

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

戦略プログラム分野5ワークショップ 2011/5/19

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

- 実施体制等
- 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)
 - － 初代星
 - － 銀河形成
 - － 星形成
 - － 惑星形成 (時間があればこっちの話も)
- 戦略プログラムでの「戦略」

課題4 実施体制

- 責任者: 牧野 (東工大) — 斎藤、馬場
 - 梅村 (筑波大学) — 岡本、石山、長谷川 (似鳥)
 - 松元 (千葉大学)、大須賀 (国立天文台) — 高橋

(赤字は今年度から。委託研究申込書未着)

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	岡本、齋藤、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

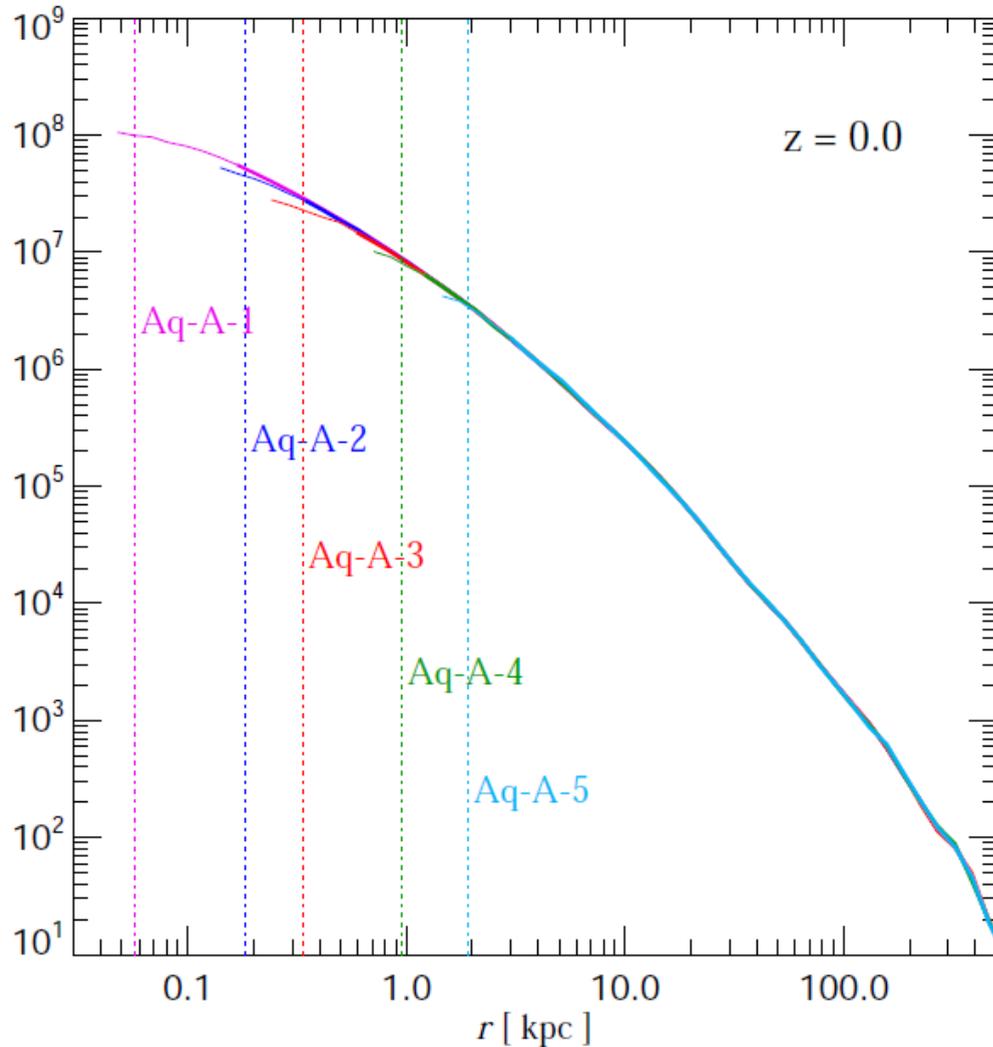
- ダークマターの構造形成自体はバリオンの影響を「あまり」うけない：バリオンなしの計算でもわかることがある
- ある意味「もっとも簡単」な問題：正しい答を求められないようでは話にならない。バリオンがはいった計算は信用できるのか？
- ダークマター粒子の性質によっては直接観測できるかも。地球近傍での分布を予測することは重要

