転速度が、観測された物質分布から推定されるものとは大きく異なり、周辺部でも回転速度が低下しない（回転曲線問題, Vera Rubin ら1970年代）
- 目に見えない物質が存在するはずである



# 宇宙マイクロ波背景放射



- ビッグバンの観測的事実
- 宇宙全体でほとんど一様だが、10万分の1程度のずれが存在 (宇宙初期の温度ゆらぎに対応する)
- 宇宙初期のさまざまな情報を得られる
  - **ダークマターはバリオンに対し、質量で5倍程度存在**

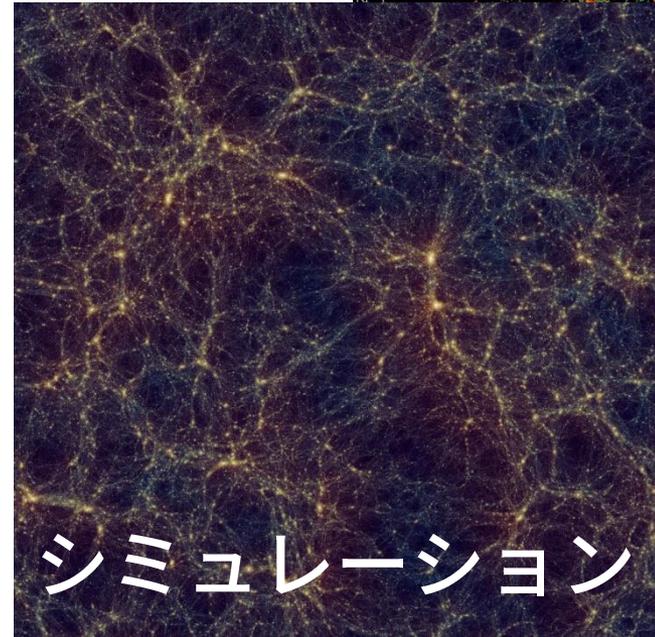


# 宇宙の大規模構造

- 宇宙モデルとクラスターリングなど統計的分布は密接に関連している
- 理論モデルや、モデルに基づいたシミュレーション結果を観測と比較することで、モデルの妥当性を検証することができる
- ダークマターが存在するモデルが強く支持される
- 宇宙年齢で現在観測される構造を作るには、バリオンの重力だけでは不足

