

A background image showing a complex network of glowing blue and yellow filaments, representing the cosmic web or a cosmological simulation. The filaments are interconnected and form a dense, branching structure. The colors transition from bright yellow in the center to deep blue at the edges.

Cosmogrid Project

石山 智明
(国立天文台 理論研究部)

Cosmogrid Project: 概要と計算手法

- Portegies Zwart, Ishiyama, Groen, Nitadori, Makino, de Laat, McMillan, Hiraki, Harfst, Grosso, 2010, IEEE computer, 43, 8
- Groen, Portegies Zwart, Ishiyama, Makino, Computational Science and Discovery, to be published

背景

- ある種のシミュレーションでは、計算規模は演算性能より、**計算機の規模**によって制限される
 - 天文での例：
ダークマターのみ宇宙論的 N 体シミュレーション →
例えば Cray-XT4 を全部使ったとしても、
500 億粒子以上の計算は不可能
- 離れた複数の計算機を同時に使用して、
処理を分散させることで
計算の規模を上げられないか？
 - いわゆる
グリッドシミュレーション



プロジェクトの目的

- 異機種混合グリッドコンピューティングの技術開発、
超大規模宇宙論的 N 体シミュレーションへの応用
 - 計算機科学的チャレンジ
 - 高速ネットワークの実験
 - ひとつの並列計算機でできない程の規模の計算を
可能にする
- 超大規模宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた、小スケールの
ダークマターハローの統計的性質の解明

グリッドでシミュレーション

- 並列計算機同士をまとめたシステム（グリッド）は、非常に扱いづらい、最低最悪のシステム
 - 通常内部通信より遅いグリッド間通信
 - 大きいレイテンシ（ネットワークの遅延）

並列計算機の一部をわざわざ非常に遅いネットワークでつなぐのに等しい

- そのせいか、ジョブ並列以外で、グリッドシミュレーションでの成功談を聞いたことがない



グリッドでやってもそれほど悪くない理由

- 宇宙論 N 体シミュレーションでは
 - 計算によっては shared timestep で十分
 - 通信回数の削減
 - 通信量がそれほど多くないアルゴリズムがある
 - 近傍のツリー構造 + “粗い”メッシュデータ
 - 通信回数が減るように、改良できる
 - 粒子数を増やすほど通信にかかる相対的な時間が少なくなる
 - 演算量は $\sim O(N \log N)$
 - 通信量は $\sim O(N^{2/3})$
- (海外の計算機で) たくさん CPU 時間をもらえる

プロジェクトメンバー

- 日本

- Jun Makino
- Tomoaki Ishiyama
- Keigo Nitadori
- Kei Hiraki

- ドレクセル

- Stephen McMillan

- オランダ

- Simon Portegies Zwart
- Cees de Laat
- Stefan Harfst
- Derek Groen
- Steven Rieder
- Paolo Grosso

“グリッド”環境

Dark fiber 10Gbps, レイテンシは ~200 milliseconds



国立天文台 Cray-XT4

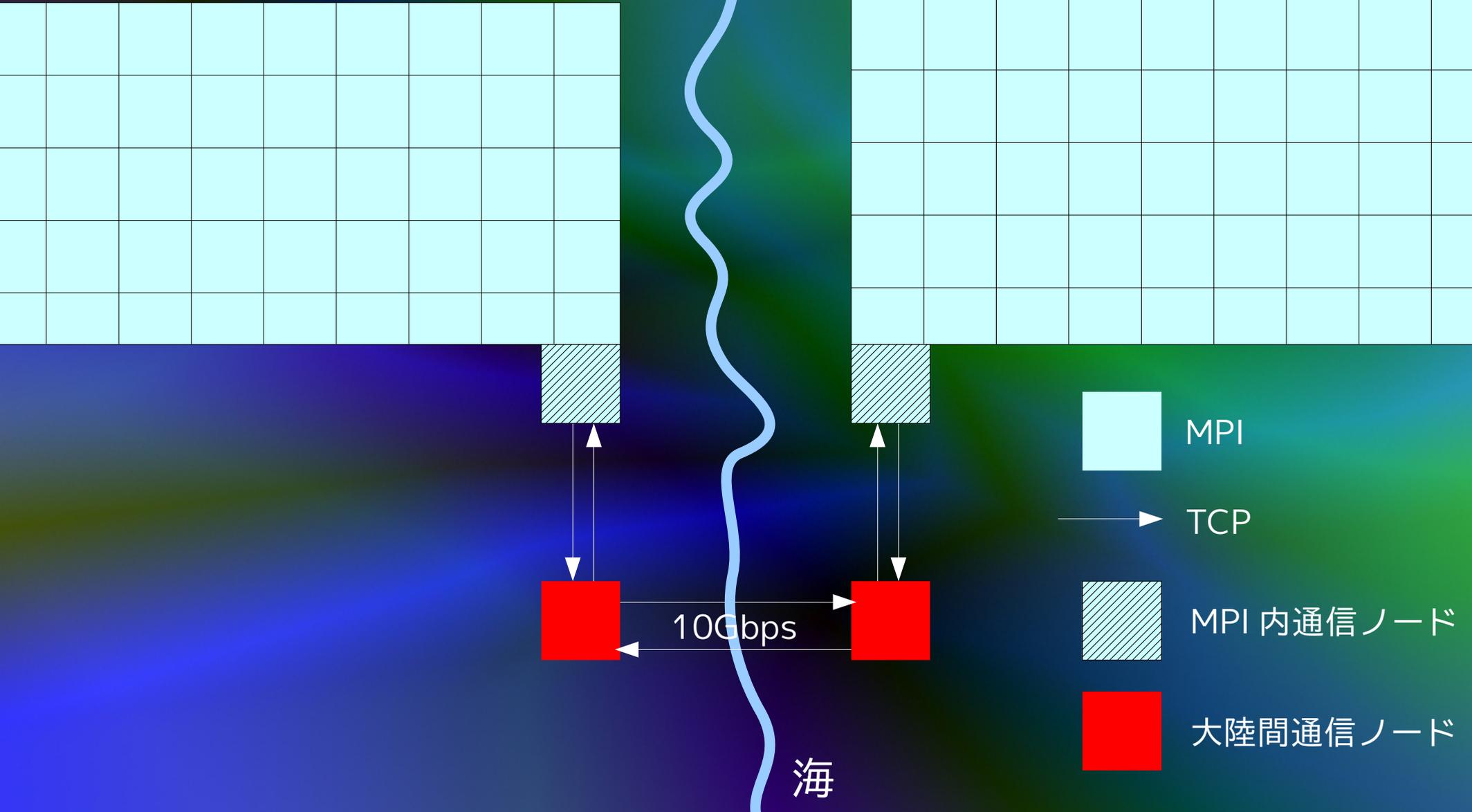
アムステルダム Huygens (Power 6)

- 高速ネットワークで接続された、2種類のスカラ型超並列計算機（国立天文台 Cray-XT4、アムステルダム Huygens）上で処理を分散させ、必要な情報を相互通信しながら、並列計算を実行する

