

課題4 —ダークマターの密度ゆらぎから 生まれる第1世代天体形成

牧野淳一郎

東工大理工学研究科理学研究流動機構

ボトムライン

課題4でやりたいこと

- ダークマターハローから惑星形成までの(主に)重力による構造形成の(輻射・磁場が重要でないというわけではない)
- 空間・時間的にアダプティブな大規模並列コードでのシミュレーションによる理解

話の構成

- 課題4の人員構成とテーマ
- 扱うべきテーマと分野の現状
 - － ダークマターハロー (今日は主にここの話の概要)
 - － 初代星
 - － 銀河形成
 - － 星形成
 - － 惑星形成

課題4の人員構成

- 代表: 牧野
- 運営委員で関係する人: 梅村、松元、富阪
- それ以外の関係する研究者(雇用するポスドク以外)
 - 吉田直紀(東大IPMU)、小久保英一郎、大須賀健(国立天文台)、井田茂(東工大)等
- 雇用(予定、支援研究者含む)ポスドク
 - 岡本、長谷川、石山(筑波)、斎藤、馬場(東工大)、高橋(国立天文台)

テーマと人の関係

ダークマターハロー	石山	牧野・梅村・吉田
銀河形成	斎藤、馬場、長谷川	牧野・梅村
星・惑星形成	—	富阪、小久保、井田
ブラックホール成長	高橋	大須賀

明らかな問題点: 星・惑星形成に人がいない。

現在までのポスドク雇用・研究の進め方の考え方

- まずは重要なテーマでかつ人材もいてコードの開発も進んでいるもの
をやる
- そうでないものは人材育成から、、、

ダークマターハロー

- 宇宙の物質・エネルギーの大体 5% くらいがバリオン (普通の物質)
- 20% くらいがダークマター (正体不明の素粒子)
- 75% くらいが「ダークエネルギー」
- 「重力による構造形成」は基本的にダークマターの構造形成
- もちろん、見えるものは星やガス

ダークマターだけの構造形成を考える意味

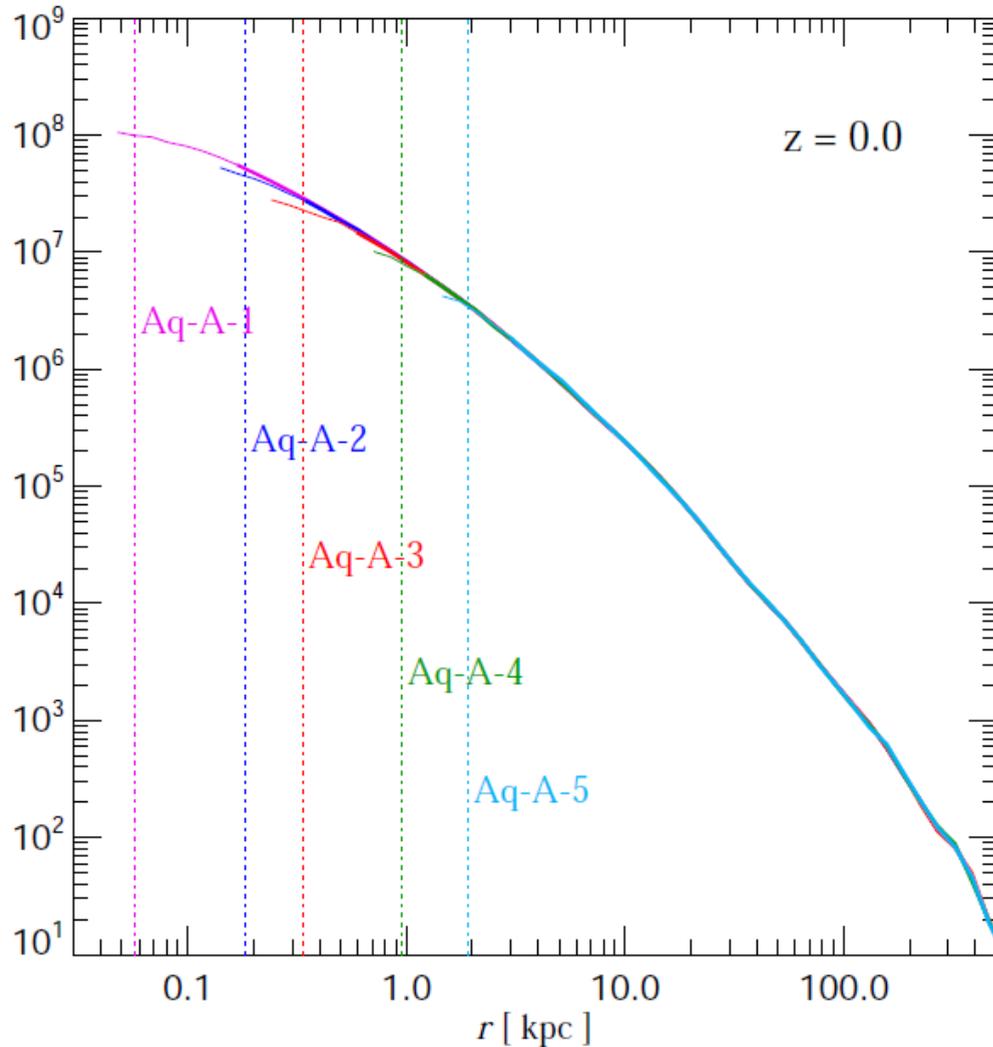
- ダークマターの構造形成自体はバリオンの影響を「あまり」うけない:
バリオンなしの計算でもわかることがある
- ある意味「もっとも簡単」な問題: 正しい答を求められないようでは話にならない。バリオンがはいった計算は信用できるのか?
- ダークマター粒子の性質によっては直接観測できるかも。地球近傍での分布を予測することは重要