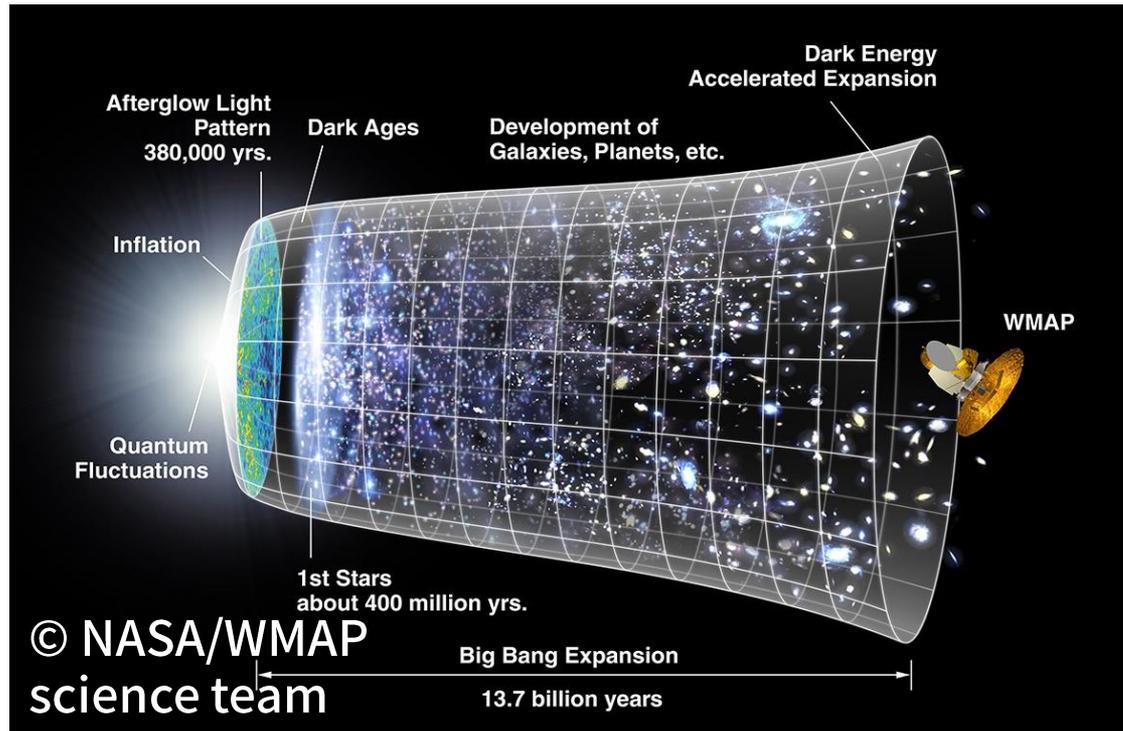


SDSSによる観測



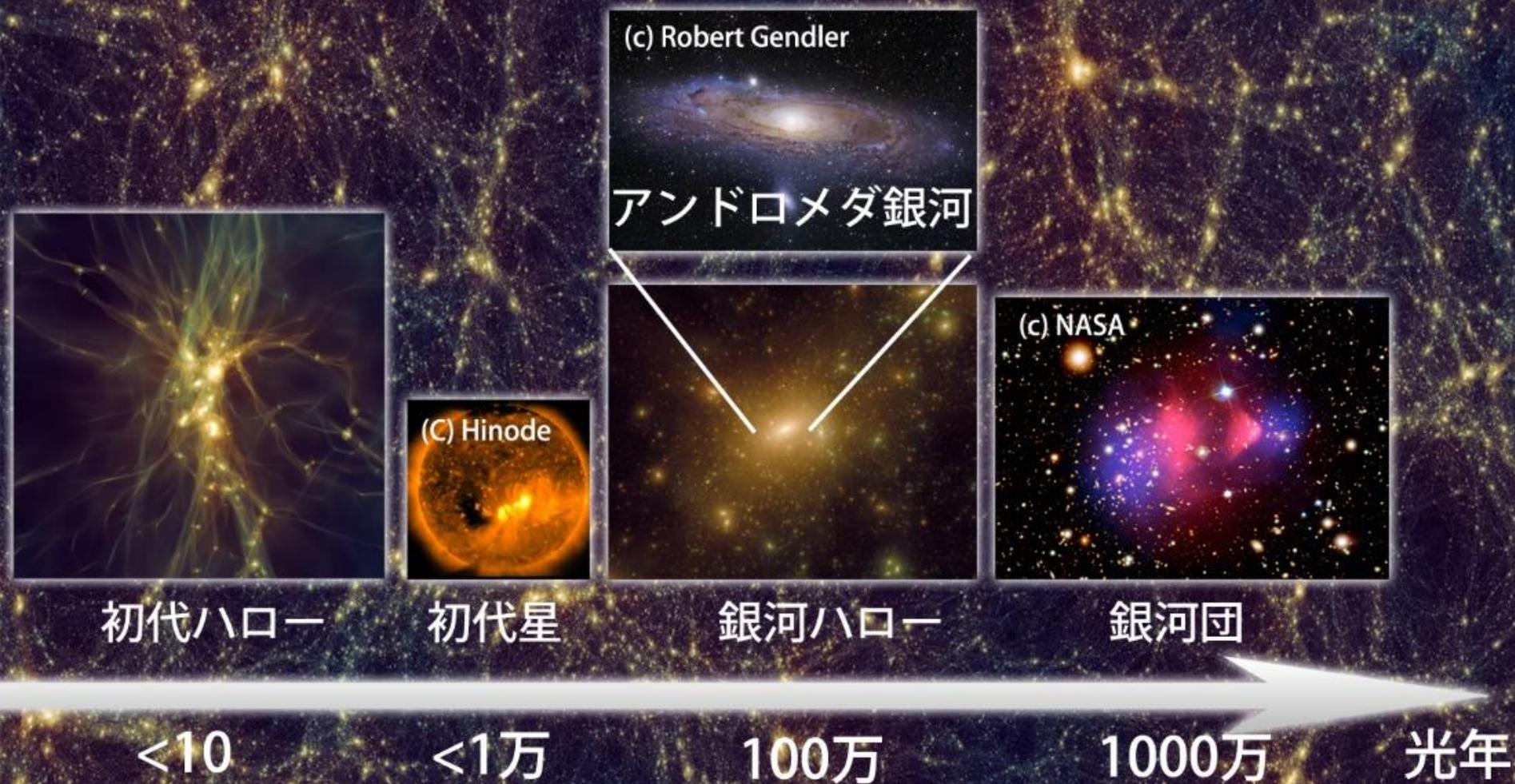
© SI

# ダークマター構造形成



- ダークマター密度ゆらぎの重力崩壊 → **ダークマターハロー**の形成
- ハローの中で誕生する初代星や、第二世代の星がハローとともに群れ集まる → 初代銀河の形成
- 初代銀河同士が合体し、ハローとともに成長 → 銀河の進化、銀河系の形成
- 銀河同士がハローとともに群れ集まる → 銀河団、大規模構造の形成

# 背景：宇宙の大規模構造

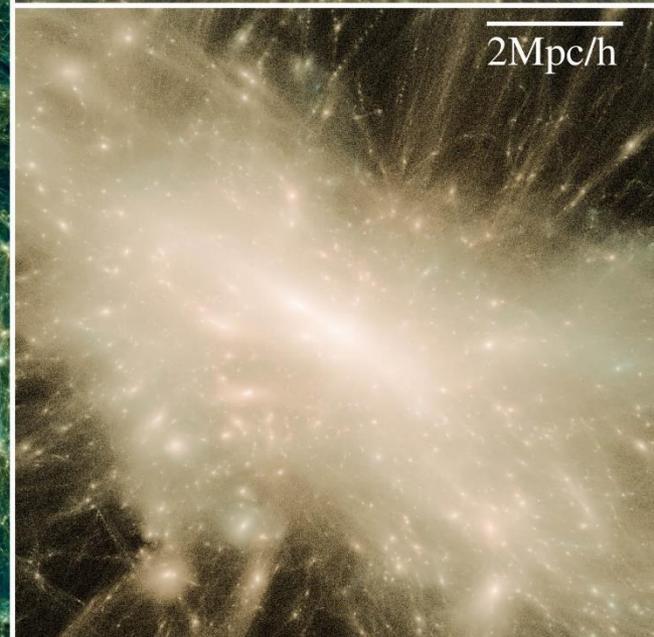
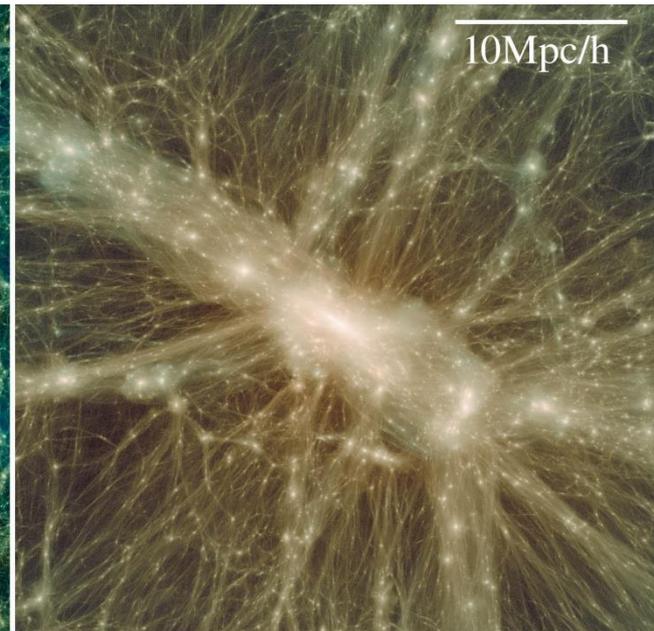
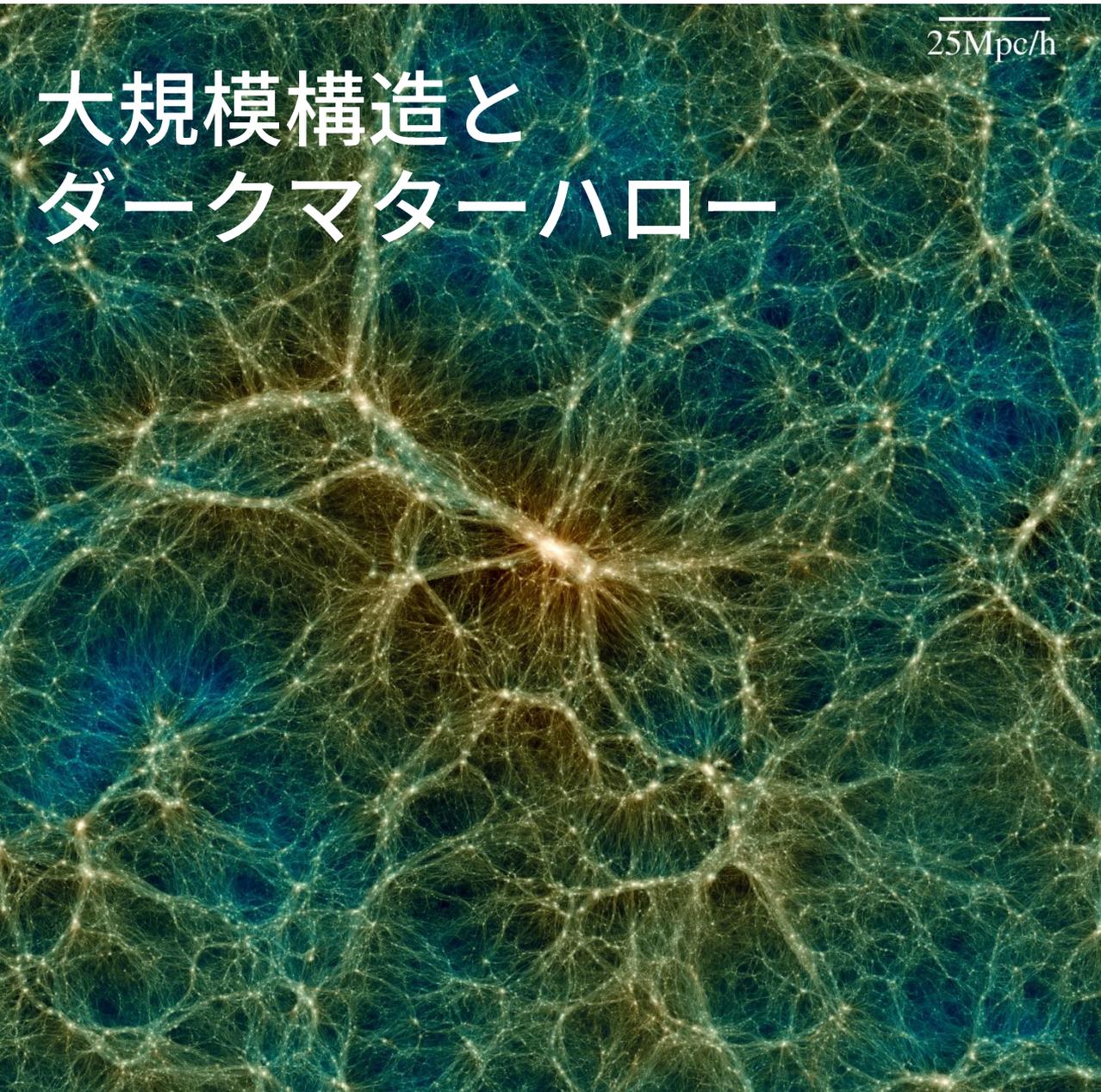


