

銀河団の宇宙論的シミュレーション

東京大学大学院 理学系研究科

物理学専攻 数物連携宇宙研究機構

黒川拓真

発表の流れ

1. 銀河団とは
2. 銀河団研究の意義
3. 最も簡単なモデル
ダークマター ～N体シミュレーション～
4. より詳細なモデル
バリオン ～流体シミュレーション～
5. N体＋流体シミュレーションの成果と問題点
更なる発展モデル ～近年の進展～
6. 銀河団研究の将来

銀河団とは

- 数十から千個の銀河集団
- 大きさは数 Mpc に及ぶ
- 力学平衡に達した天体としては宇宙最大
- 星やガスの他に大量のダークマターを含む

Credit: Optical: NASA/STScI

X-ray: NASA/CXC/MIT/E.-H Peng et al

銀河団研究の意義

宇宙論への応用

大規模構造・銀河団形成(N体シミュレーション)

宇宙論パラメータの制限(ダークマター、ダークエネルギー)

豊富な観測データ

X線 → 高温プラズマ(制動放射)

可視光 → 星、銀河

サブミリ(CMB) → Sunyaev-Zel'dovich効果

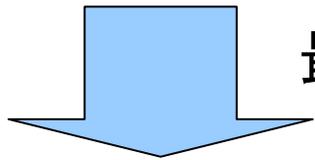
重力レンズ → ダークマター分布

コンピュータシミュレーション

計算機性能の向上によりこの十年で急速に進展

銀河団の力学

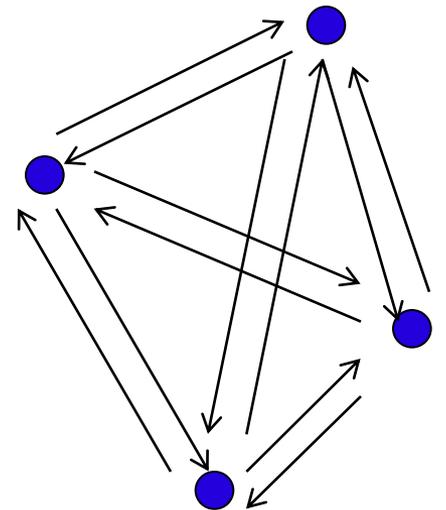
- 重力が支配的
- 主要な重力源はダークマター
- 初期密度ゆらぎが重力不安定性によって成長→銀河団形成