もう少し細かい環境

XT4 @ Tokyo

Huygens @ Amsterdam



MPI



TCP



MPI 内通信ノード

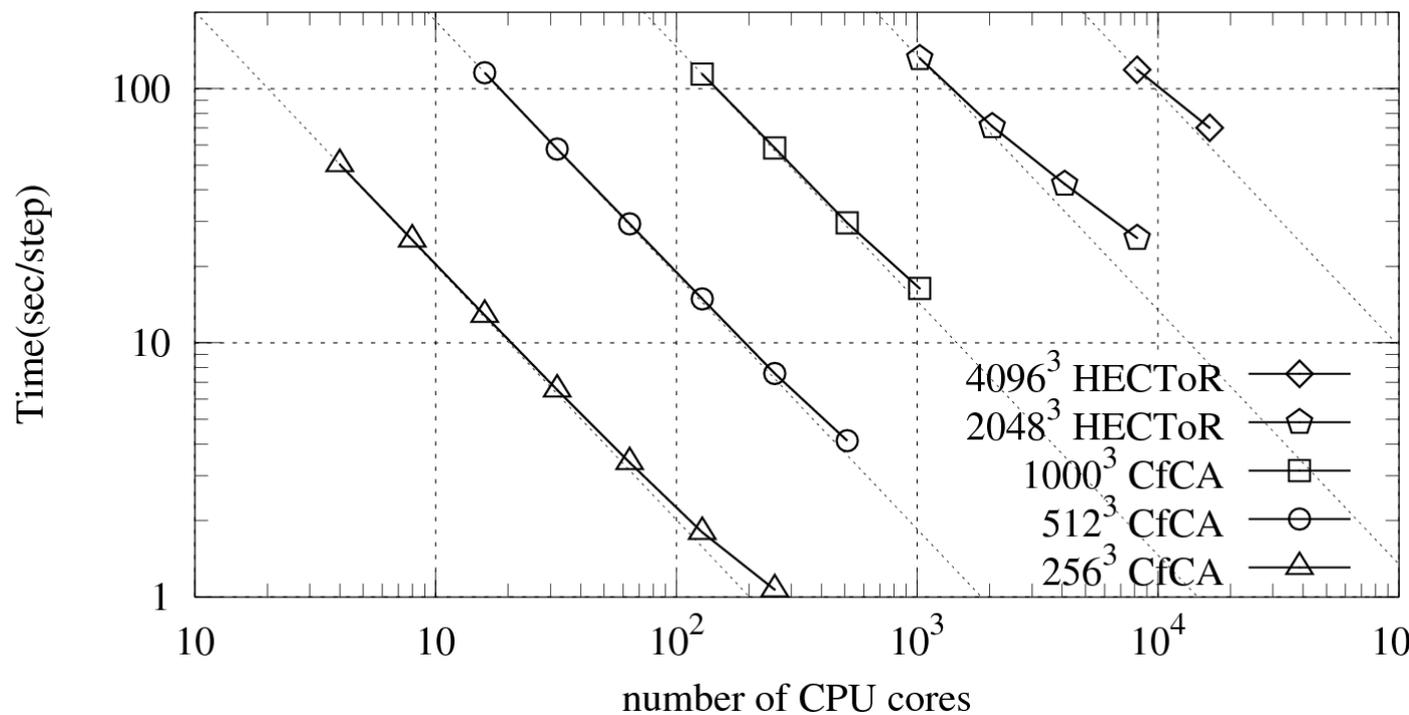


大陸間通信ノード

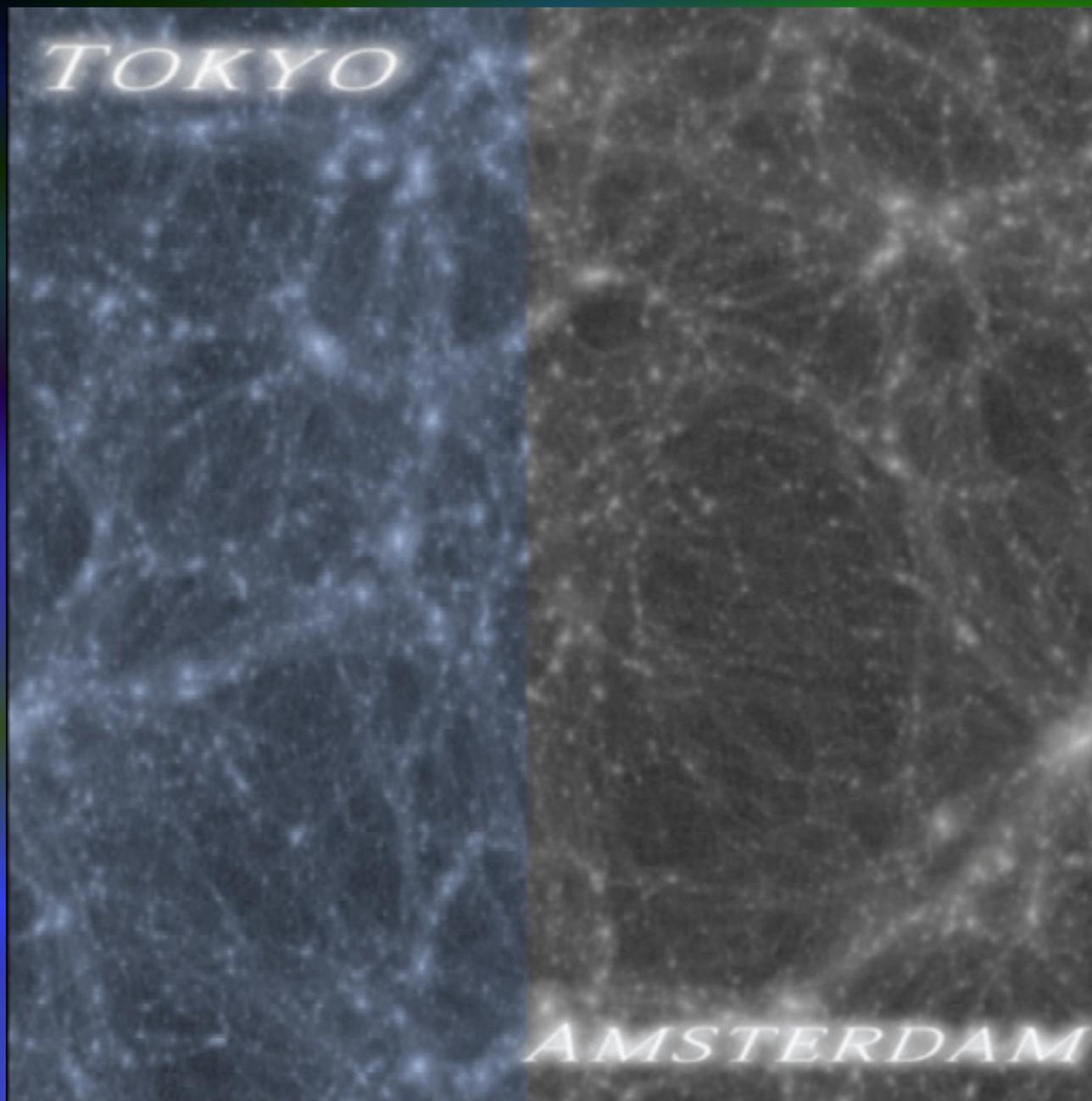
海

ベースとする計算コード

- 並列宇宙論的 N 体シミュレーションコード “GreeM” (Ishiyama, Fukushige, Makino, 2009b)
 - 近距離力 Tree + 遠距離力 PM のハイブリッドスキーム
 - 数万 CPU コアを使っても良くスケールする
 - 次世代スパコン 5~10 万コアで 1 兆粒子のシミュレーションが現実