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

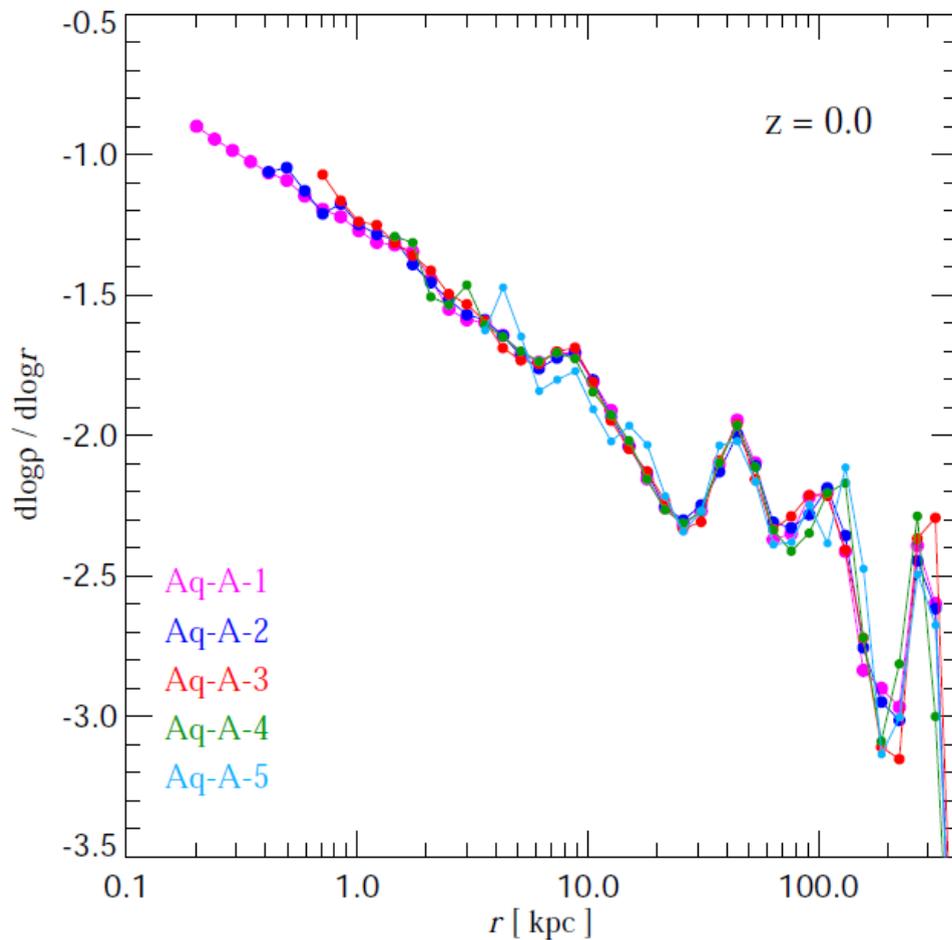
Ishiyama et al. 2009 から。粒子数 1600^3 では天文台の Cray XT4 2048 コアを使って数週間の計算 (アニメーションは 1024^3 のもの)

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、とても理屈が付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？