最もシンプルなモデル

N体シミュレーション

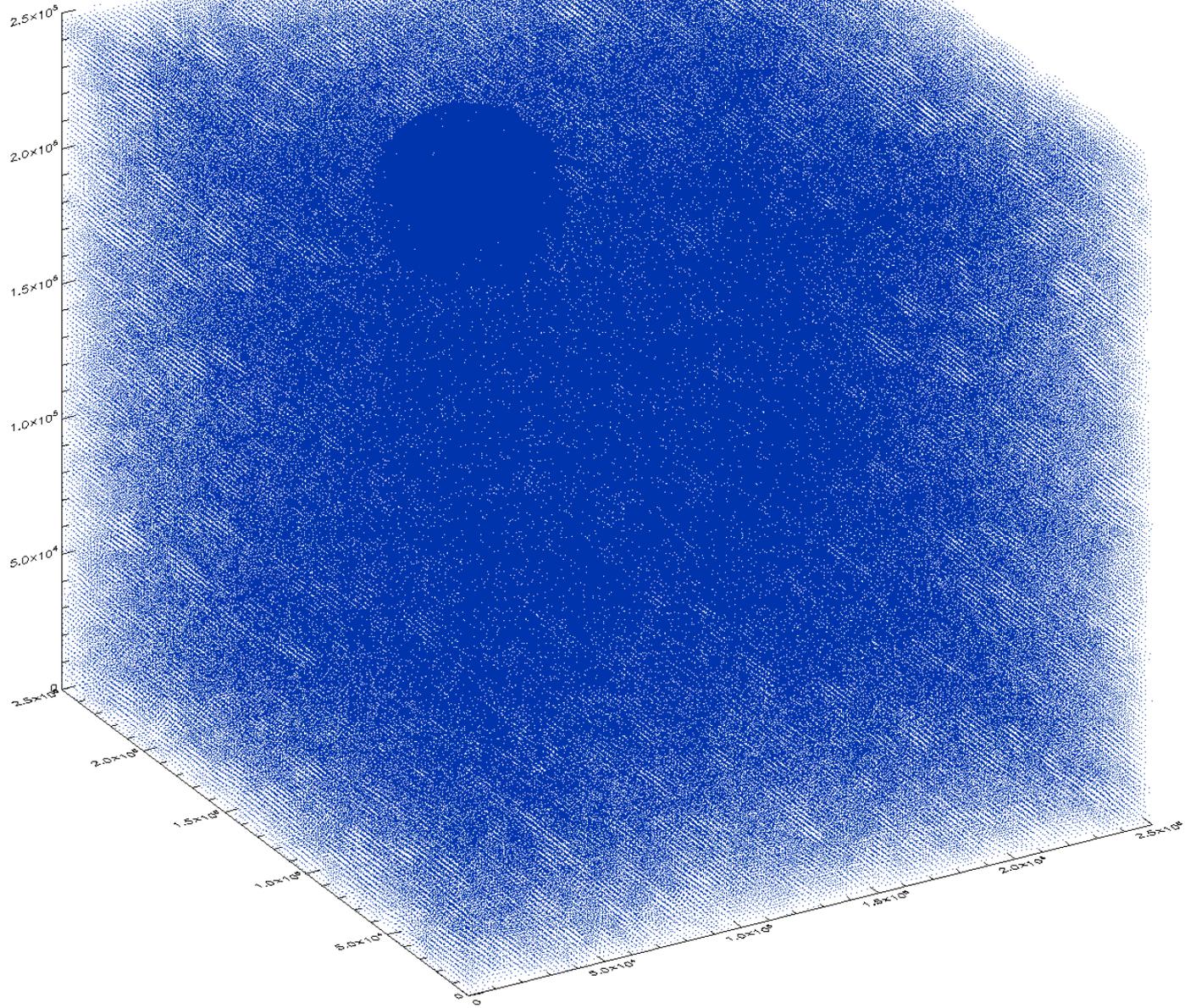
- N個の粒子間の重力を直接計算
- ダークマターのみ
 - 無衝突粒子、重力相互作用のみ