# 大規模構造と ダークマターハロー

25Mpc/h

10Mpc/h

2Mpc/h



# 大規模構造と ダークマターハロー

25Mpc/h

10Mpc/h

2Mpc/h



# ダークマターシミュレーション

- ダークマターは光学的に直接観測できない
- ハローの内部構造や空間分布を知るにはシミュレーションをするしかない
  - ハローの空間分布 = 観測量である大規模構造、  
銀河の分布
  - 内部構造は銀河の形成進化そのものに関連する
- 宇宙の統計的な初期条件は宇宙マイクロ波背景放射の観測などからよく制限されている

# ダークマターシミュレーション からわかること

- 宇宙の大域的物質分布 (大規模構造)
  - 宇宙論
- ハローの中で生まれるさまざまな天体の形成、進化
  - 銀河形成、進化理論
  - 銀河中心超巨大ブラックホール、活動銀河核の分布
  - 初代星形成、銀河考古学
- ハローの微細構造
  - ダークマター検出

ダークマターハロー形成



# ダークマターハローの構造

大規模数値  
シミュレーションで  
はじめて解明  
されたこと

---

10<sup>6</sup> light year

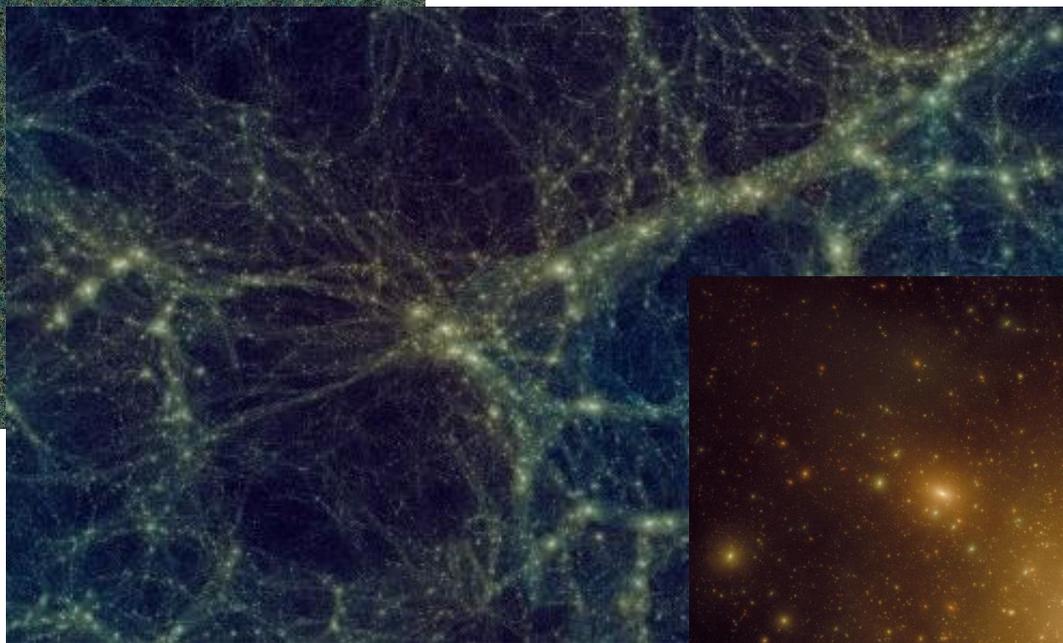
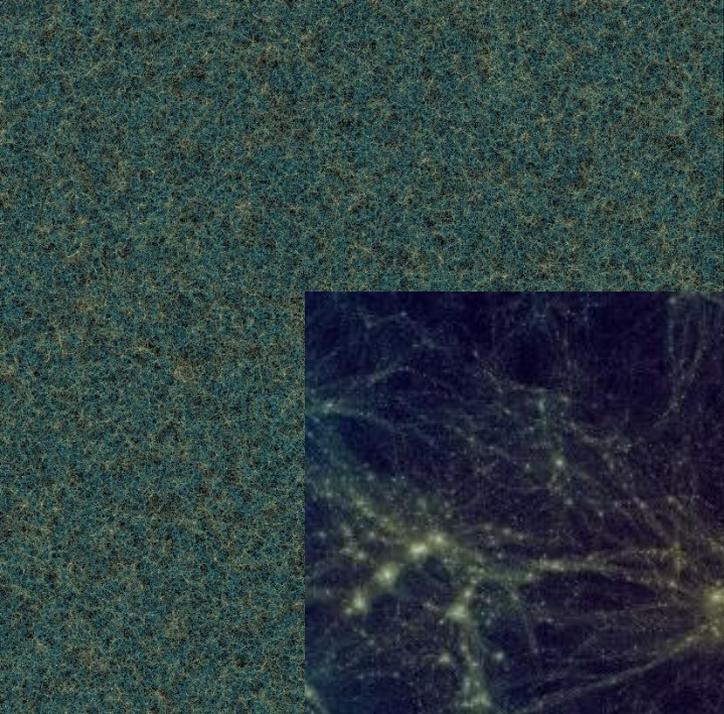
中心が高密度  
楕円状  
無数のサブハローが存在

# シミュレーションの性質、難しさ

- ダークマターモデルによるが、質量で10や20桁は下らないスケールで密度揺らぎが存在する
  - 天体が存在するスケールに限っても10桁以上  
→ 大規模シミュレーションが必須
- 構造がひとつではなく、高密度の構造があらゆる空間に形成する
  - ロードバランスの最適化のために複雑な領域分割が必要  
→ 複雑で大規模な集団通信

# 空間サイズと分解能

- 密度揺らぎを全スケールで分解するには  $10^{20-30}$  粒子が必要
  - 分解するべきかどうかは別問題
- サイエンスターゲットに合わせて空間サイズと分解能をデザインする
  - 大規模構造がターゲットなら、空間サイズを大きくし、小サイズの銀河や初代星スケールを分解しない
  - 小サイズの銀河や初代星がターゲットなら、空間サイズを小さくし、大規模構造を追わない



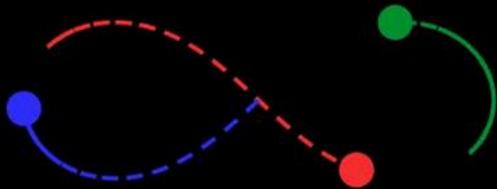
左から一辺  
200億光年、  
5億光年、  
1000万光年

# N体シミュレーション

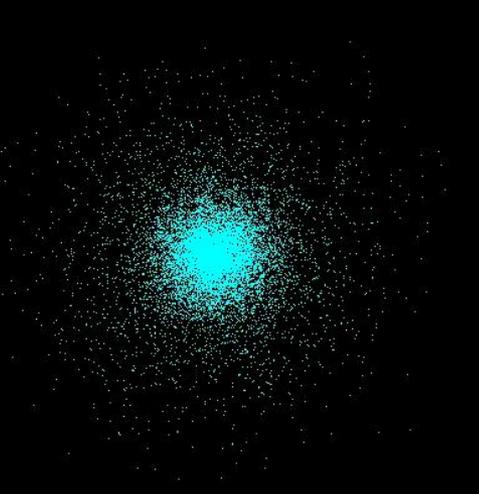
- 粒子法 (ラグランジュ法) の一種
- 物質分布をN個の粒子で表現し、粒子間の重力相互作用を解いて、粒子の運動を追う

$$\frac{d^2 r_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i}^N G m_j \frac{r_j - r_i}{|r_j - r_i|^3}$$