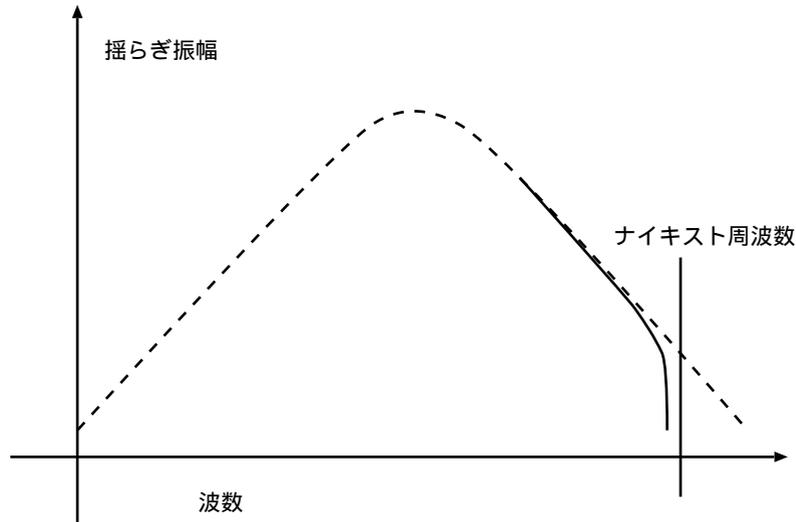
原理的な問題

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

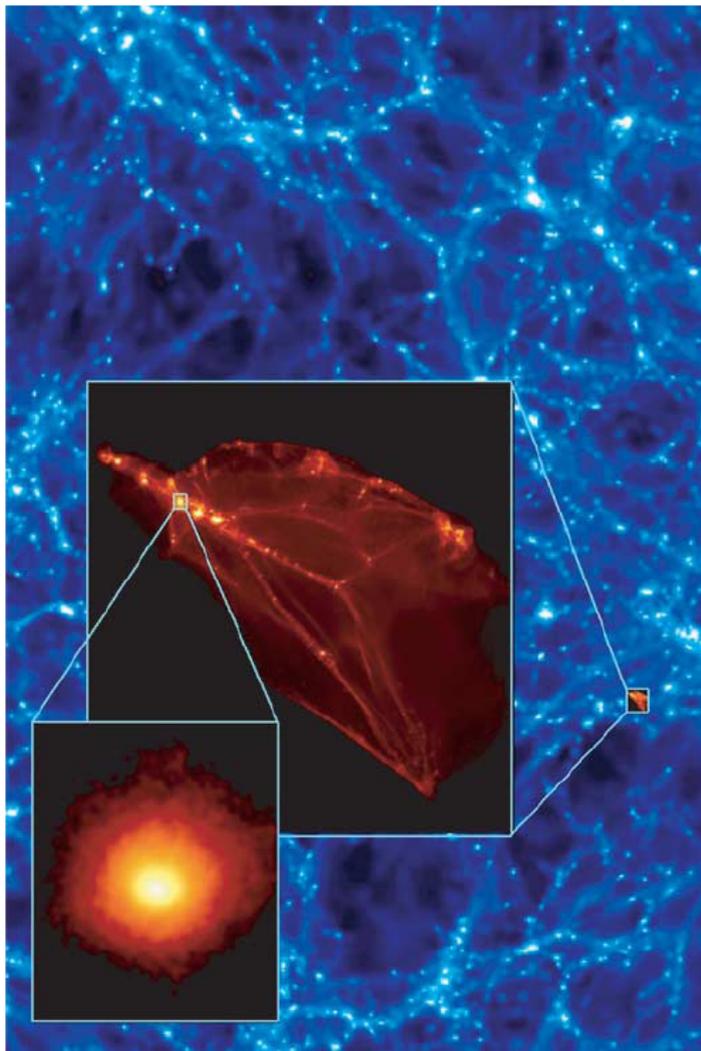
- 直接検出: 密度が平均密度とは違う、、、
- 対消滅: 生き残っていれば圧倒的な寄与