異機種混合”グリッド”宇宙論的シミュレーション



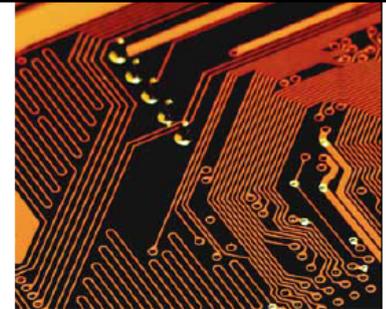
実験結果

Portegies Zwart, Ishiyama, Groen et al.,
2010, IEEE Computer

- LCDM、 2048^3 、 $(30\text{Mpc})^3$
- Tokyo 250 コア、
Amsterdam 500 コア
- 計算時間 380sec/step に対して通信は 70sec
- グリッド環境を利用した、
超大規模シミュレーションの
実現可能性を初めて示した
- 今は3以上の計算機にも対応
(Groen, Portegies Zwart, Ishiyama,
Makino, 2011, Computational Science
and Discovery)

RESEARCH FEATURE

Simulating the Universe on an Intercontinental Grid



- Simon Portegies Zwart, *Leiden Observatory*
- Tomoaki Ishiyama, *University of Tokyo*
- Derek Groen, *Leiden Observatory*
- Keigo Nitadori, *RIKEN*
- Junichiro Makino, *Center for Computational Astrophysics, Tokyo*
- Cees de Laat, *University of Amsterdam*
- Stephen McMillan, *Drexel University*
- Kei Hiraki, *University of Tokyo*
- Stefan Harfst, *Leiden Observatory*
- Paola Grosso, *University of Amsterdam*

The computational requirements of simulating a sector of the universe led an international team of researchers to try concurrent processing on two supercomputers half a world apart. Data traveled nearly 27,000 km in 0.277 second, crisscrossing two oceans to go from Amsterdam to Tokyo and back.

Scientists' understanding of the universe is hampered by the elusive nature of its largest constituent, cold dark matter. The observation of large structures has provided some insights into this phenomenon, particularly in understanding how dark matter behaves. Researchers know, for example, that the Milky Way and other galaxies rapidly rotate and that dark matter keeps the stars in these galaxies from being flung out into space. They have learned that gravity affects dark matter, and that these particles do not interact electromagnetically. Although such observations continue, the information they provide is limited. Thus, scientists rely on simulation to study dark matter in more depth and use the results from these runs to understand observations and make predictions. There is (yet) no way to simulate the entire universe, so models capture only a sector using periodic boundary conditions to mimic that sector ad infinitum.

These models have been quite effective and enabled much progress in the last decade.

Because they understand how dark matter interacts, scientists rely on simulation to study dark matter in more depth and use the results from these runs to understand observations and make predictions. There is (yet) no way to simulate the entire universe, so models capture only a cubic sector using periodic boundary conditions to mimic that sector ad infinitum. These models have been quite effective and enabled much progress in the last decade.