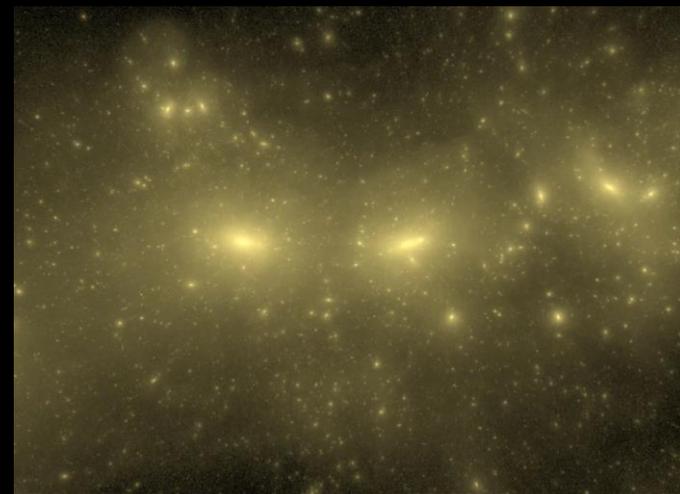
計算量は粒子数の  
2乗に比例する



粒子=星、惑星  
(N=3: 3体問題)

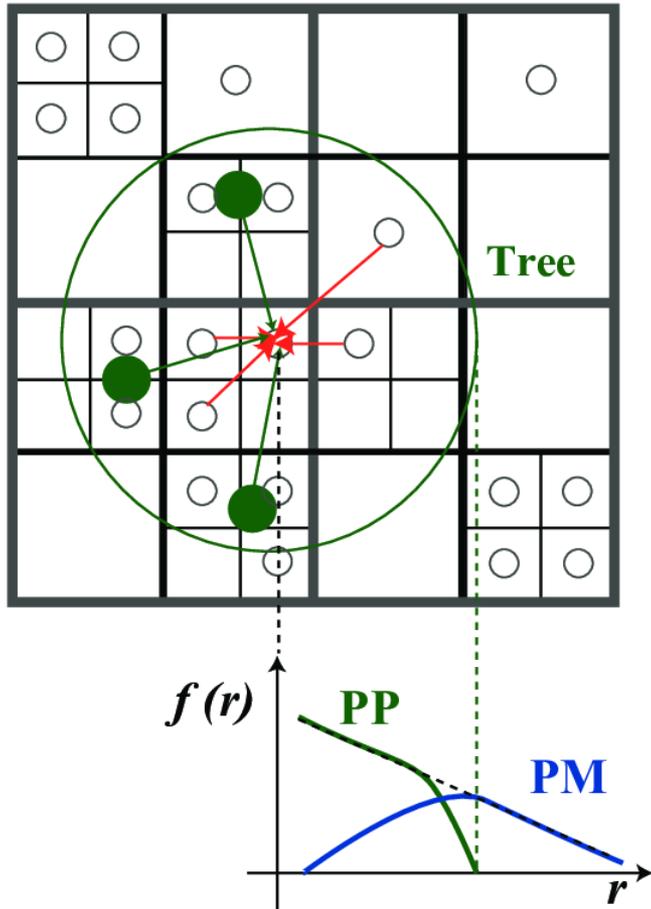


粒子 = 星、星団  
(N=1000: 球状星団)



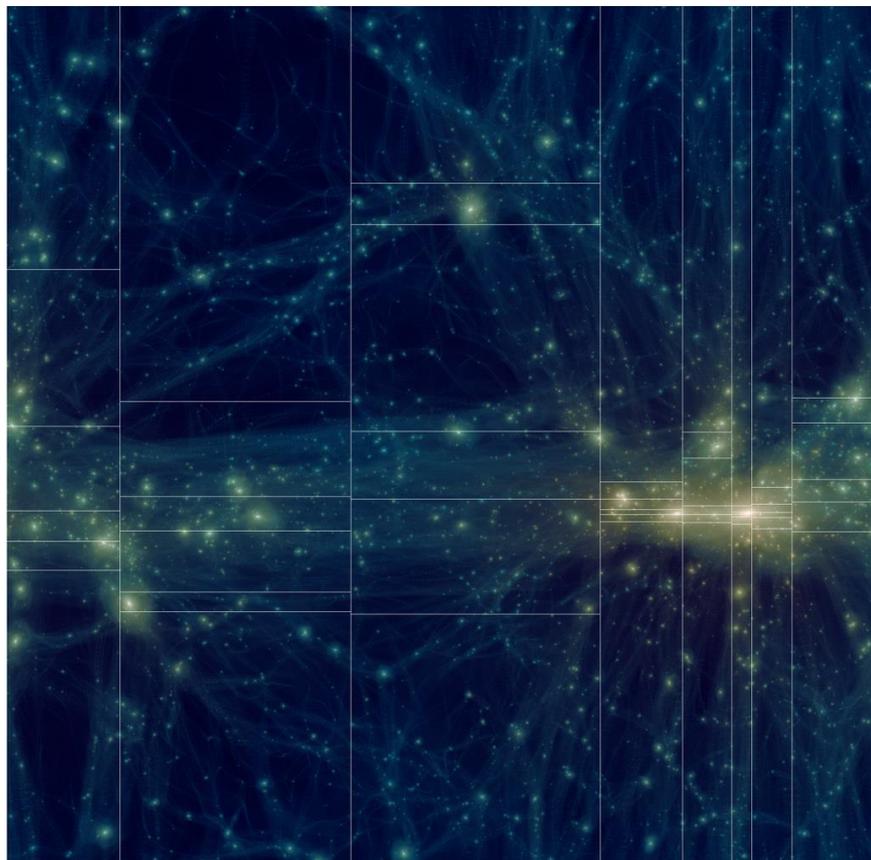
粒子 = ダークマターの塊  
(N=1億、ダークマターハロー)