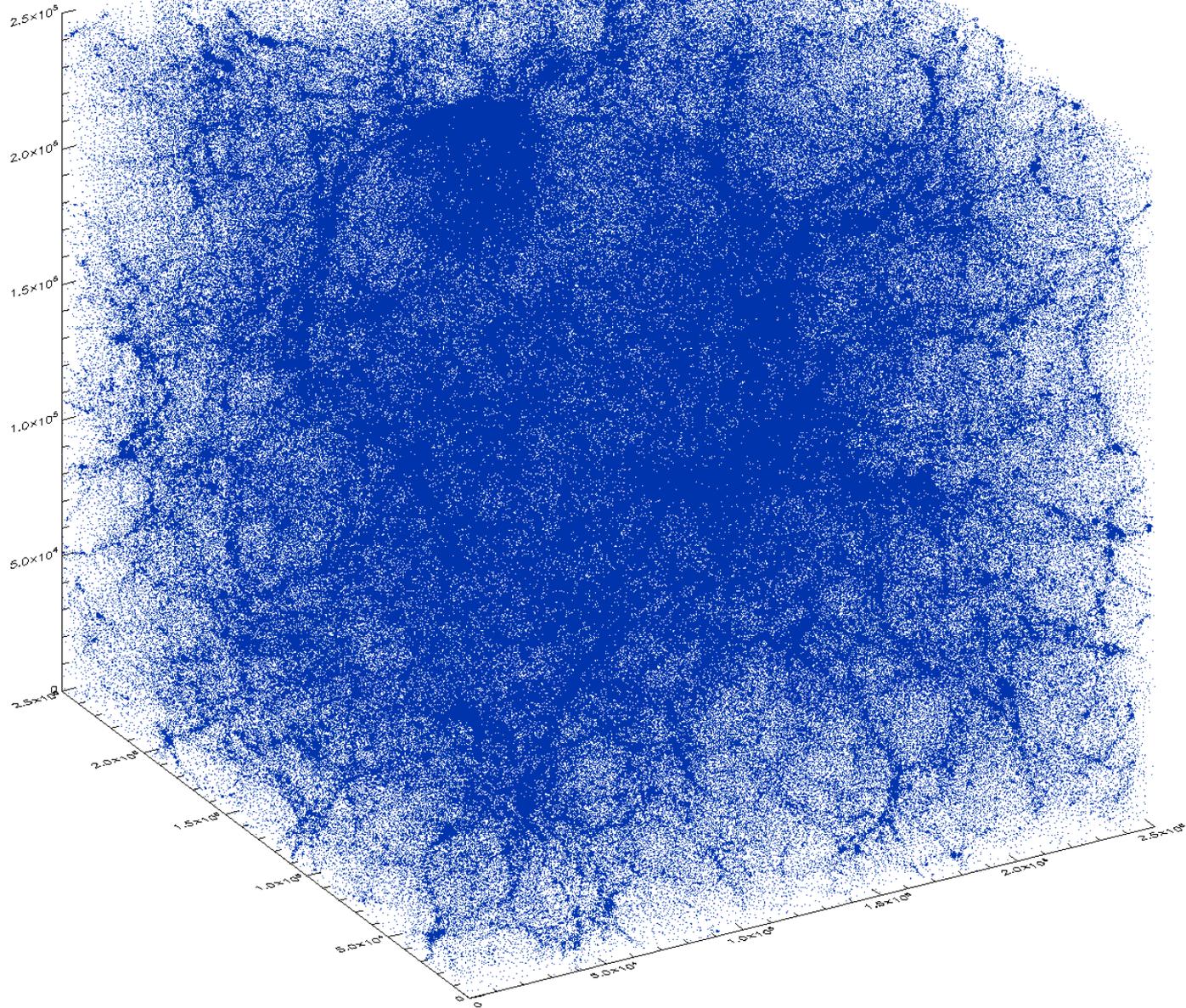
N体シミュレーションの例

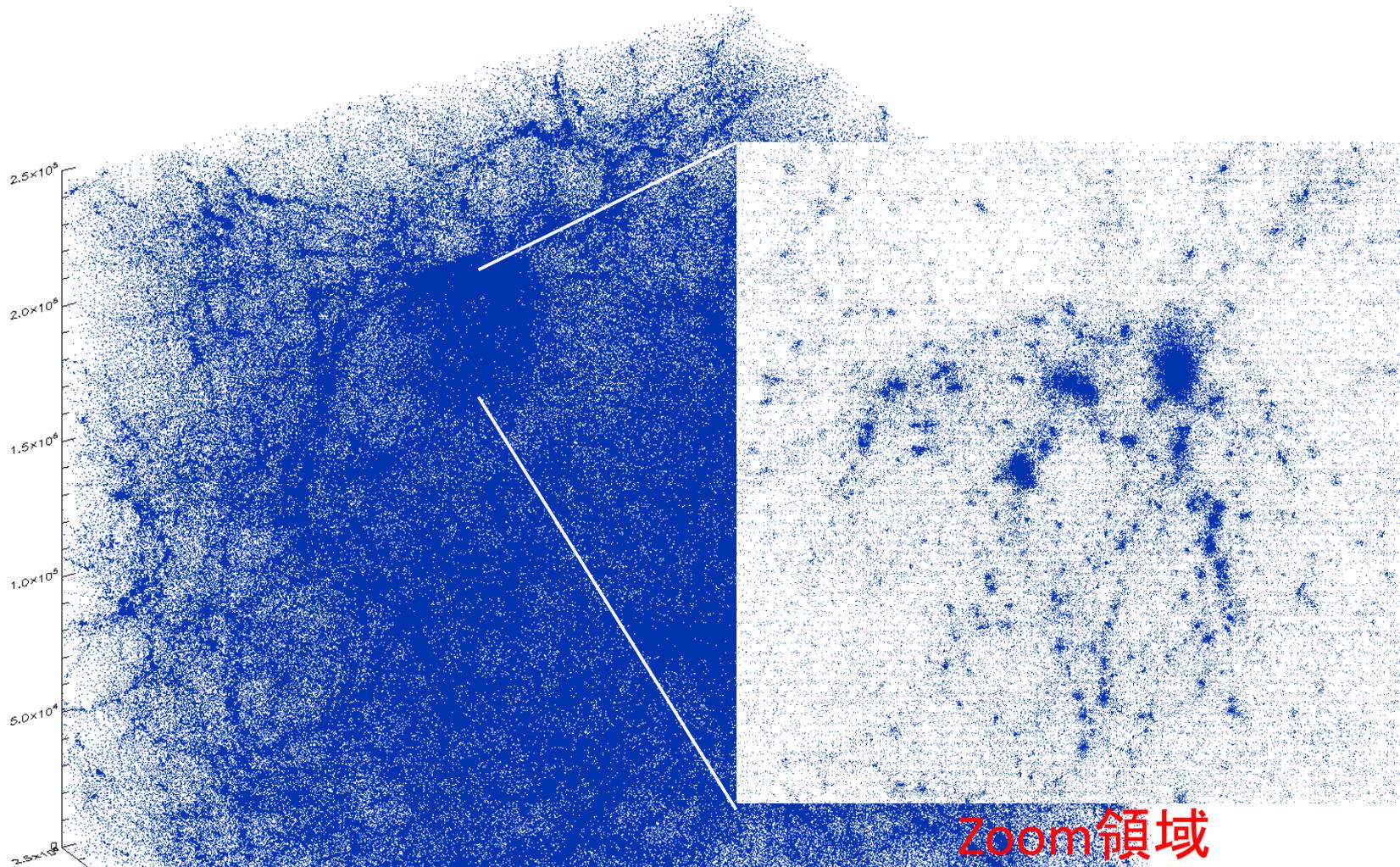
- 計算コード GADGET-2 <http://www.mpa-garching.mpg.de/gadget/right.html>
 - ＋ Zoom-In法 (特定の領域のみ解像度=粒子数を上げる)
- 相互作用 重力のみ
- 赤方偏移 $z=99\sim 0$
- 粒子数 = 128^3
- ボックスサイズ = $250Mpc$
- 初期条件 宇宙の初期密度揺らぎ (観測から決定)
- 境界条件 周期境界条件
- Λ CDMモデル

初期状態



シミュレーション結果





Zoom領域
(高解像度=粒子数大)