ダークマターの構造形成シミュレーション

アニメーション1 アニメーション2

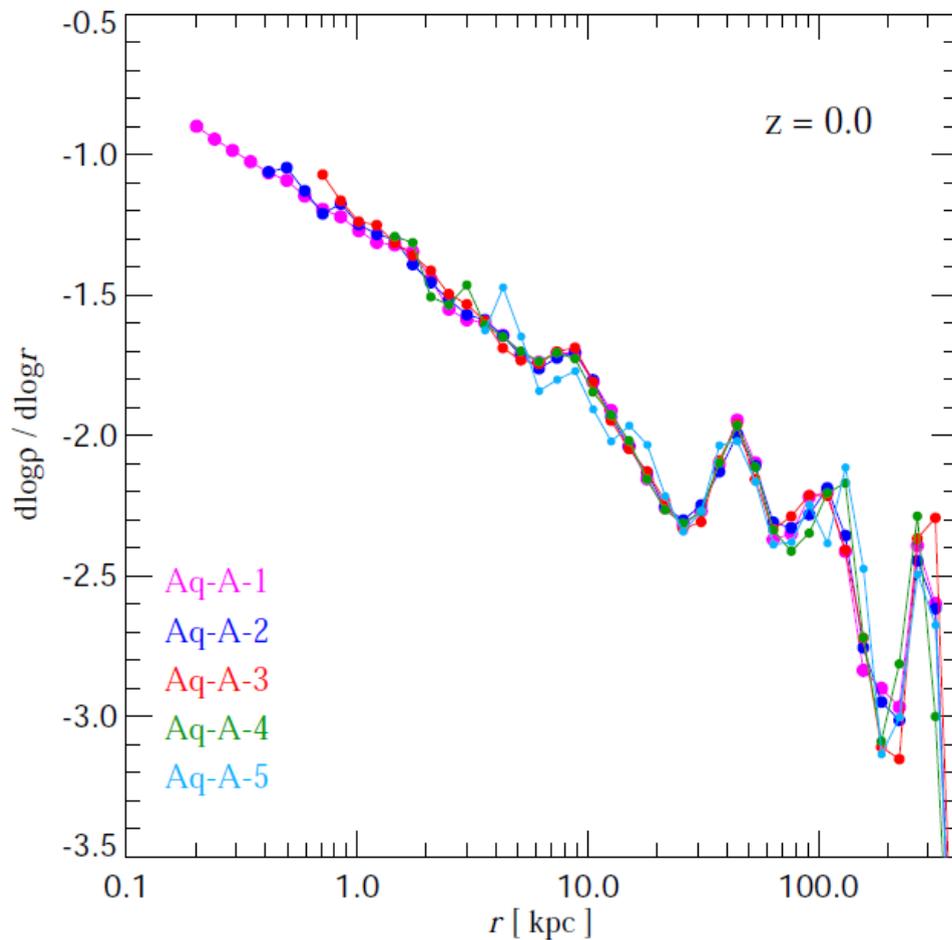
Ishiyama et al. 2009 から。粒子数 1600^3 では天文台の Cray XT4 2048 コアを使って数週間の計算 (アニメーションは 1024^3 のもの)