# TreePM コード GreeM



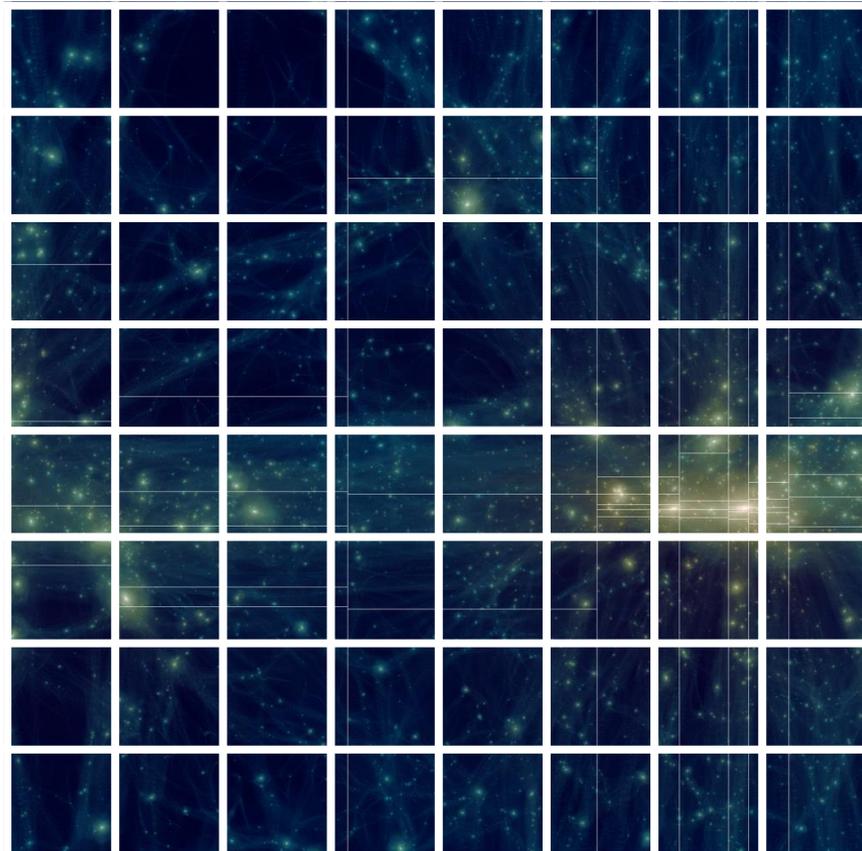
- Massively parallel TreePM code
  - カットオフ付き近距離力: ツリー法
  - 長距離力: Particle Mesh 法
- 数百万コア並列までよくスケールする
- SC12 Gordon Bell Prize
- 業界で標準的な公開コード、“Gadget-2” (Springel 2005) より2-10倍速い
- 「京」での実行効率は最大50%台
  - 重力相互作用演算カーネルの手動 SIMD 化が効いている
- 2015年以降、「京」によるシミュレーションやそのデータを利用した論文は30本以上発表されている

# 粒子の領域分割



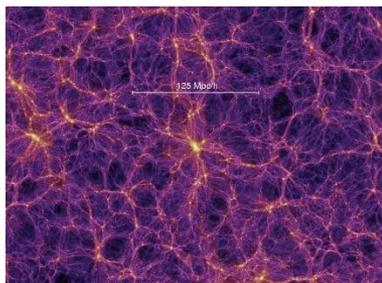
近距離力計算 (主要演算部)の最適化、ロードバランスの最適化のため、高密度領域を細分化

# FFT (PM) の領域分割

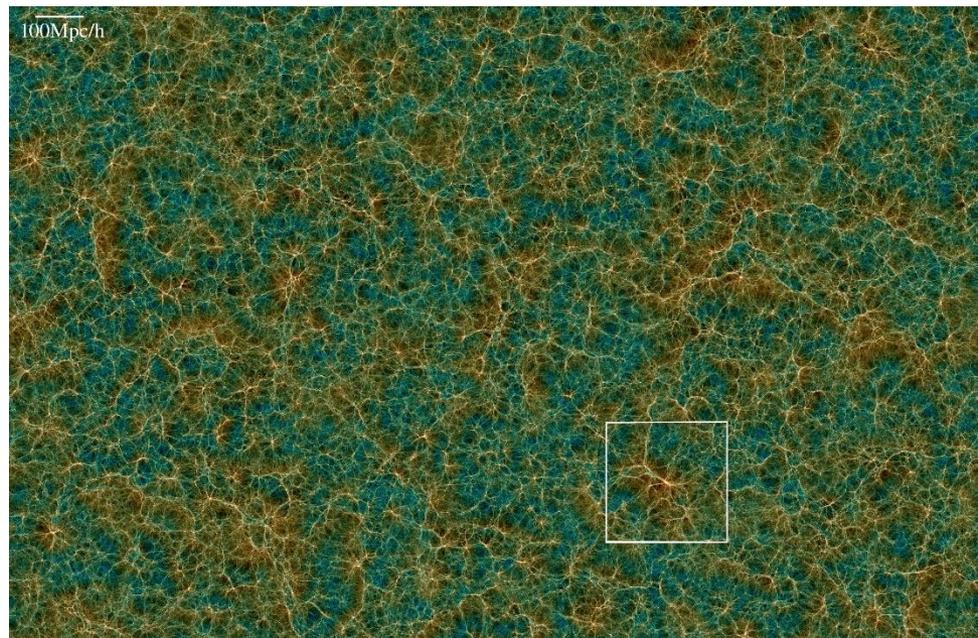


- 大抵の FFT library では、各領域のグリッド数が等しいと一番性能が出る
- FFTW の場合は 1D slab 分散、富岳には SSL II MPI の 3D 分散並列 FFT library がある

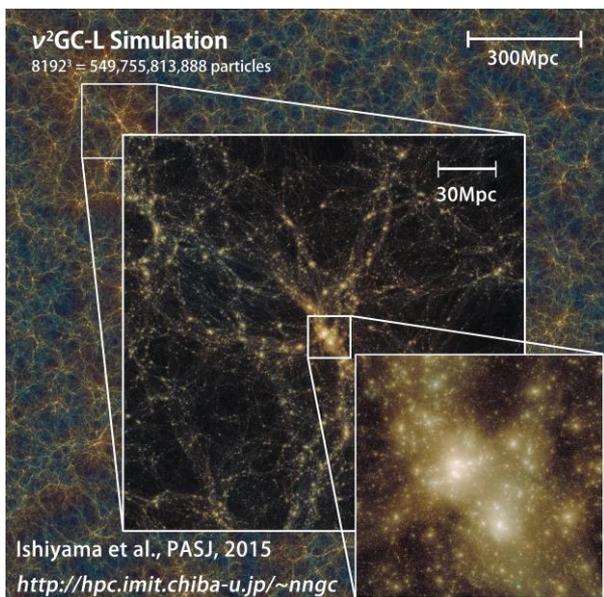
# 富岳までの取組と他との比較



Springel+ 2005  
2160<sup>3</sup> 粒子  
一辺 約23億光年

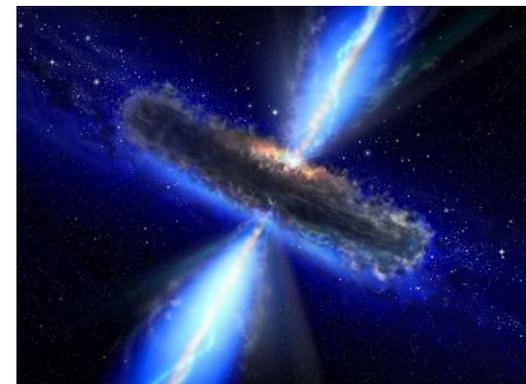


Ishiyama+ 2020  
12800<sup>3</sup> 粒子 @ アテルイII  
(国立天文台)  
一辺 約96億光年  
データサイズ: ~2PB