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

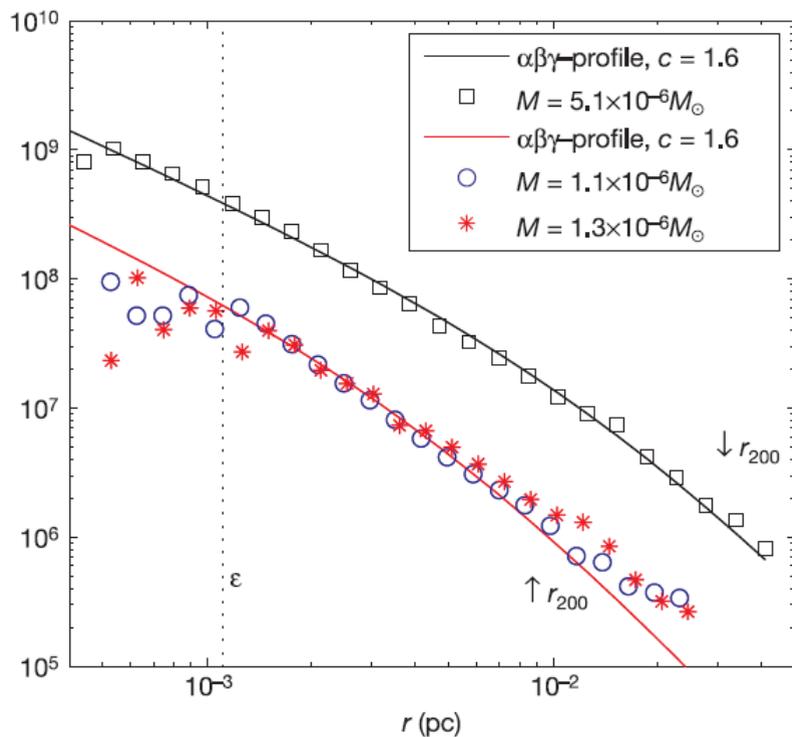


といってもほとんどこれだけ: Diemand
et al. 2005, Nature 433, 389

基本的に普通の宇宙論的シミュレー
ション

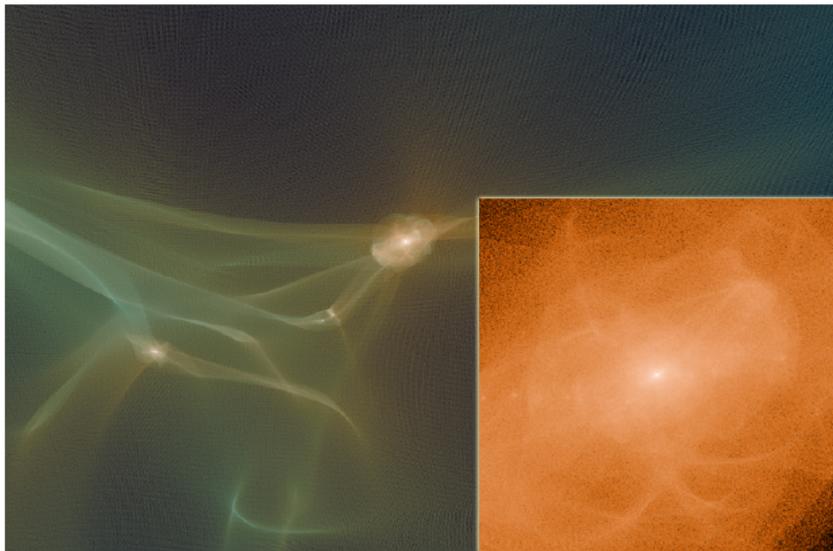
地球スケールのハローを 10^4 粒子くらい
で分解

密度分布



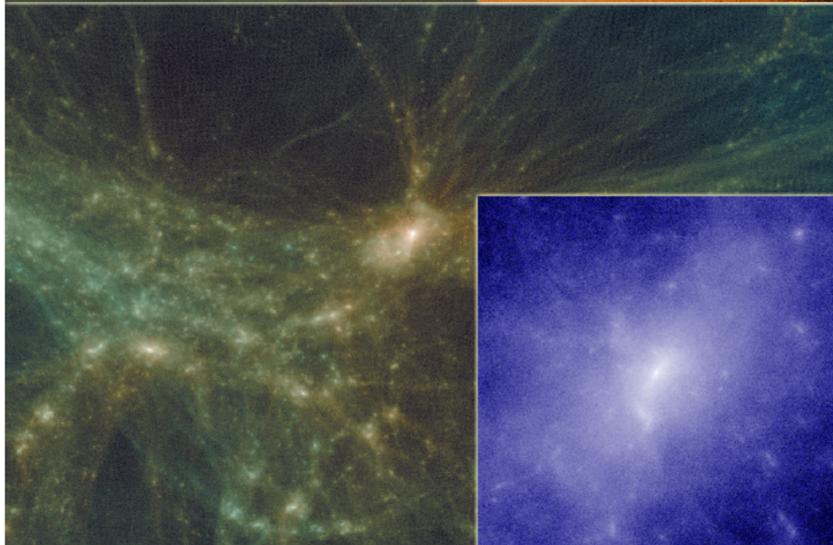
- NFW の元々の分解能が悪い
計算と変わらない
- 粒子数が少ないからまあ当然
- 多分全然間違っている

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

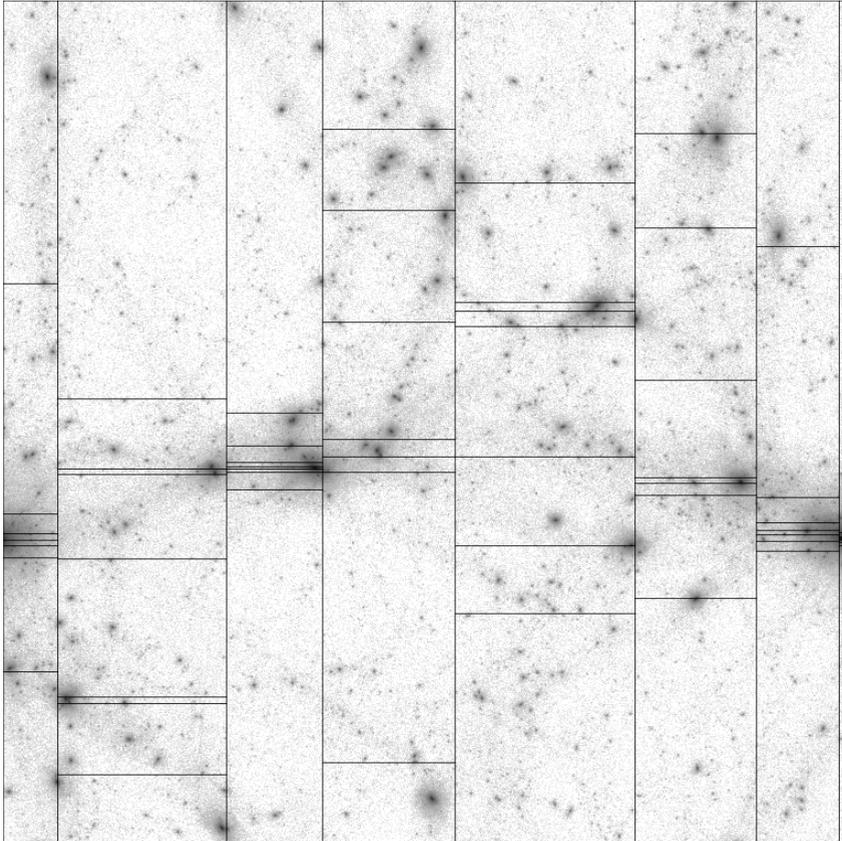
- 最小スケールのハローからの合体による成長プロセスが構造をどのように決めているかを解明し
- より大きなスケールのハローの構造の理解につなげたい