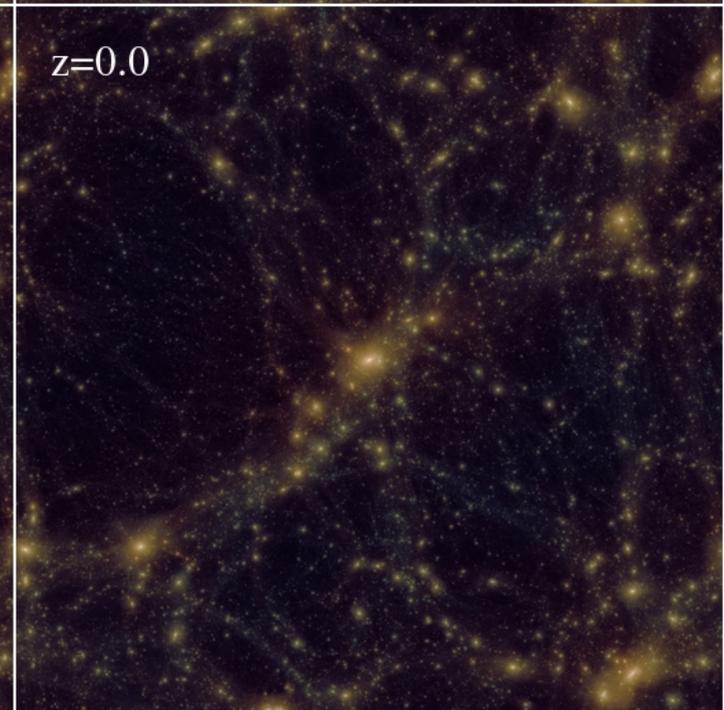
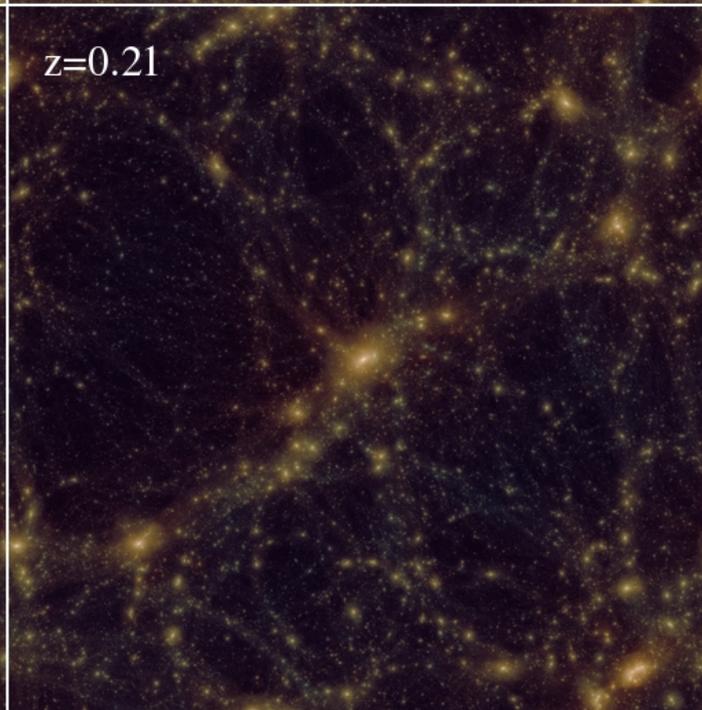
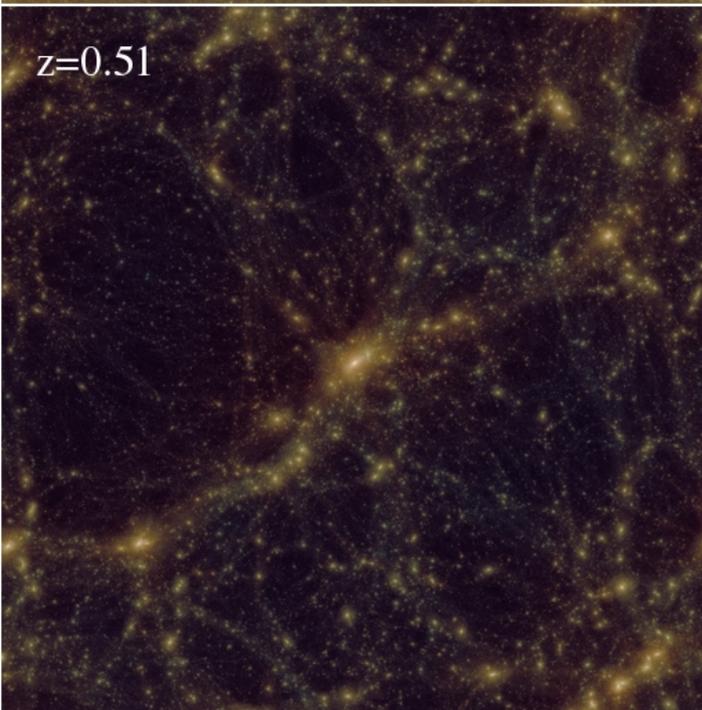
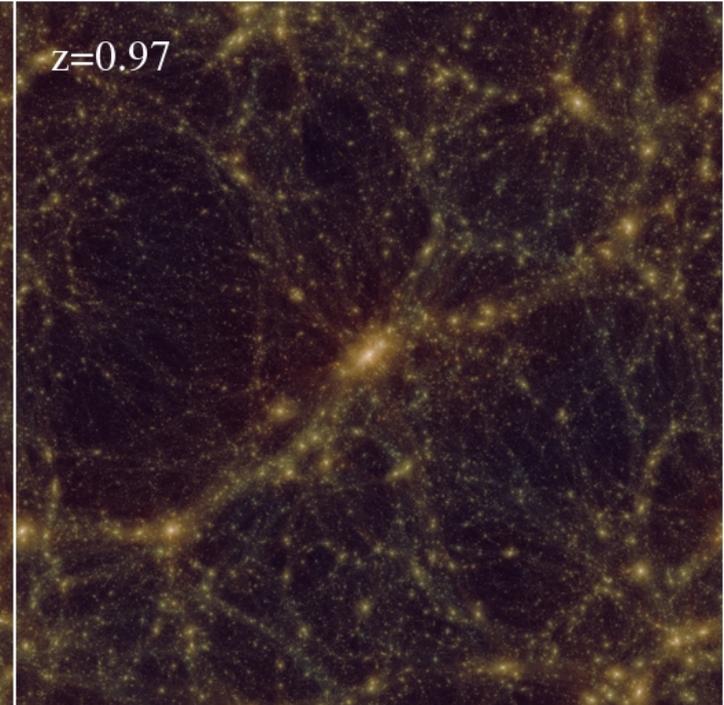
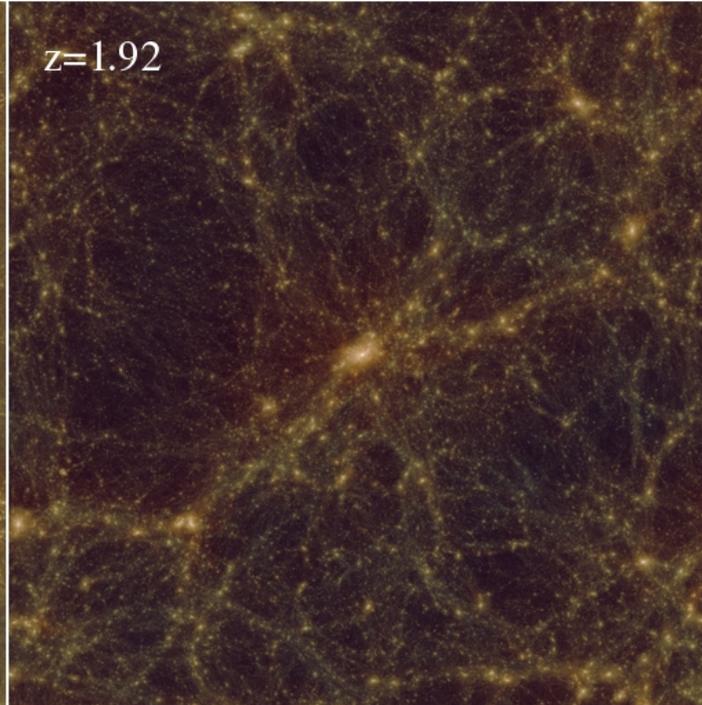
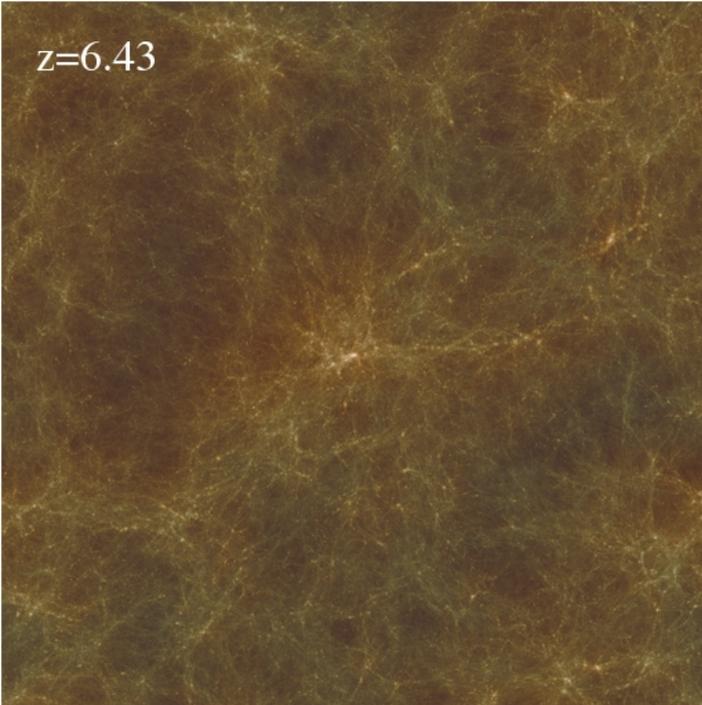
Most simulations focus on the formation and evolution of the universe's visible superstructure: galaxies, clusters, and dark matter. According to the Λ Cold Dark Matter model (where Λ stands for dark energy), the universe is about 13.7 billion years old and comprises roughly 4 percent baryonic matter (stars and gas), about 23 percent nonbaryonic (cold dark) matter, and 73 percent dark energy.²