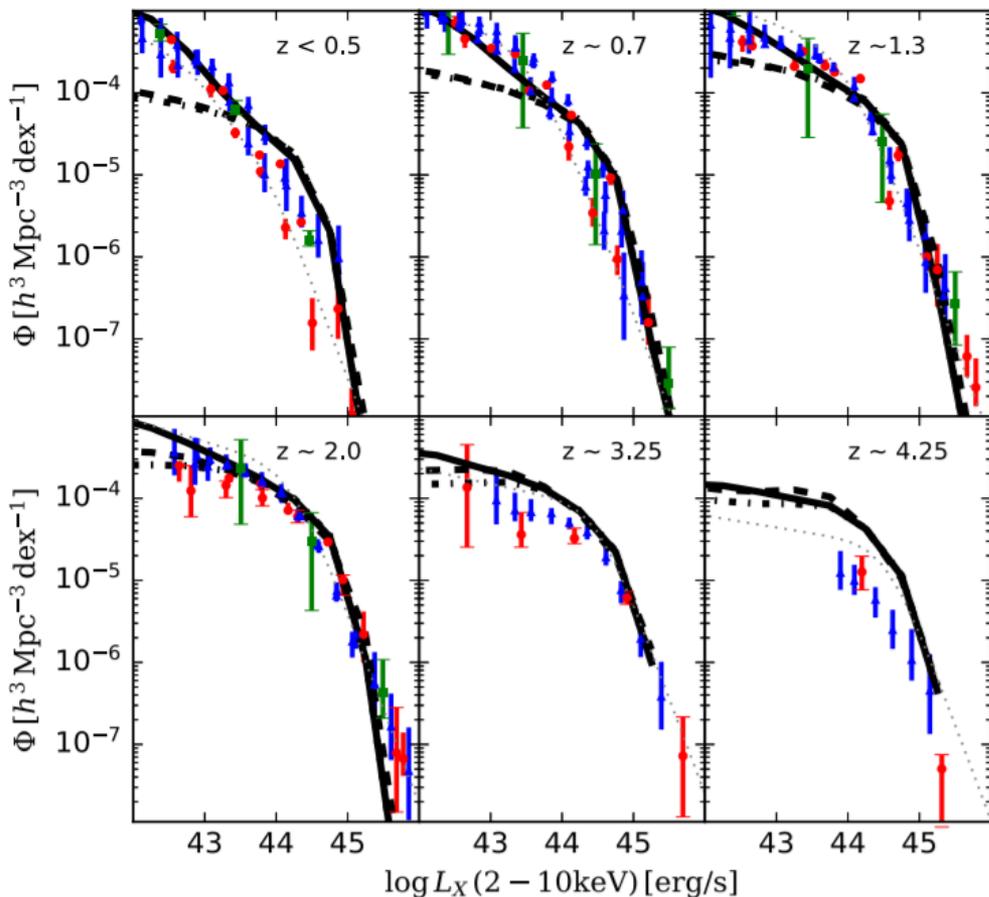


Ishiyama+ 2015  
8192<sup>3</sup> 粒子 @ 京  
一辺 約54億光年

# 活動銀河核との比較



(c) ESA/NASA, the AVO project and Paolo Padovani



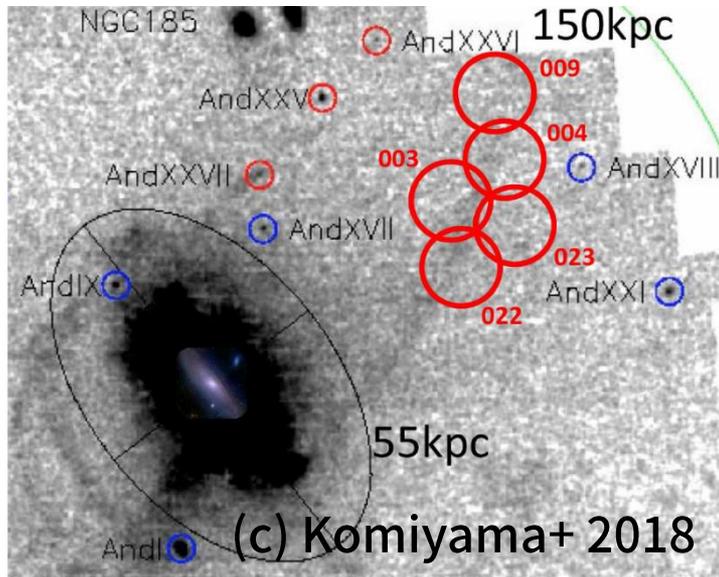
Shirakata et al. 2019

- 数密度が小さい AGN (活動銀河核) の理論的予言
- ハローの merger tree 上で準解析的にモデル化される
- 従来は空間サイズが小さく困難であった
- 自己空間相関も計算でき、宇宙論的な示唆もえられつつある (Oogi+2020)