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

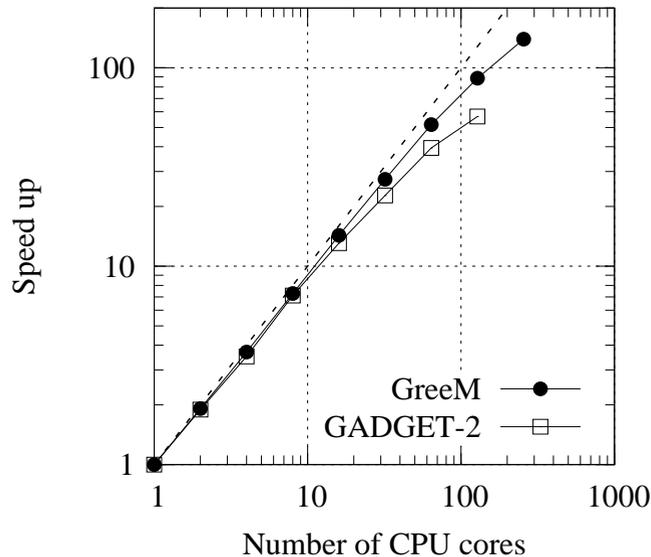


Ishiyama et al., 2009

- 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

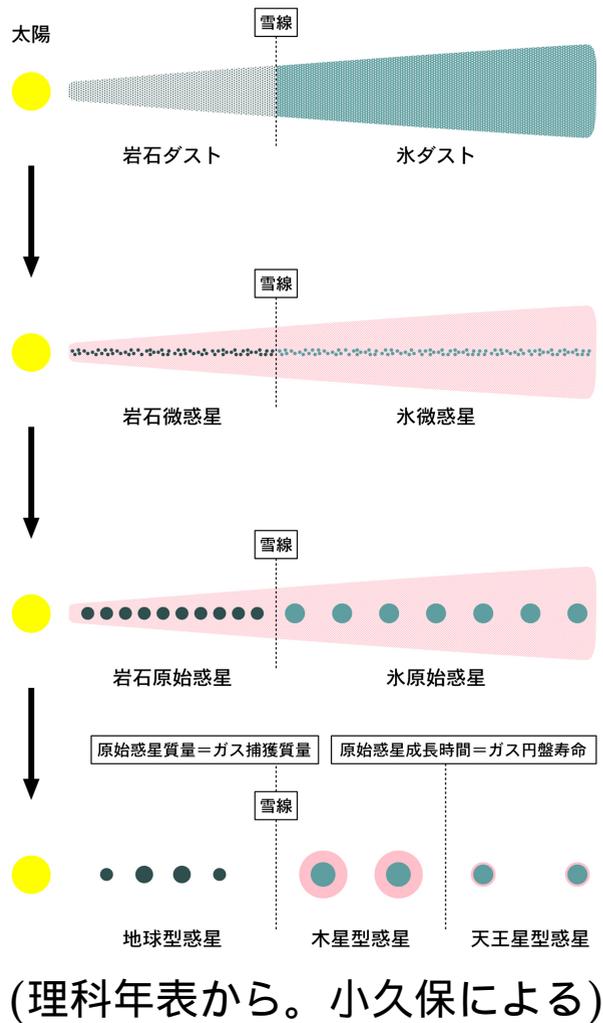


- GreeM はドイツのグループの Gadget-2 に比べて 128 コアで 2 倍程度の並列加速率。
- 実はそもそも単一ノード性能で同一 CPU だと数倍速い
- 1 コア当たり 100 万粒子程度の weak scaling ならほぼ 100% の並列加速率を実現

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。
- 標準的な惑星形成理論
- どのへんが問題か？
- 多体シミュレーション方法
- 新しい方法について

標準的な惑星形成理論



- 太陽の周りに原始惑星系円盤。水素、ヘリウム+それ以外。
- 太陽に近いところでは水は気体。外側は氷：惑星材料の量が違う
- ダストは赤道面に沈降、集まって「微惑星」になる。(10¹⁸g くらい)
- 微惑星同士がさらに重力相互作用で衝突・合体して「原始惑星」に(10万年くらい? 10²⁶g くらい)
- 原始惑星がさらに合体して地球型、あるいはガスを集めて木星型に

20年くらい前の状況

Hayashi, et al. 1985

- 微惑星から惑星へ、という基本的な描像は既にあった
- しかし、理論的には惑星ができるのに時間がかかりすぎる、という問題があった

何故時間がかかるということになっていたか？

- 惑星が成長すると成長速度が遅くなる (1/3 乗)
- 太陽から遠いと成長速度が遅くなる (3 乗)

海王星は存在しない(形成時間 100 億年以上)

形成時間問題への解

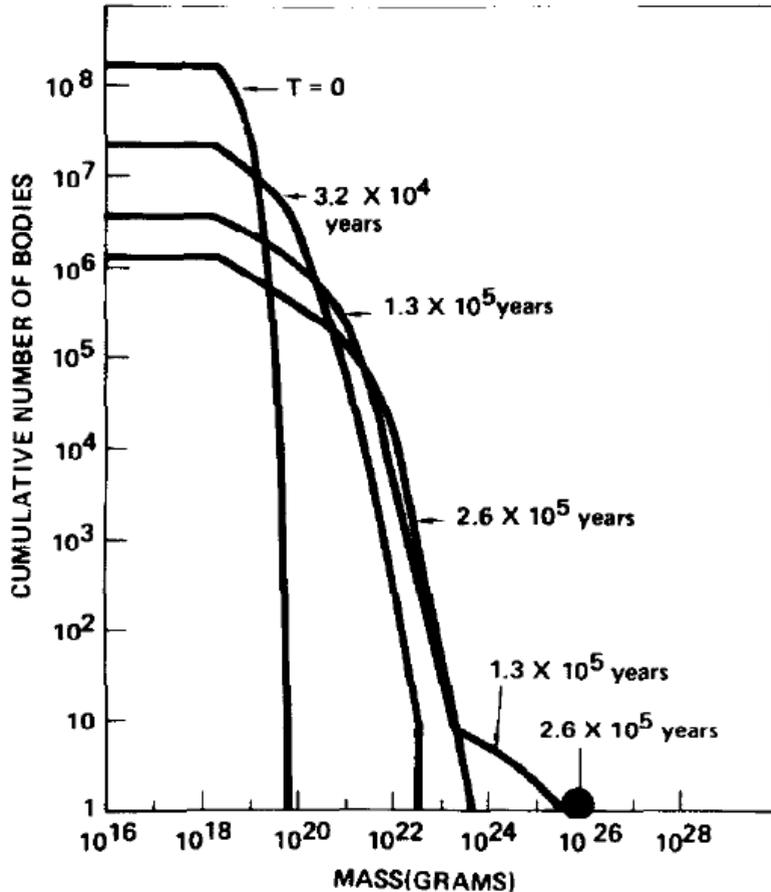
暴走的成長 (Wetherill and Stewart 1989)