天文学的成果

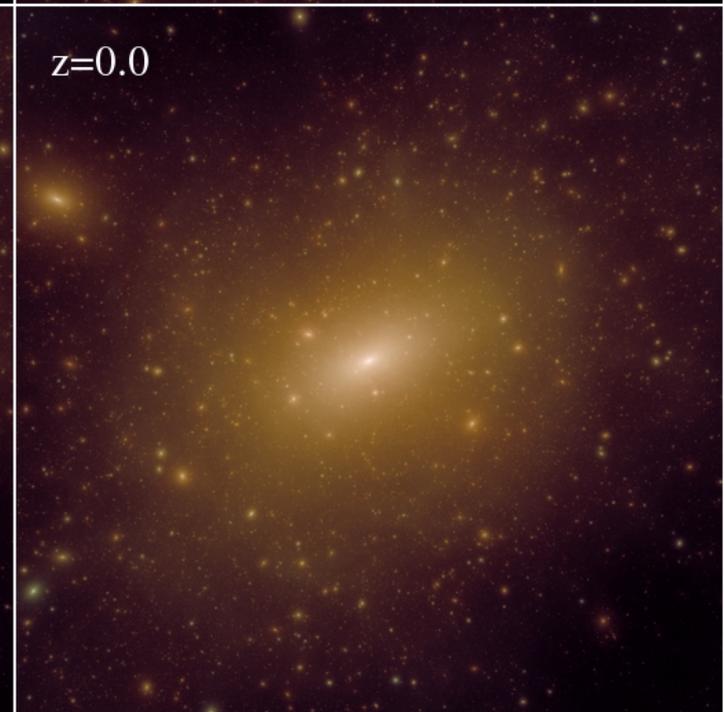
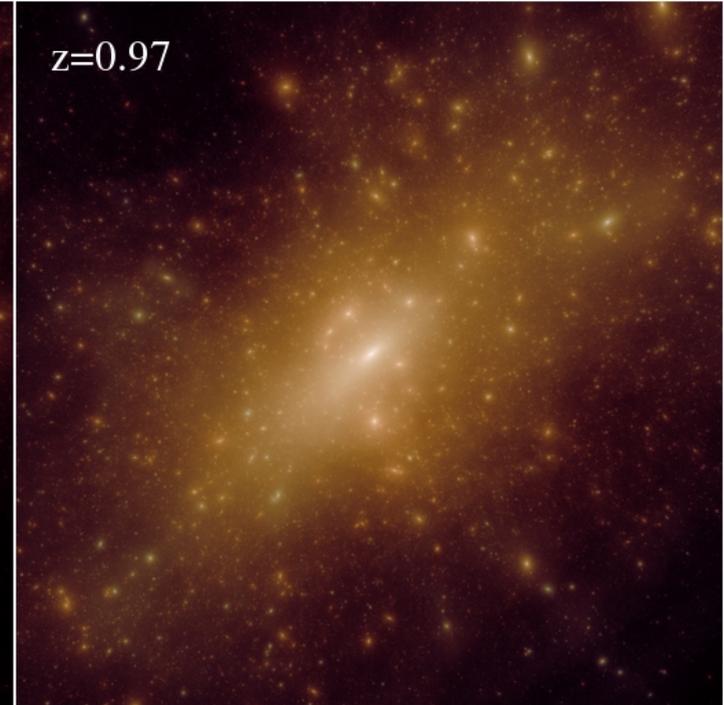
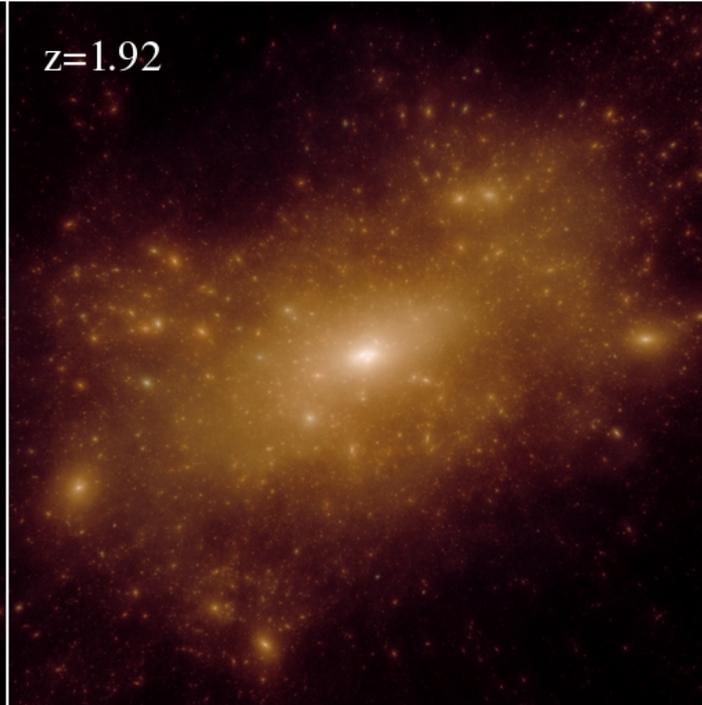
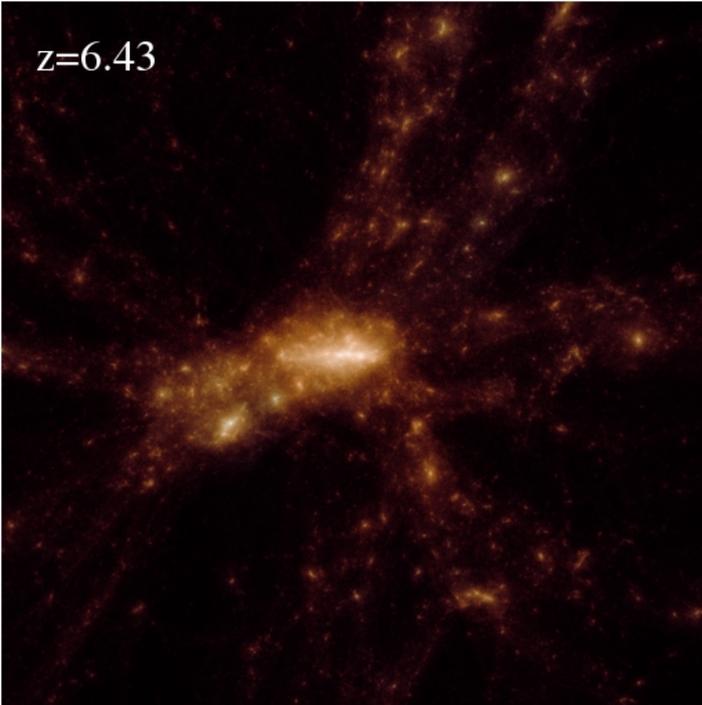
- Ishiyama, Makino, Portegies Zwart, Groen, Nitadori, Rieder, de Laat, McMillan, Hiraki, Harfst, Arxiv:1101.2020

シミュレーションのセッティング

- ダークマターのみ宇宙論的 N 体シミュレーション
- このプロジェクトで確保した CPU 時間で、天文台の Cray とアムステルダム の Huygens、エジンバラの Cray を同時に使わずに計算した (全部で 4Million CPU hours 程度)
- 粒子数 2048^3 、 $(30\text{Mpc})^3$
- 質量分解能 $\sim 10^5$ 太陽質量、空間分解能 175pc
 - 矮小銀河や UFD サイズのハローの統計的性質を調べることが可能な、世界で唯一のシミュレーション
- $\Omega=0.3$ 、 $\Lambda=0.7$ 、 $h=0.7$ 、 $\sigma_8=0.8$ 、 $n_s=1.0$
- TreePM (GreeM: Ishiyama, Fukushige, Makino 2009b)