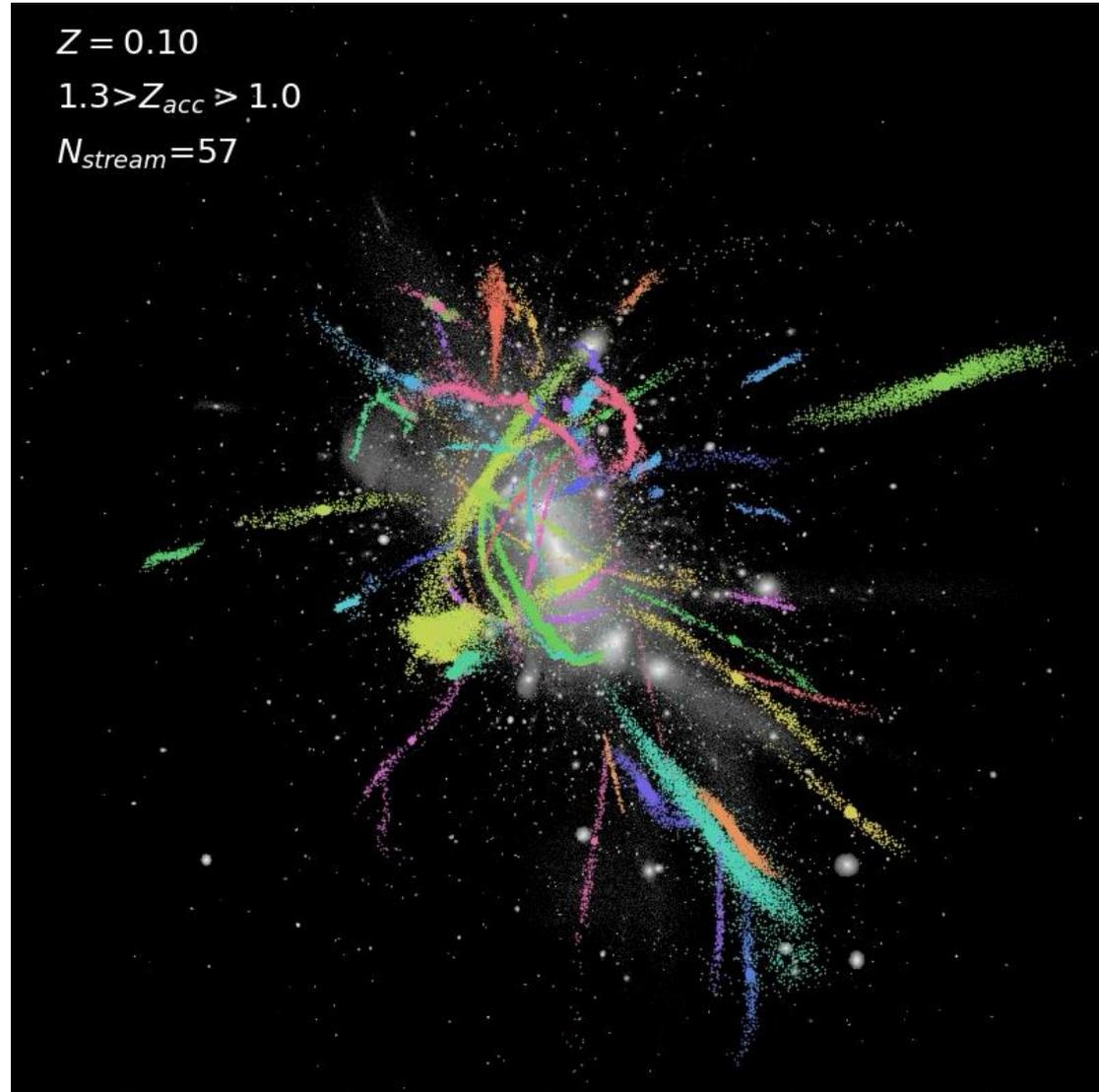
# 銀河恒星ストリームの再現

Morinaga, Ishiyama+ 2019

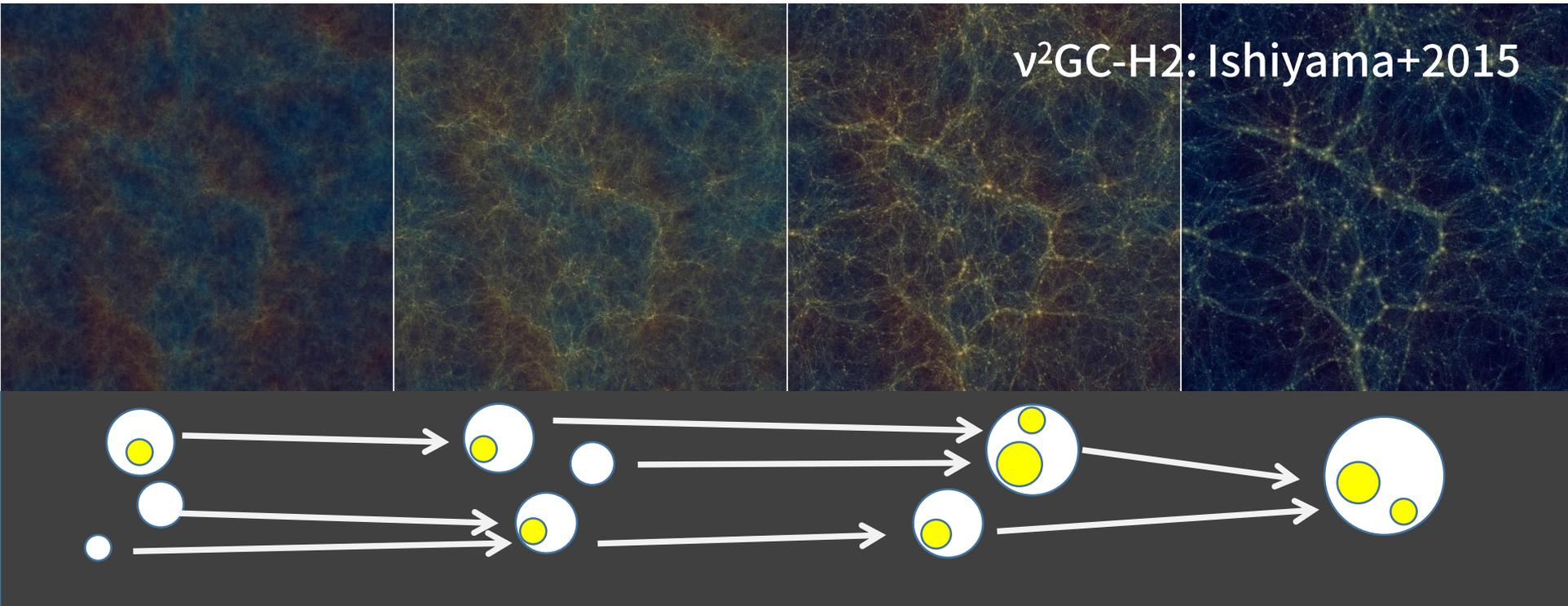
- 銀河周辺に存在するストリームの形成過程が明らかに
  - 従来は分解能とハローの数が不十分



すばる望遠鏡による観測



# merger tree



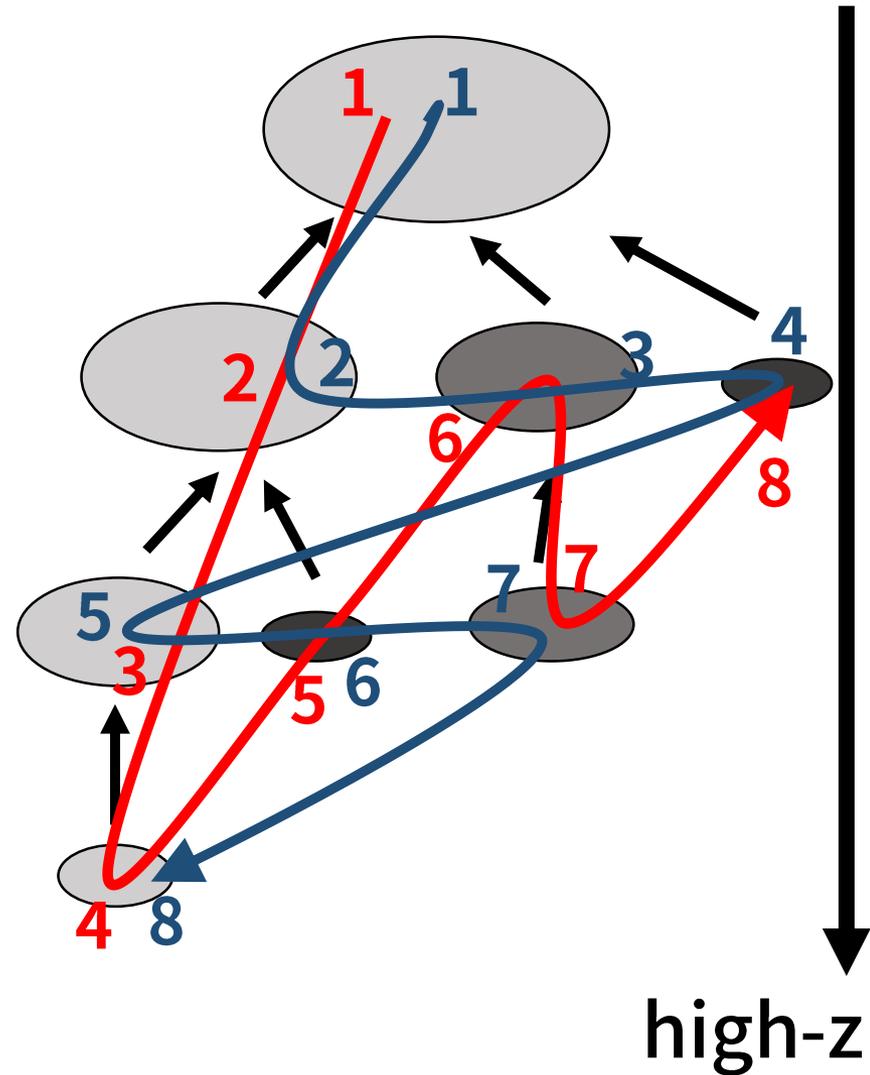
- ダークマター密度揺らぎの非線形成長を有限のボリューム、質量分解能の下でシミュレーション
  - 各時刻におけるハロー/サブハローの質量、内部構造、運動といった特徴を記述する多数のパラメータに縮約した情報 (**ハローカタログ**)
  - それらを時刻間でつなぎ合体など進化の情報を記述する **merger tree**

# データ公開 (merger tree)

- 典型的な宇宙論的シミュレーションでは、総ステップ数は数千～数十万
- 例えば粒子数1000億なら、データサイズは3TB/step 程度。それを全ステップで保存するわけにはいかない
  - 総データサイズが数ペタ～数百ペタになってしまう
- ハロー/サブハローは粒子の集合体なので、粒子と比べると格段にデータサイズを小さくできる
- merger tree の時間ステップ数は、典型的には50～200
  - (サイエンスに問題のない範囲内で)時間解像度を下げている
    - ステップ数の削減、データ量の削減

# merger history の構造

- num\_prog
  - progenitor の数
- desc\_id
- **Breadth\_first\_ID**
- **Depth\_first\_ID**
- Last\_mainleaf\_depthfirst\_ID
  - Main branch の最初のハロー ID
- Tree\_root\_ID
  - 最終時刻のハロー ID



# Cosmological N-body simulations databases

[Simulation Details](#) [Mock](#) [Publications](#)

## Overview

---

This site provides halo/subhalo catalogs and merger trees obtained from large cosmological N-body simulations. Management with MySQL enables to access data easily and fast.