- それまでの理解: 秩序的成長。微惑星は同じように重くなる
- 暴走的成長: 周りよりも少し重くなったものが他より速く成長してどんどん大きくなる

速く成長する理由

- 大きいので衝突断面積大きい
- 重いので、重力フォーカシングの効果も大きい
- ランダム速度が小さい(円軌道に近い)ので、重力フォーカシングの効果がさらに大きい

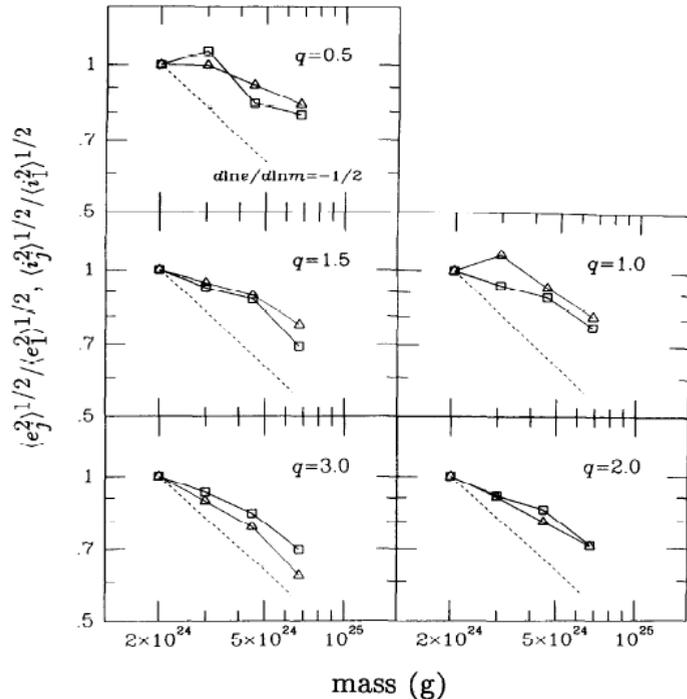
Wetherill and Stewart 1989



- 微惑星の質量分布の時間変化をモンテカルロ計算
- 衝突・合体の効果、速度分散等はモデル
- 水平方向空間分布は「一様」
- 最初深いべき (-2.5 乗くらい) の質量分布ができて、そこからさらに重いものができる

Ida and Makino 1992a,b, 1993

(私の名前は論文にはいってるけど全部井田さんの仕事、、、)