ダークマターハローの構造



現時点で最大粒子数、
最高分解能の計算:
Springel et al
(2008)
粒子数を3桁変えて
チェック
それなりに収束?

密度のべき



- 計算の範囲ではいかなるべきでもない。
- 何故こんなふうになるかは理論的には全く不明。

歴史的経緯

- 1996 年: NFW 論文、「初期ゆらぎのパワーやコスモロジーによらず、ダークマターハローの密度分布は NFW プロファイルで書ける」(引用数 2434)
 - 根拠は 1 万粒子くらいの計算
 - 緩和時間とかから、信頼性は ×
- 1997 年: Fukushige and Makino: 「100 万粒子くらい使ったら中心のべきはもっと深かった」(引用数 205)
- 1999 年: Moore et al. 「300 万使ったらやっぱり深い」、Moore99 プロファイル(引用数 1247)
- その後現在まで: 粒子数さらに 3 桁上昇、「NFW は正しくない (Navarro はそうはいわないが) が、ずっと中心では Moore99 より浅くなる。」

まとめると、、、

- ダークマターカスプの中心付近の密度構造は、「なんだか不思議なもの」
- 単純なべきではない。が、どこまでもべきが下がるかどうか不明。
- 緩和時間の見積もりでは計算はあっているようだが、、、

現在のところ、数値計算の結果が本当かどうかは？

- 初期ゆらぎ自体はほぼべき乗なものがはいっている。
- 粒子の質量以外に特徴的なスケールはない。

理論的な問題点

- 数値計算の結果はあっても、それを理解できる理屈がついてない
 - それ以前に、とても理屈がつきそうにない不思議な結果になっている
 - 分解能を上げると結果が大きく変わってきた
- そもそもこのやり方は原理的に大丈夫？

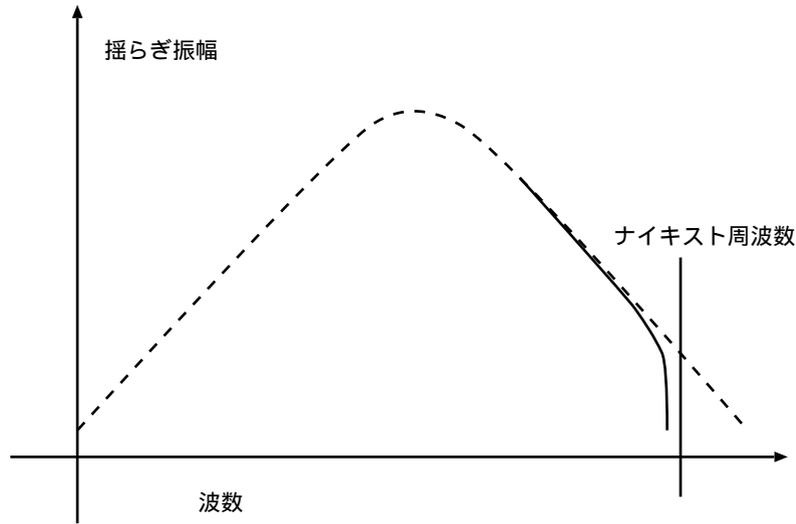
原理的な問題

宇宙論的 N 体シミュレーションは、「無衝突系」の正しいシミュレーションになっていない

初期条件の作り方:

1. 一様に粒子を置く (格子/グラス)
2. 密度ゆらぎのパワースペクトル (粒子間距離の倍とかの波長でカットオフ) に従って、ランダムなゆらぎを発生させ、粒子を線形成長解に従って動かす

最小の構造



CDM だと小さいものが先にできる = 最初にできる「ハロー」は粒子 10 個程度

(私を含む) 業界の信念: 階層的な合体成長のプロセスが構造を決めているので、最小の構造がちゃんと計算できているかどうかは結果に影響しないはず

誰かが確かめたわけではない

確かめる？

原理的には、確認は簡単。

- 初期ゆらぎのカットオフ波長を固定して
- 粒子数 (質量分解能) を数桁くらいふってシミュレーションする

現実的な問題:

- ものすごい計算時間がかかる。
- その割に地味な仕事。論文数稼げない

最小ハローの構造

カットオフがナイキスト周波数より大きな計算で、宇宙物理学的に意味がある話＝最小ハローの構造

現実のダークマター: free streaming によるカットオフ波長がある、というのが常識的なモデル (波長はどんな粒子かによるが、例えば地球質量くらい)

最小質量ハロー: 地球質量くらい、大きさは 100 AU くらい。

- このハローはどんな構造か
- 太陽近傍で生き残っているのか

最小ハローの構造を考える意味

主な問題:生き残っているかどうか

これは観測可能性には極めて大きな影響

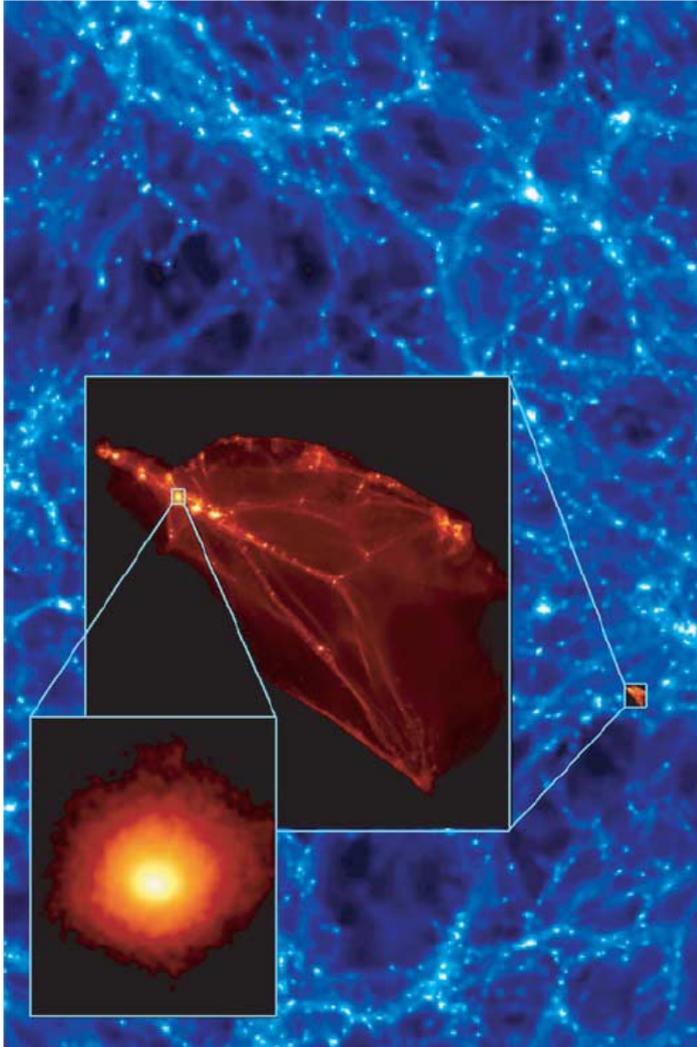
- 直接検出: 密度が平均密度とは違う、、、
- 対消滅: 生き残っていれば圧倒的な寄与