[link to databases](#)

Username and password are needed to access databases. Please contact to [ishiyama -at- chiba-u.jp](mailto:ishiyama-at-chiba-u.jp)

Some data can also be downloaded without databases [here](#).

For the faster access to the databases, redshifts of halos/subhalos are labeled as "Snap\_num" (integer) in consistent tree data. To see look-up tables, please click the "redshifts" columns in the below table.

## Simulation Details

---

The adopted cosmological parameters are based on an observation of the cosmic microwave background obtained by the Planck satellite ( [Planck Collaboration, 2014, A&A, 571, A16](#) ), namely,  $\Omega_0 = 0.31$ ,  $\Omega_b = 0.048$ ,  $\lambda_0 = 0.69$ ,  $h = 0.68$ ,  $n_s = 0.96$ , and  $\sigma_8 = 0.83$ .

Halo/subhalos are identified by Rockstar ([Behroozi et al 2013](#)) Consistent tree ([Behroozi et al 2013](#)) is

<http://hpc.imit.chiba-u.jp/~ishiytm/db.html>

# Server

Search data in tables:

<input type="checkbox"/>	Table	Rows
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-h1_lite</a>	723,237,108
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-h2_lite</a>	700,624,551
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-l_z0</a>	771,601,092
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-l_z1</a>	894,523,267
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-l_z2</a>	867,250,966
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-l_z3</a>	731,734,992
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-l_z4</a>	526,296,311
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-l_z4p57</a>	426,299,082
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-l_z6</a>	208,425,299
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-l_z7</a>	108,196,937
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-s_lite</a>	732,136,063
<input type="checkbox"/>	<a href="#">n2gc-ss_lite</a>	11,508,110
<input type="checkbox"/>	<a href="#">phi-1_lite</a>	864,150,468

1. Basic 認証
2. ログインフォーム
3. データ選択

# Select: n2gc-s\_lite

## Select

Mvir(Msun/h) ▾

x(Mpc/h) ▾

y(Mpc/h) ▾

z(Mpc/h) ▾

▾

## Search

Snap\_num ▾ = ▾ 49

Mvir(Msun/h) ▾ > ▾ 1e13

(anywhere) ▾ ▾

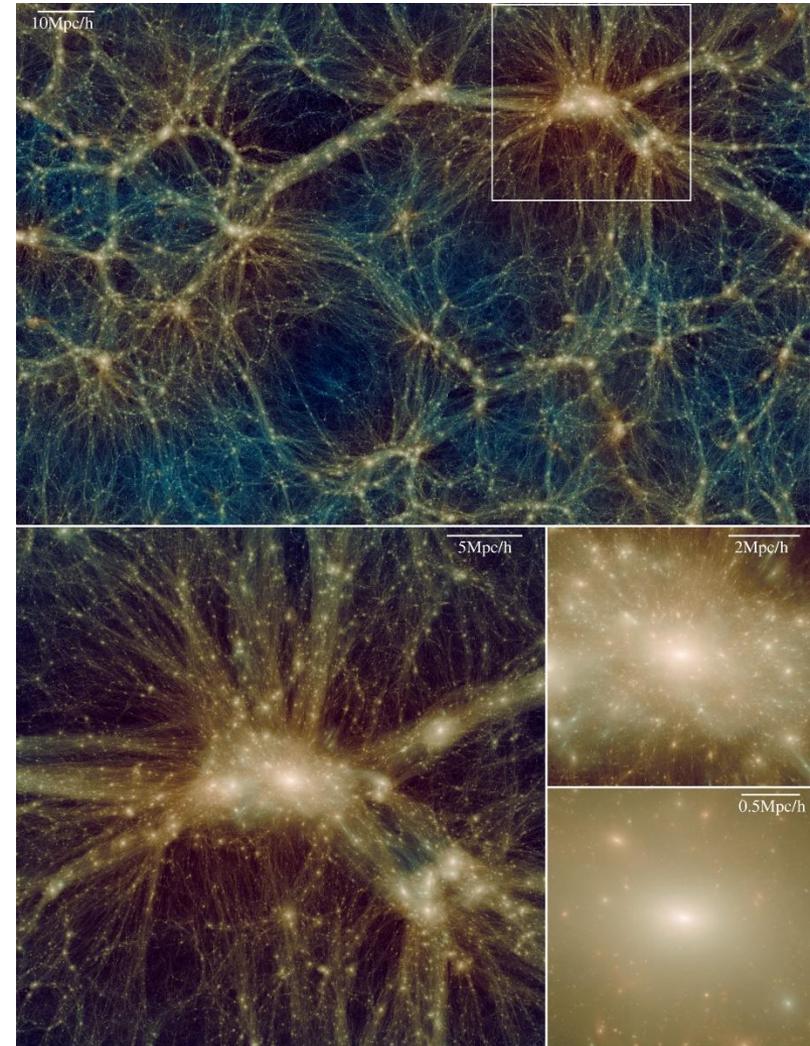
<input type="checkbox"/> Modify	Snap_num	id	desc_id	num_prog	pid	upid	Mvir(Msun/h)	Rvir(kpc/h)	rs(kpc/h)	vmax(km/h)
<input type="checkbox"/> edit	0	43104	443013	0	-1	-1	439700000	19.007	3.377	44.
<input type="checkbox"/> edit	0	59834	448408	0	-1	-1	439700000	19.007	3.657	44.
<input type="checkbox"/> edit	0	26107	452738	0	-1	-1	439700000	19.007	1.456	53.
<input type="checkbox"/> edit	0	67783	457769	0	-1	-1	439700000	19.007	0.593	68.
<input type="checkbox"/> edit	0	144574	488496	0	-1	-1	439700000	19.007	2.223	48.
<input type="checkbox"/> edit	0	85491	500515	0	-1	-1	439700000	19.007	1.857	50.
<input type="checkbox"/> edit	0	89502	502218	0	1	1	439700000	19.007	2.726	46.

- Select でダウンロードするプロパティを選択
- Search で各プロパティの値の範囲を指定
  - SQL構文を覚える必要なし

2015年以降、「京」によるシミュレーションやそのデータを利用した論文は30本以上発表されている

# 富岳での展望

- 大きい空間サイズと高分解能の両立
  - 初代星が宇宙全体の進化にどう影響してきたか
    - 宇宙再電離
    - 銀河中心ブラックホールの種?
    - 化学進化
- 超高分解能化によるハロー微細構造の解明
  - 正体不明なダークマター検出への手がかり



# まとめ

- 様々な観測事実からダークマターが存在し、構造形成の主要な担い手であったことは確実視されている
  - 宇宙初期の微小な密度揺らぎが、重力により巨大な構造へと成長
  - その中で星が生まれ銀河が誕生
- シミュレーションはダークマター分布やその重力的進化を精密に調べる一番の方法
- データの汎用性が非常に高い
- 富岳での大規模計算、データ公開の準備が整ってきた