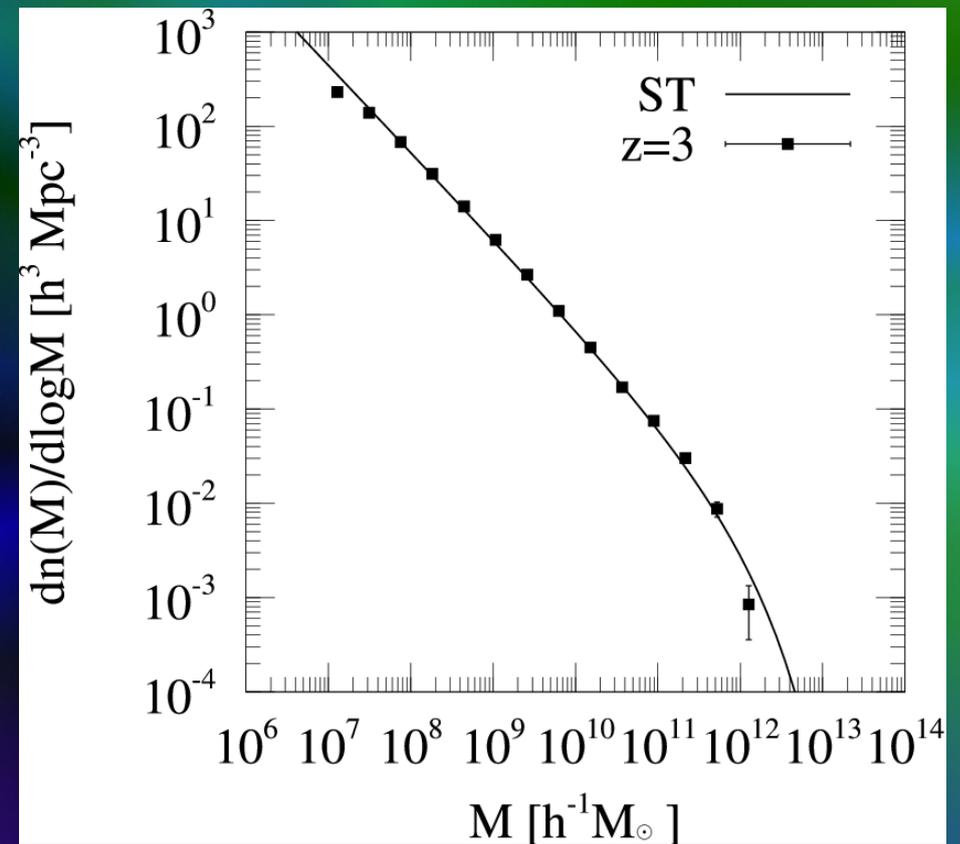
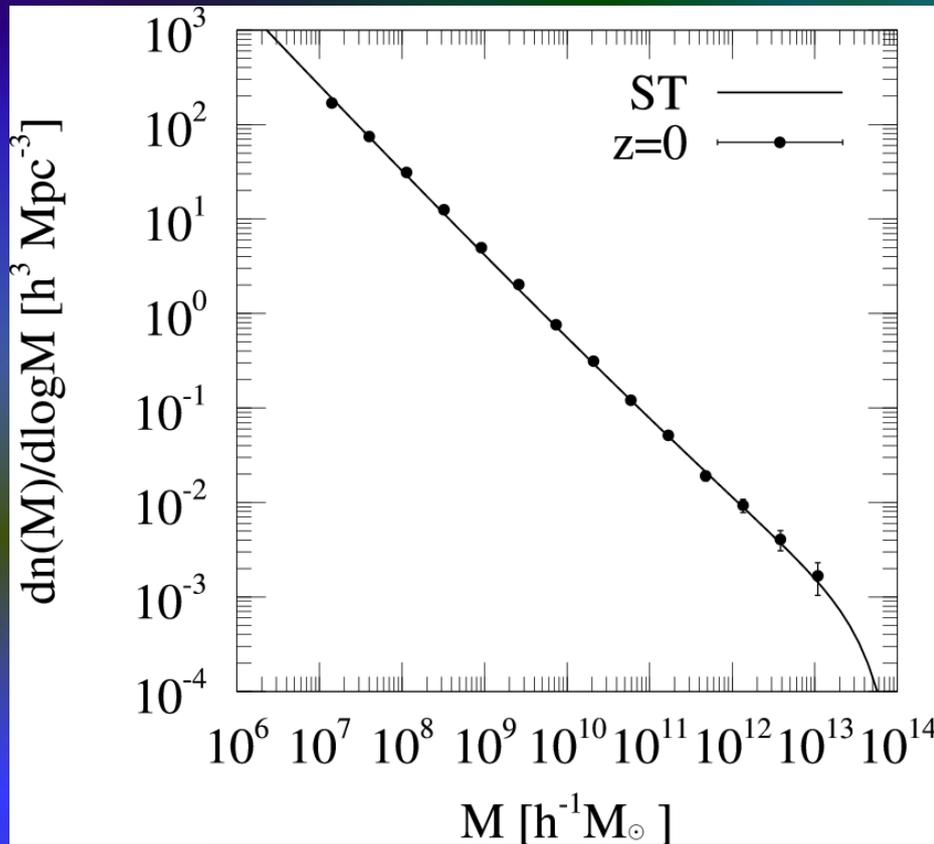
$(30\text{Mpc})^3$