生き残るかどうかを決める要因

- 合体成長の過程で少し大きなハローに吸収されてなくなる
- ずっと大きなハローの中でも、潮汐破壊される
- 恒星等によって潮汐破壊される

いずれにしても、中心部分の構造が本質的に重要。

これまでの研究

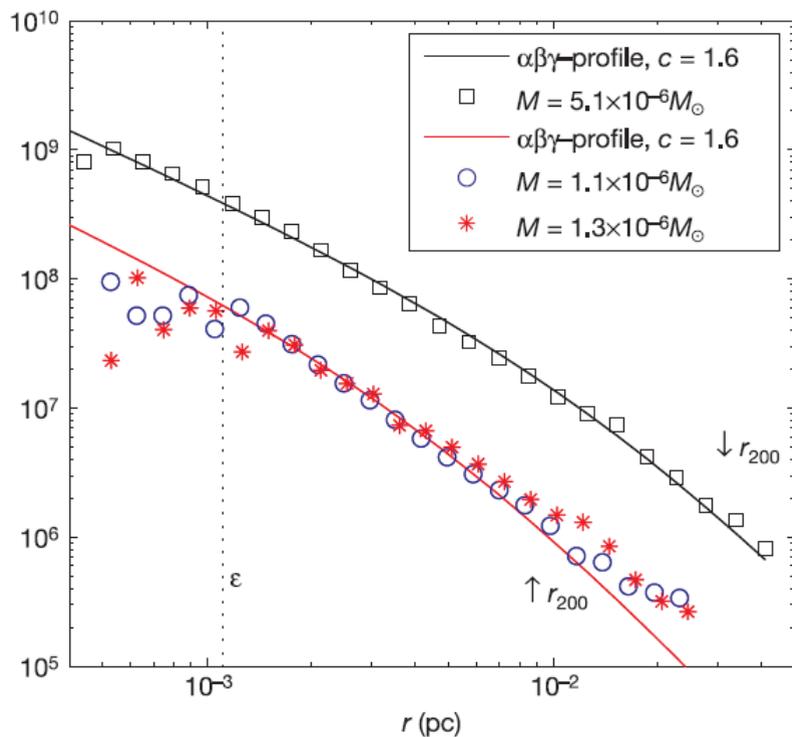


といってもほとんどこれだけ: Diemand
et al. 2005, Nature 433, 389

基本的に普通の宇宙論的シミュレー
ション

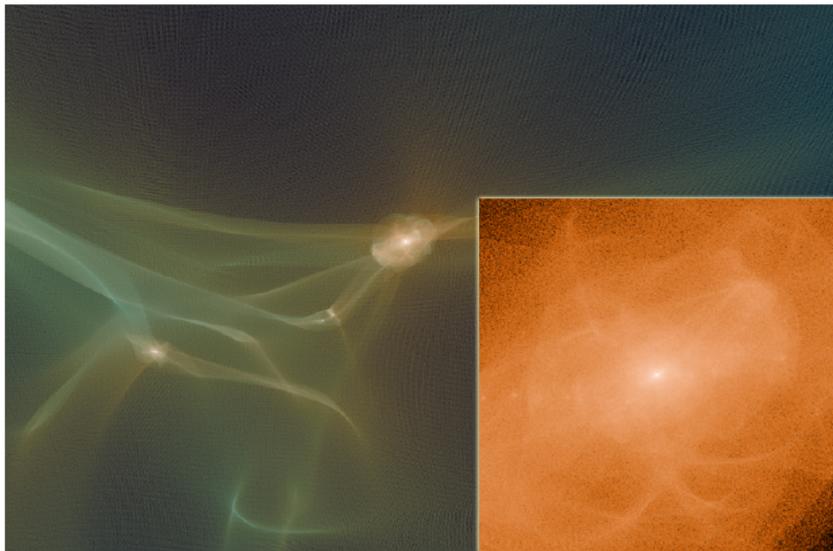
地球スケールのハローを 10^4 粒子くらい
で分解

密度分布



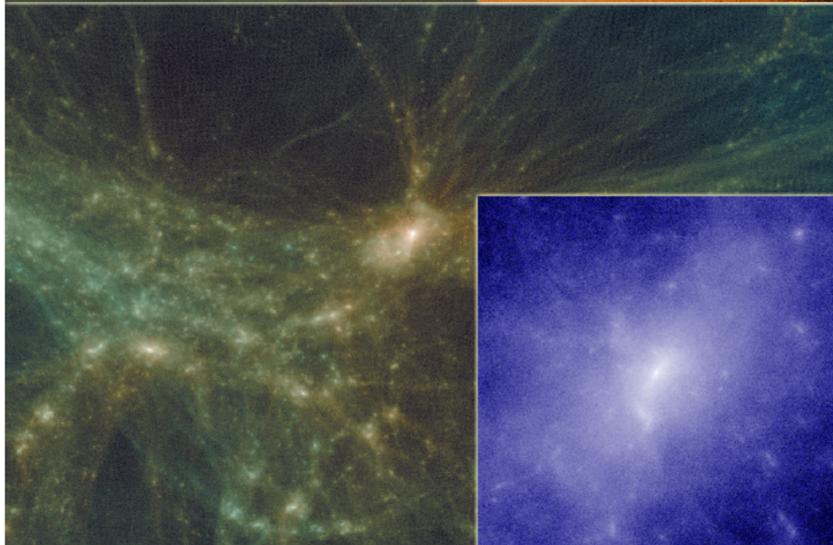
- NFW の元々の分解能が悪い
計算と変わらない