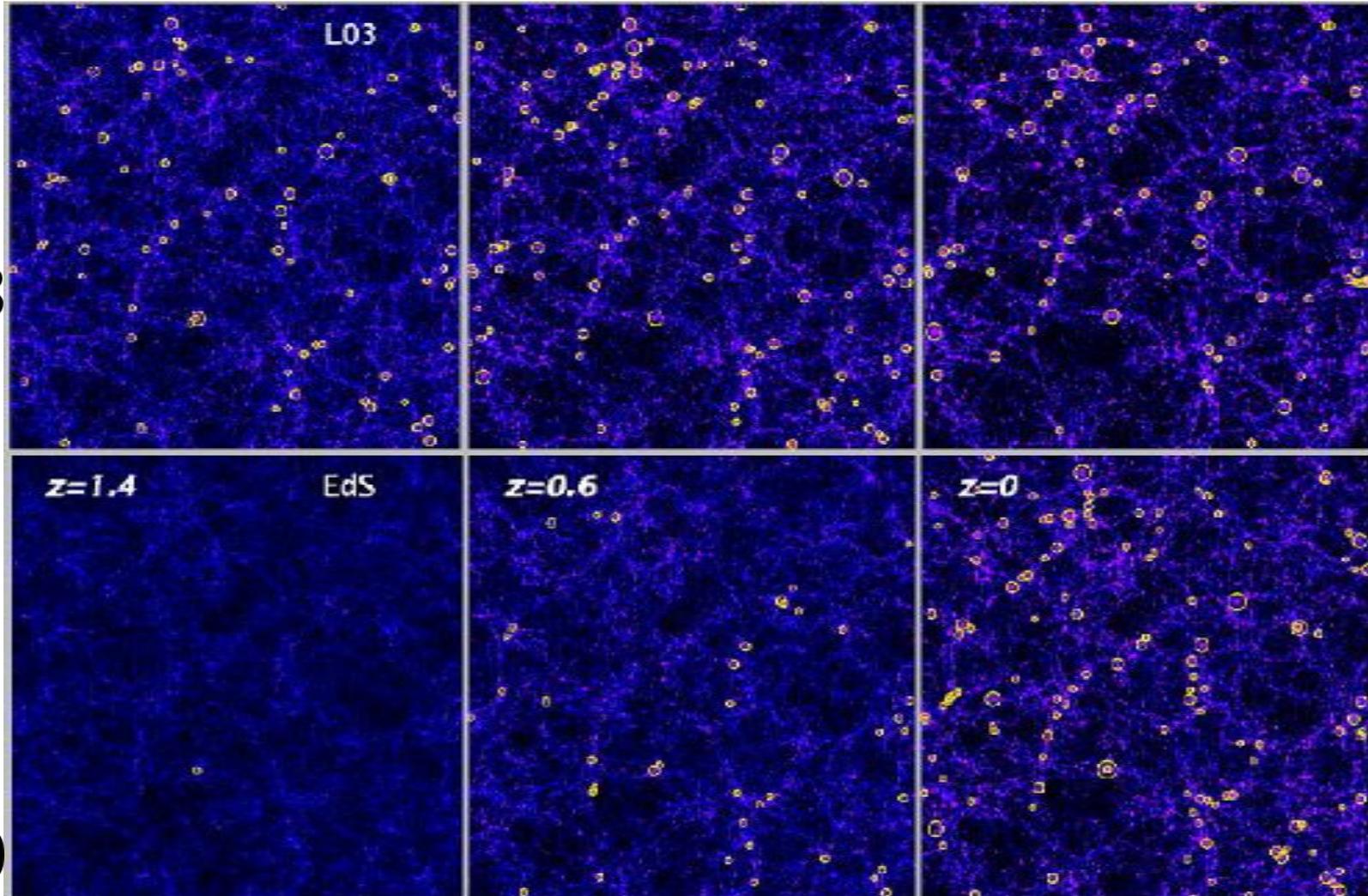
最も単純なモデルでも、大規模構造や
銀河団 (= ダークマターハロ 拡大図)
の形成が再現されている

宇宙論への応用例

銀河団形成時期の宇宙モデル依存性 (N体シミュレーション)

点: 銀河団
曲率0

$$\Omega_m = 0.3$$
$$\Omega_\Lambda = 0.7$$



バリオン成分

バリオン(=ガス)成分を入れる

→ 様々な量を観測と比較可能

 流体力学的取扱い

流体計算スキーム

• 衝撃波捕獲法 (shock-capturing scheme) : Euler的解法

メリット 物理量の不連続(衝撃波など)を良く記述できる

デメリット 計算量が多い

→ + 適合細分化格子 (Adaptive Mesh Refinement : AMR)

・必要な領域のみ解像度を上げる手法

• SPH法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) : Lagrange的解法(粒子法)