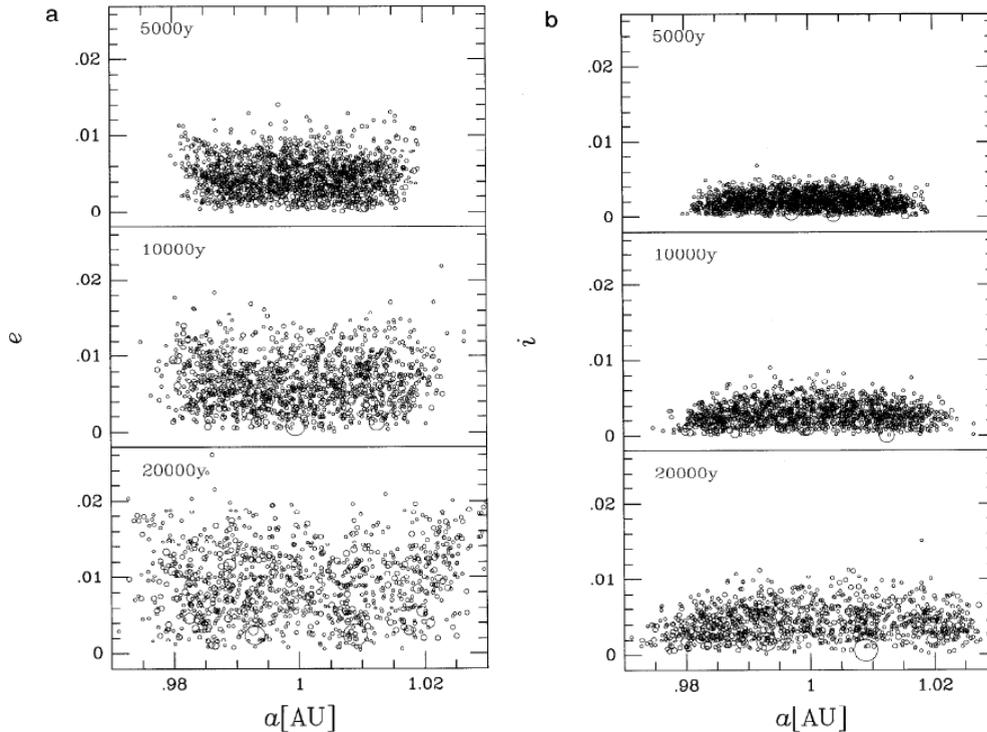


- (1992a) 単一質量での速度分散の時間進化を N 体計算
- (1992b) 複数質量での速度分散の質量依存性を計算
- 重いものが速度分散小さくなることを確認

(1993) 暴走的成長には限界があることを指摘。ある程度重くなると、自分自身が周りの微惑星の速度分散を大きくするので成長できなくなる
(=原始惑星)

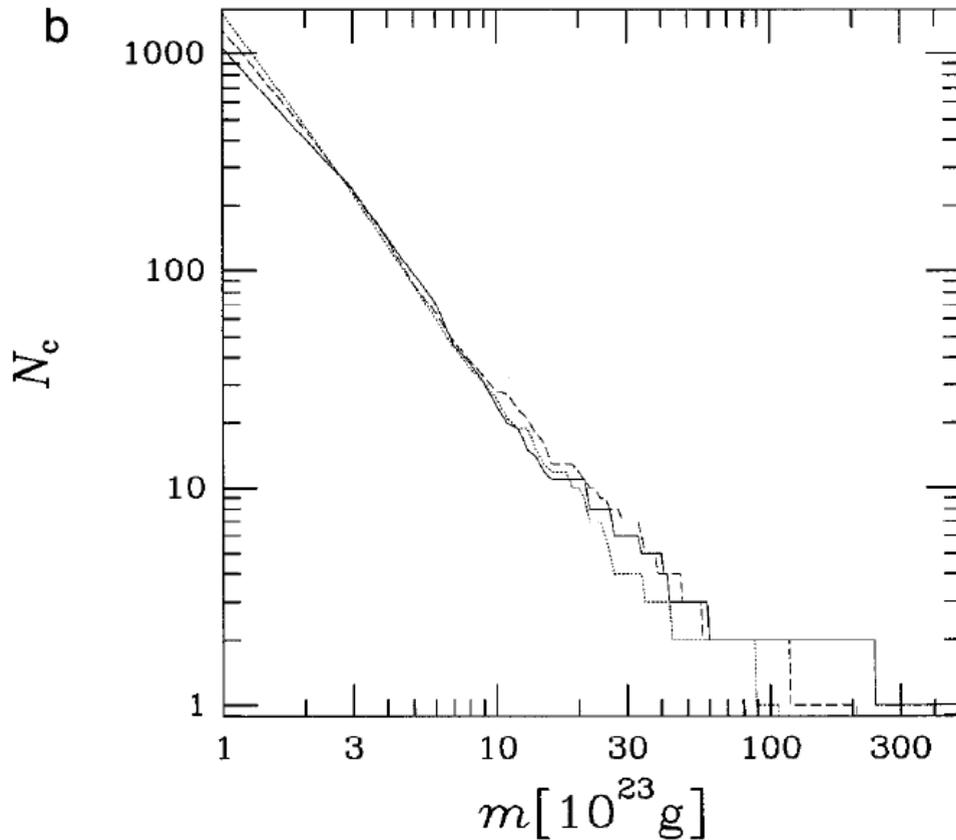
実は実際の合体・成長過程を N 体計算で調べてはいない

Kokubo and Ida 1996



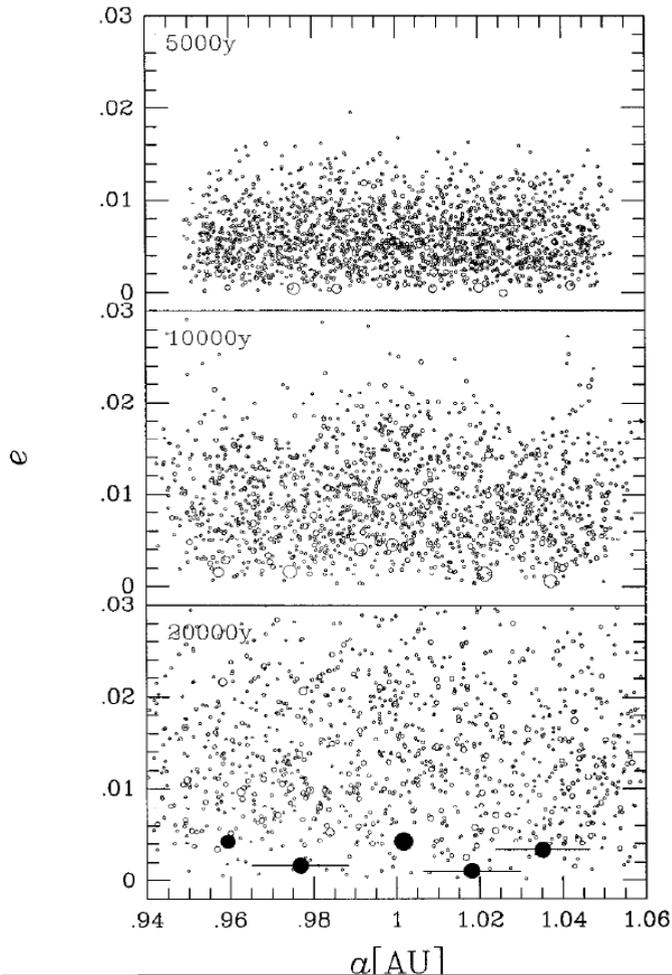
- 細いリング状領域の N 体計算、衝突・合体も扱う
- 衝突の時間スケールは惑星大きくして短く
- 暴的成長が起きることを確認