- 粒子数が少ないからまあ当然
- 多分全然間違っている

我々の計算



Ishiyama et al., 2010

粒子数 1024^3



Diemand et al. の 100 倍の粒子数。

- 上: カットオフあり
- 下: カットオフなし (比較用)

カットオフがある場合には深いべき乗カスプになる

戦略プログラムでのターゲット

- 最小スケールからのボトムアップ
- 従来型の、銀河・銀河団スケール

の両方のシミュレーションについて、 10^{12} 粒子スケールのシミュレーションを行う。これにより

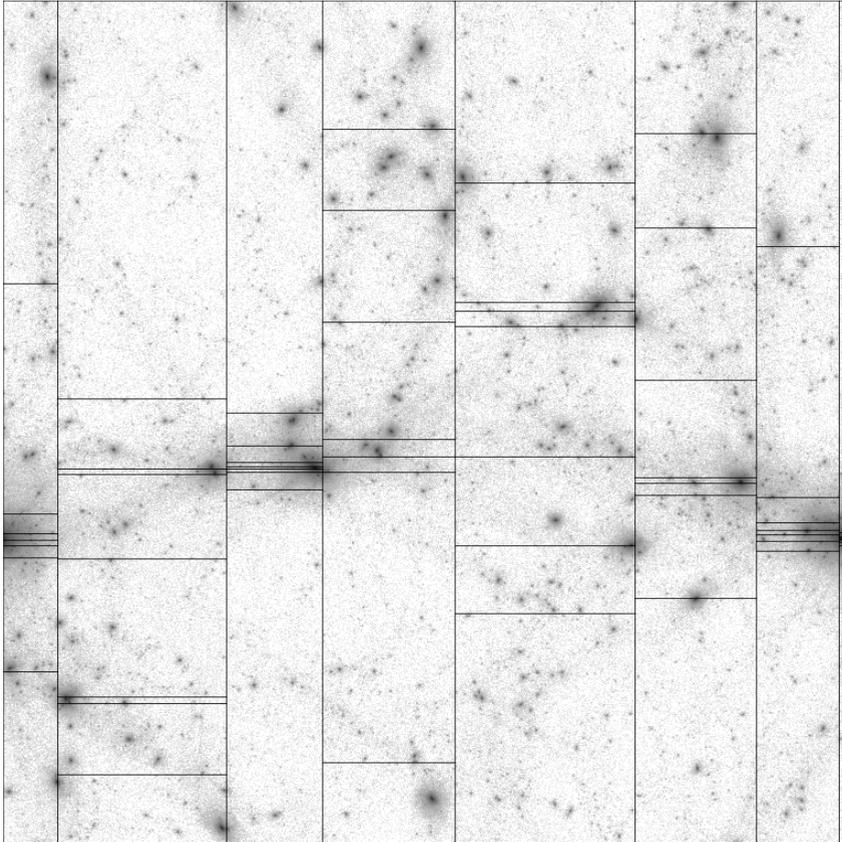
- 最小スケールのハローからの合体による成長プロセスが構造をどのように決めているかを解明し
- より大きなスケールのハローの構造の理解につなげたい