メリット 興味のある領域(高密度領域など)に自然に計算量をつぎ込める

デメリット 人工粘性が必要, 不連続量の記述がうまくいかない

N体＋流体シミュレーションの成果と問題点

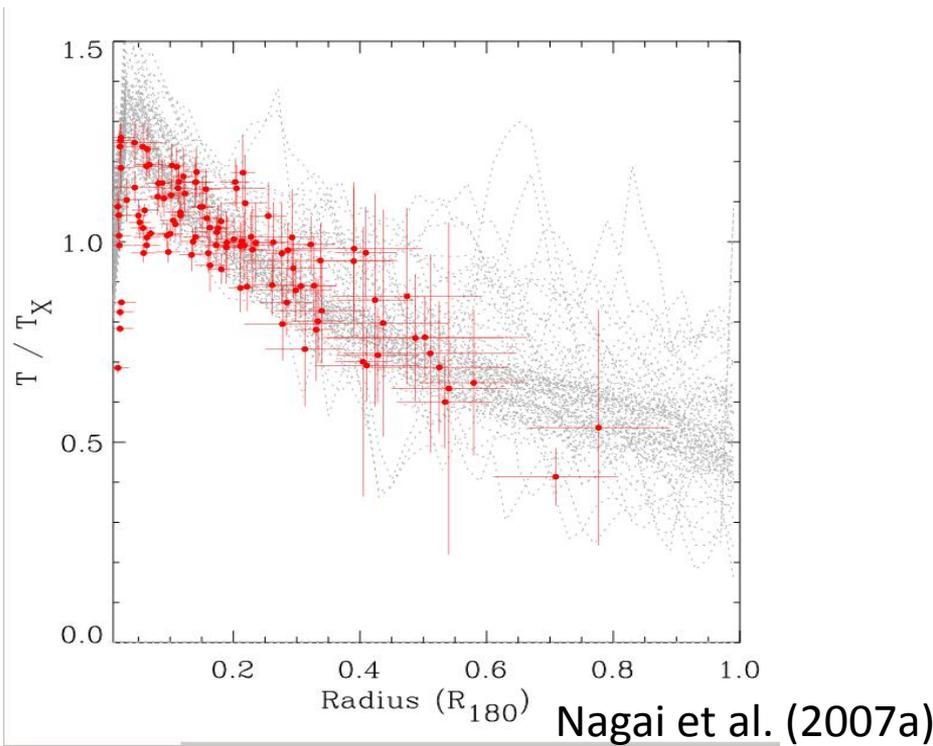
成果

- X線強度と銀河団の総質量の関係式
- エントロピー、銀河団内ガスの密度分布
- 銀河の動径方向分布
- 特に外部領域 ($r \geq 0.1r_{vir}$: ビリアル半径) で再現性が良い。

問題点

- 中心付近の温度、エントロピープロファイルを再現できない。
→ **中心付近も正しく再現できない
と精密宇宙論には使えない！**

右図のように、シミュレーション結果は中心付近で鋭いカーブを描いており、観測結果と合わない。



冷却流 (cooling flow) 問題

銀河団の冷却時間 (高温プラズマの熱制動放射)

$$t_{\text{cool}} \approx 8.5 \times 10^{10} \left(\frac{n_{\text{gas}}}{10^3 m^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{T}{10^8 K} \right)^{\frac{1}{2}}$$

~10¹¹年 (銀河団外部領域)
~10⁹年 (銀河団中心)