累積質量分布



- 等質量だったものが累積質量では $n \propto m^{-1.5}$ にまず進化
- もっとも重い一つがさらに成長
- 基本的に、Wetherill and Stewart 1989の結果を確認

寡占的成長



- Kokubo and Ida 1998
- 少し広い領域を計算
- ほぼ同じ質量の原始惑星がほぼ等間隔に並ぶ (大体 10 ヒル半径)
- 大雑把には、10 ヒル半径の質量を集める、ということで原始惑星の質量が決まる。

暴走的成長＋寡占的成長

- 形成時間の問題 (特に木星型) を解決 (?)
- 地球型惑星: 原始惑星からさらに作らないといけない
 - － 少数多体問題。理論的理解も計算も難しい
 - － 普通にやると、地球が作れないわけではないが現在の
ような離心率の小さい状態にはなかなかならない
 - － 色々なモデルが提案されている

問題は形成時間だけ？

実はなんとか問題というのは他にもある

- ダスト落下問題 (微惑星形成問題)
- 惑星落下問題

ダスト落下問題

- ダストは最初は小さい。これが原始太陽系星雲の中で衝突・合体で成長していくと考えると、途中の1メートルくらいになったところでガスの抵抗でエネルギー、角運動量を失って、太陽のほうに落ちてしまう。
- 落ちないようにするのが、「自己重力不安定モデル」。合体とかする前に赤道面に薄い層を作り、それが自己重力で一気に分裂、いきなりキロメートルサイズになるとする。
- 静かに赤道面につもるのは無理 (乱流が起こるはず) という批判あり
- ガス抵抗は普通の流体力学的抵抗

未解決の問題

惑星落下問題

- 微惑星が原始惑星に成長していく途中で、やっぱりガスの抵抗でエネルギー、角運動量を失って、太陽のほうに落ちてしまう。
- 落ちないようにする都合の良いモデルもあまりない
- ガス抵抗は重力相互作用によるもの。

これも未解決

何故未解決か？

もちろん、未解決なので何故かわからない。

と、いってしまってはしょうがない。

形成時間問題では？(後知恵で見ると、という話)

- みんなそろって大きくなる、という仮定が全然嘘だった
- が、その仮定に問題がある、とは多くの人には思っていなかった

ダスト落下問題ではどうか？

- ダスト成長時間スケール、落下時間スケールのどちらも、かなり単純なモデルによる理論的見積もり
- 実際に基礎過程からシミュレーションしたわけじゃない
- 理由： どうやって基礎過程からシミュレーションできるのか？だから

惑星落下問題は？

- ガス抵抗をいれた N 体計算はいくつかあり
- ガス円盤自体は解かない。抵抗を式でいれる
- なので、どうしても落ちる
- 惑星一つとガス、という計算もあり。これはやはり落ちる

どういふアプローチをするべきか？

ではどうするか？という話。

- 惑星落下問題: ガス円盤中での微惑星成長を完全に self-consistent に扱わないと、何が本当かはわからない
- 完全に self-consistent
 - ガス円盤自体の力学、個々の微惑星とガスの相互作用を流体の方程式を解いてだす
 - 微惑星自体の進化についても、衝突による破壊とかもいれて全体の分布をちゃんと解く

要するに、極めて力任せなアプローチが必要

力任せなことをやってない理由=力が足りないから

何故、どれくらい力が足りないか

- Kokubo and Ida 1999: 4000 粒子、2 万年 (GRAPE-4)
- 計算量は (粒子数)² × (年数)
- 例えば 100 万体には 4 万倍速い計算機必要。GRAPE-DR でもそこまで速くない

というわけで、ガスがどうこうという以前に破壊の効果を扱うのすら困難

惑星形成についてのまとめ

- 1980年代にあった形成時間の問題は、東工大グループ等の研究で一応解決
- ダスト落下(微惑星形成)問題、惑星落下問題等の基本的問題は未解決のまま
- 高分解能で self-consistent な計算機を、というのが方向(私の思うところでは)