質量の幅: 10^{-6} から 10^{15} までの 10 の 21 乗。全体をシミュレーションはまだ当面無理なので、両端をやる。

世界の状況

- 大規模計算をやっているのは主にヨーロッパに3グループ。ドイツ・イギリス連合、スイス、フランス・スペイン連合
- それぞれ、大規模なスパコンをほぼ占有するか、重点プロジェクトとして利用。
- 計算コードの並列化、最適化については我々が大きくリード。

GreeM

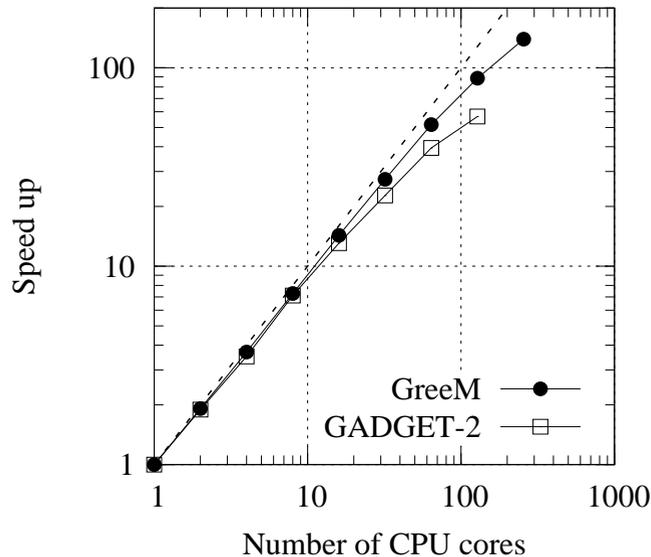


Ishiyama et al., 2009

- プロセッサグリッドは 3 次元 (3 次元トーラスに直接マップ)
- 各ノードの計算時間が同一になるように分割サイズを毎ステップ調整、粒子を再配置
- 国立天文台で 2048 コアでの大規模長時間計算の実績あり

スケーラビリティ

粒子数 256^3 でのスケーラビリティ



- GreeM はドイツのグループの Gadget-2 に比べて 128 コアで 2 倍程度の並列加速率。
- 実はそもそも単一ノード性能で同一 CPU だと数倍速い
- 1 コア当たり 100 万粒子程度の weak scaling ならほぼ 100% の並列加速率を実現

まとめ

- 課題4のターゲットのうち、ダークマターのための構造形成シミュレーションについて背景、国際的研究状況、コード開発の状況、戦略プログラムでの目標についてまとめた
- 計算規模として 10^{12} 粒子程度の計算を、銀河団スケール、地球-太陽質量スケールの両方について行うことが目標
- コード開発・並列化については世界的にも我々がリードしている。「京」のリソースが十分使えれば世界をリードする成果を出せる。