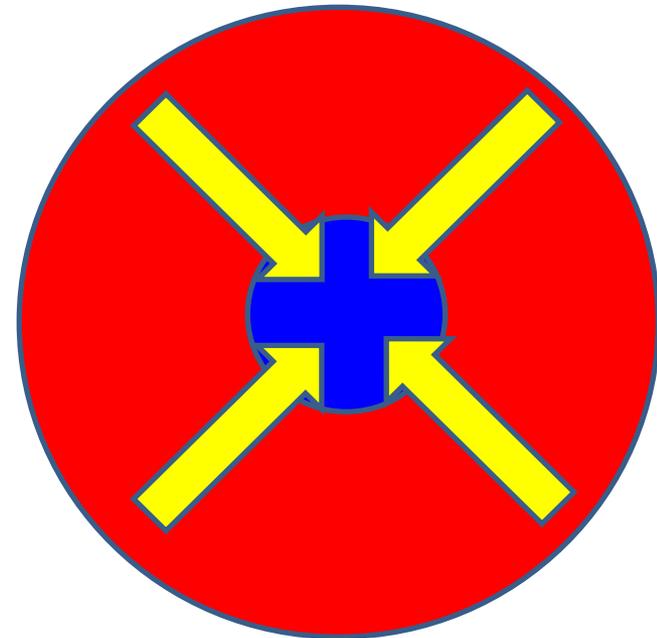
銀河団年齢年 ~10¹⁰ 年

→ 中心のみ冷却

冷却流が流れるはず！

しかし観測で見つからない……

→ 何らかの加熱機構がある？



加熱機構

- **銀河風** (超新星爆発)

→ 観測されるX線のスケーリング則を再現するが、エネルギー量が足りない

- **活動銀河核 (AGN)** (大質量ブラックホールへの質量降着)

→ 有力なプロセスだが、微調整がないと冷却と加熱がうまく釣り合わない

+ 宇宙線

→ 冷却流を抑えることに成功。しかしエントロピープロファイルは再現できず

- **エネルギー輸送** (熱伝導、粘性)

→ パラメータの微調整が必要。磁場と乱流があるとうまくいく可能性がある。

- 他にもいろいろ...

問題点

- 銀河団 → Mpc 銀河 → kpc スケールの差により両方を正しく再現するのが難しい

- 個々の物理過程の理解が乏しい

将来の展望

モデル作成・観測データの解釈

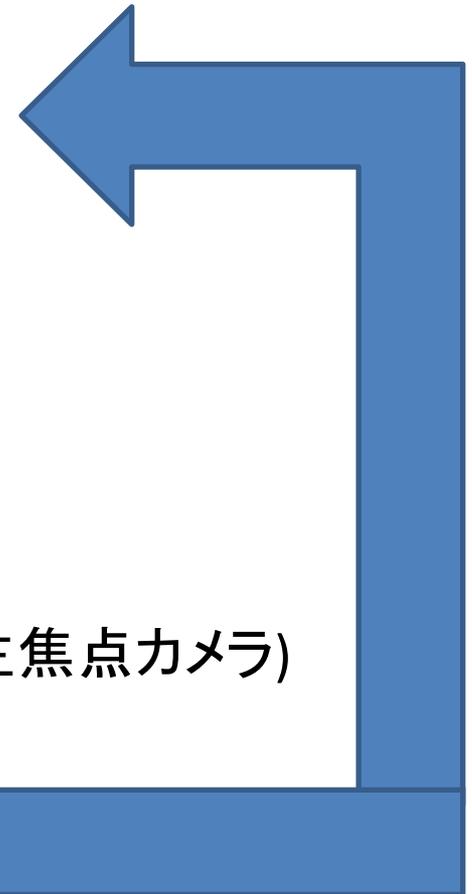


新たな観測データ



例 HSC(Hyper Suprime-Cam
次期すばる望遠鏡主焦点カメラ)

複雑な物理過程の理解



まとめ

- 銀河団の観測・シミュレーションからダークマター分布や宇宙論パラメータを決定できる。そのためには銀河団形成を正しく再現することが重要である
- 銀河団形成シミュレーションは、 $r \geq 0.1r_{vir}$ では観測結果を良く再現できる
- 銀河団中心の温度を正しく再現できていない
- 様々な追加の物理過程をモデルに導入する必要がある。(SN, AGN jet, 粘性...)
- まもなく得られる観測データによって、各物理過程の理解、さらに銀河団形成モデルについての理解の進展が期待される

参考文献

Stefano Borgani & Andrey Kravtsov, 2009

, ArXiv 0906.4370v1 [astro-ph.CO]

谷口義明・岡村定矩・祖父江義明他編, 銀河 I

, 日本評論社, 2007 (シリーズ現代の天文学第4巻)

END