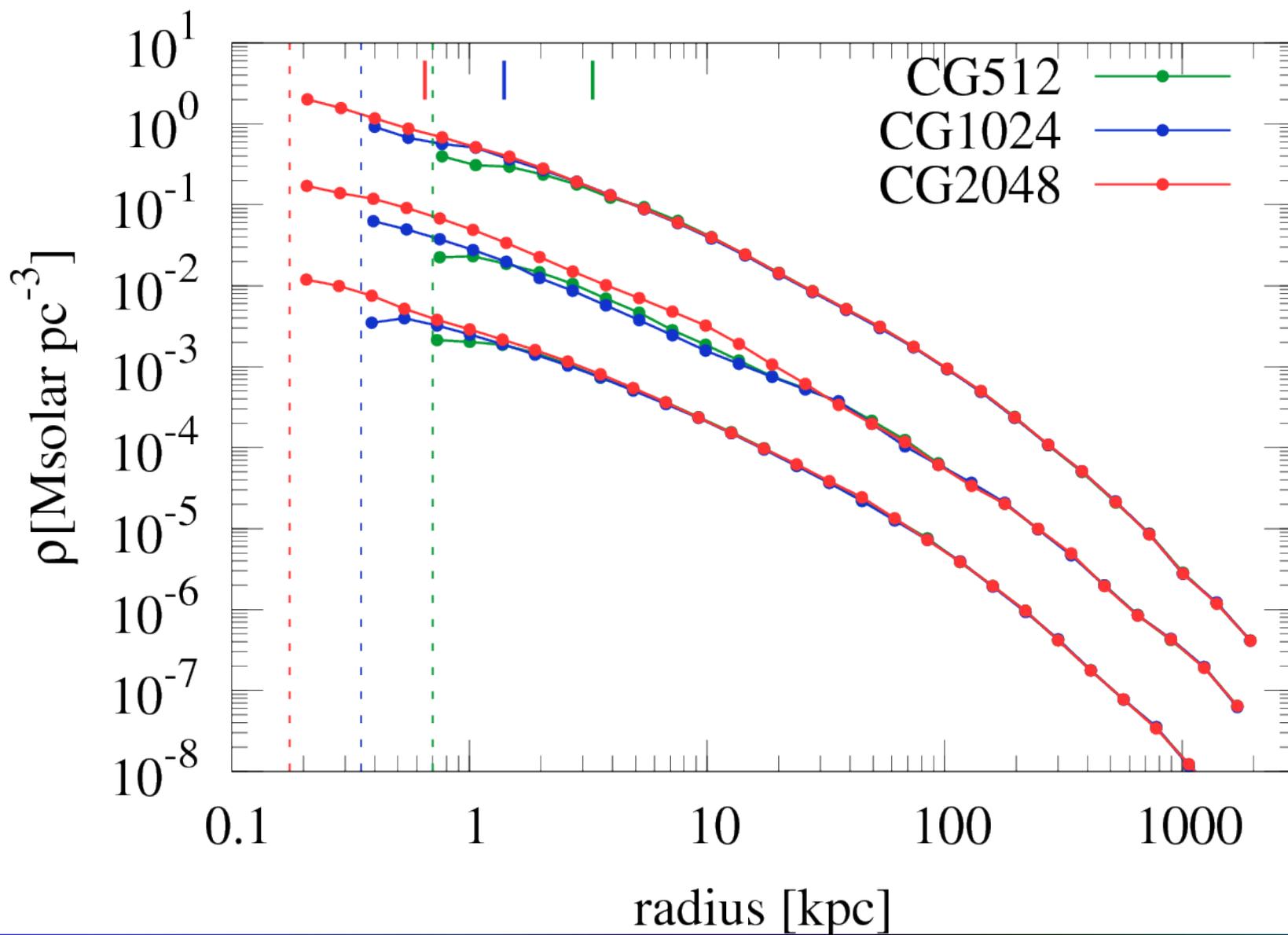
$(2\text{Mpc})^3$

質量関数

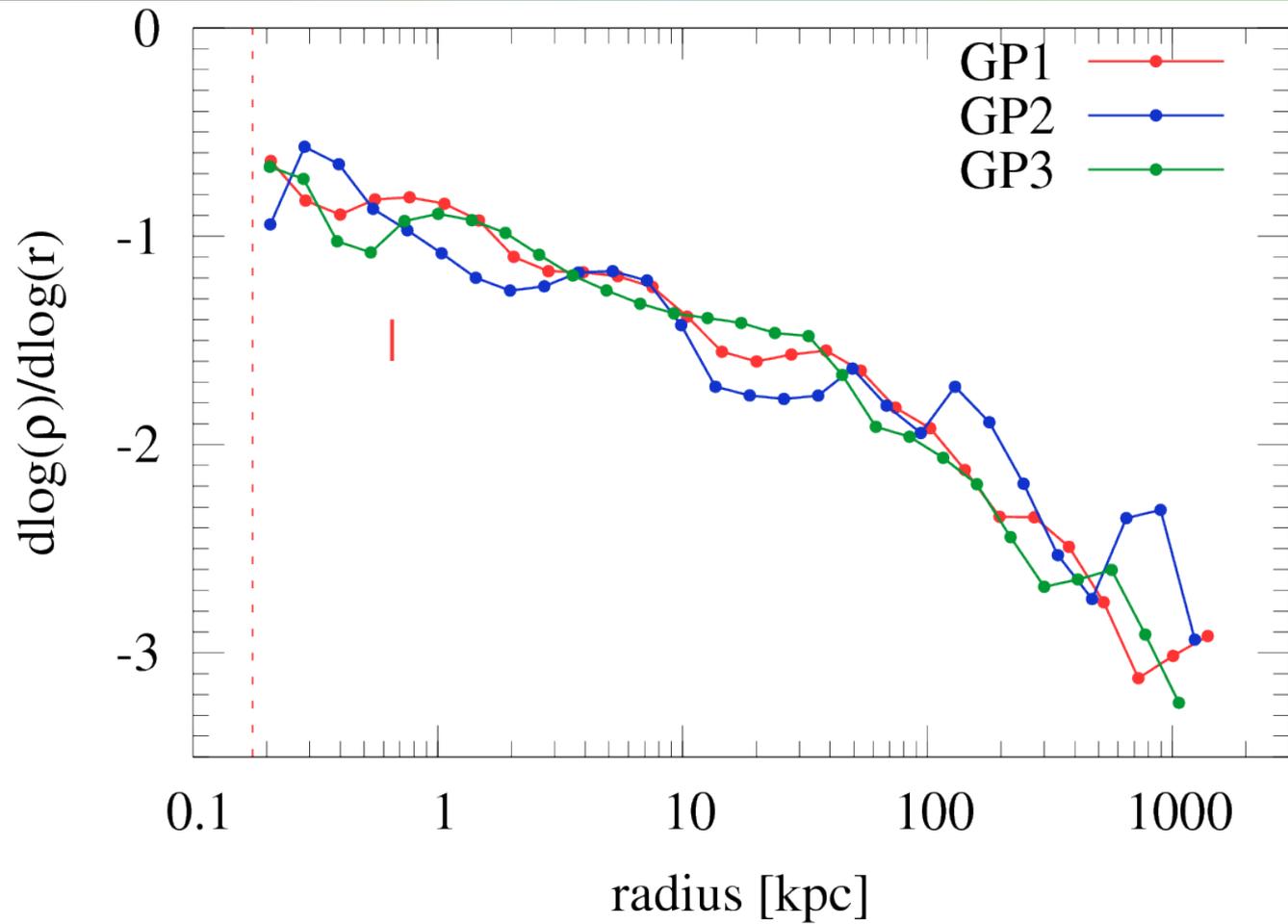
- 10^7 太陽質量まで Sheth & Tormen (1999) の関数でよく合う



密度プロファイル



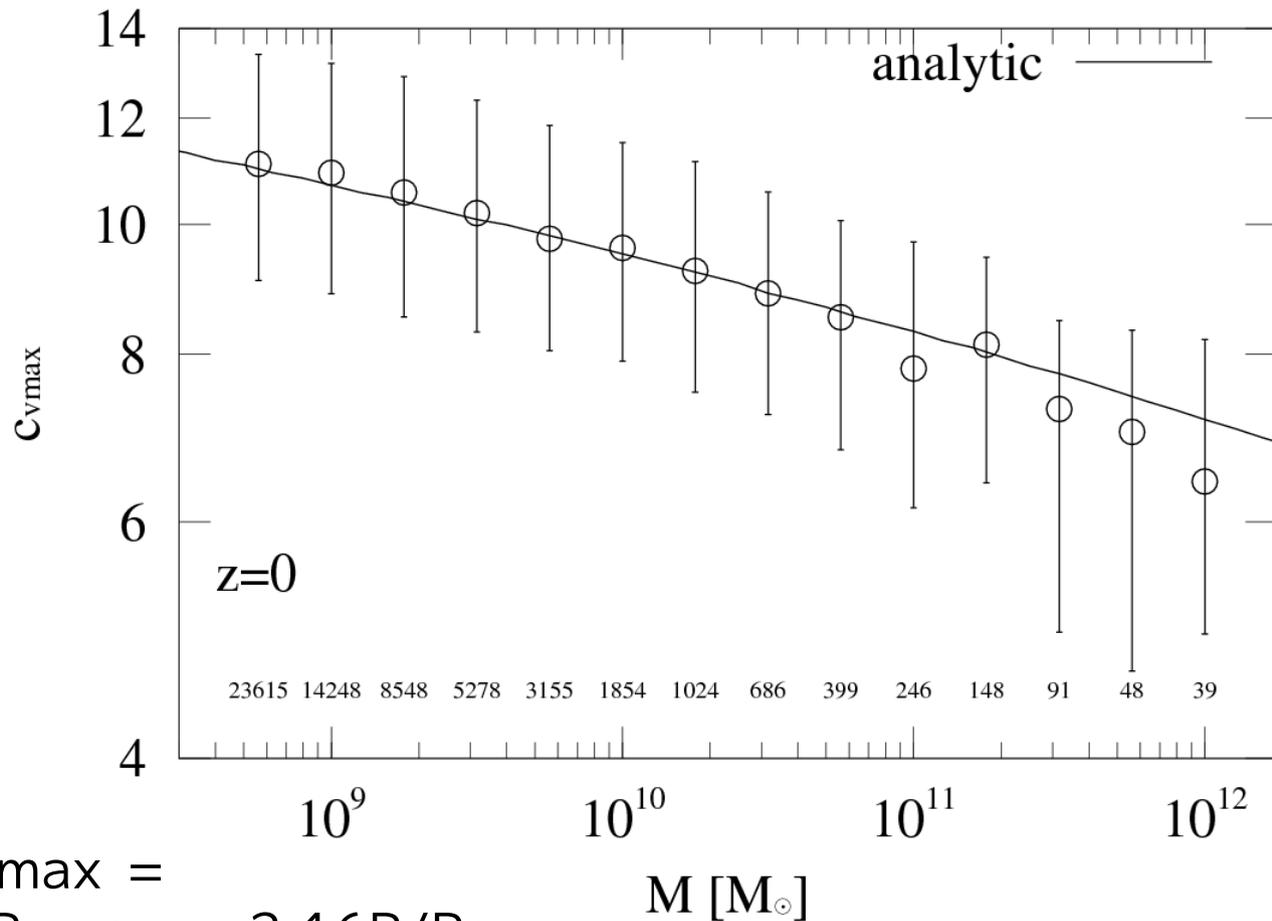
べき



- べきは極中心では -1 より浅くなる (Stadel+ 2009, Navarro+ 2010)
中心のべきの大きな分散

mass-concentration ($z=0$)

- ハロー質量が小さくなるほど依存性が弱くなる
- Bullock+ 2001, Neto+2007, Maccio+2008 等で提案されているような Single power law を外挿すると中心密度を過剰に見積もってしまう
- Press Schechter 関数からの理論的見積もりと良く合う

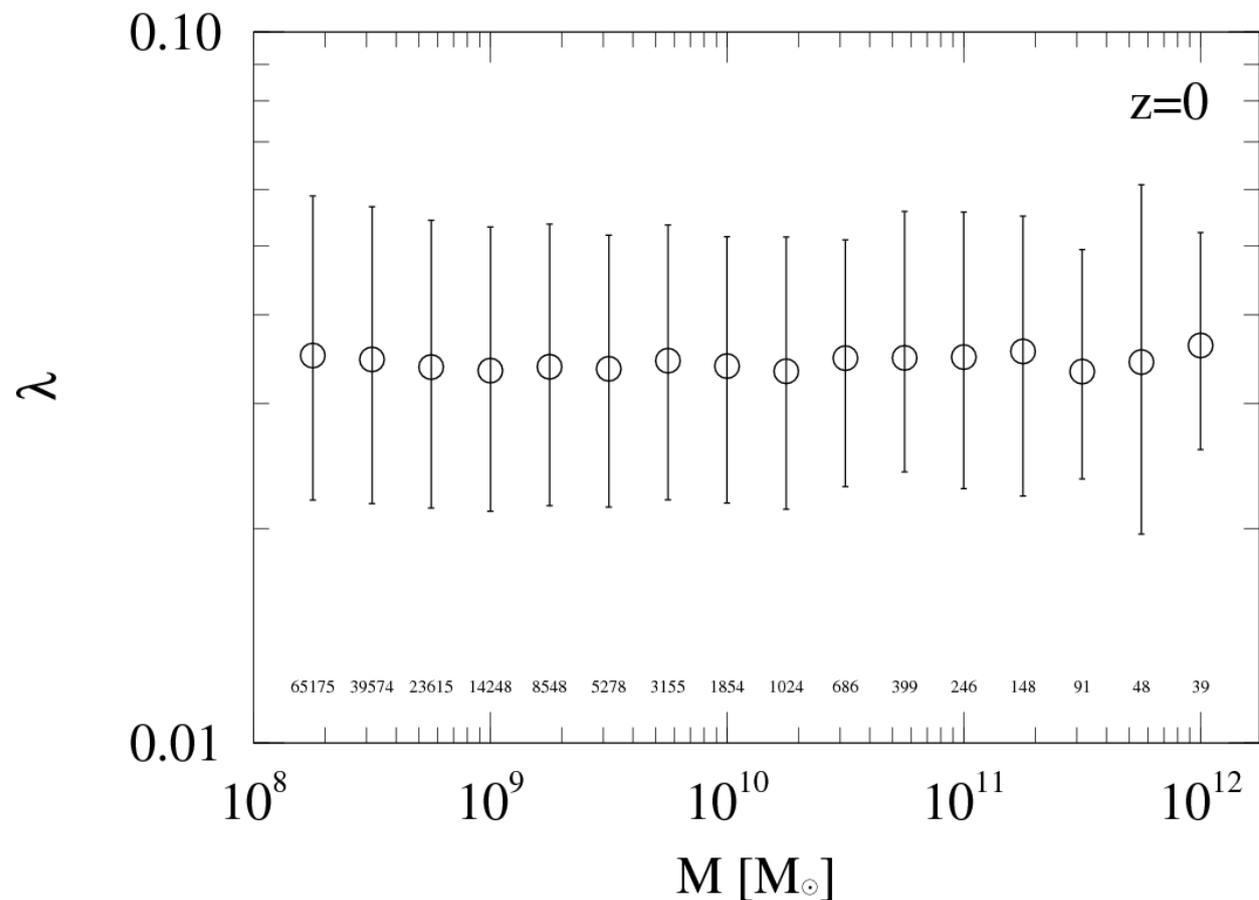


$$C_{vmax} = R/R_{vmax} \sim 2.16 R/R_s$$

mass-spin ($z=0$)

- Bollock+2001 の形式、ハローの全角運動量 $(\sqrt{2}$ ハロー質量 * ハロー半径 * ハロー半径での回転速度)
- $\sim 10^8$ 太陽質量まで質量との相関はない ($\lambda \sim 0.034$)

$$\lambda = \frac{J}{\sqrt{2} M V R}$$



まとめ

- 異機種混合グリッド環境における宇宙論的 N 体用コードを開発し、超大規模シミュレーションの実現可能性を示した
 - ひとつの計算機ではできない規模のシミュレーションが可能となった
- 超大規模宇宙論的 N 体シミュレーションの結果を用いて、 $\sim 10^7$ 太陽質量のハローの統計的性質を調べた
 - 質量関数は $\sim 10^7$ 太陽質量まで Sheth & Tormen の関数で良くフィットできる
 - コンセントレーションは質量に弱く依存、小さいハローほど依存性が弱い
 - $\sim 10^8$ 太陽質量くらいだと従来言われていた依存性より弱く、従来のフィッティングを使うと、中心密度を過剰に見積もってしまうことに注意する必要がある