



Takayuki Saitoh & Tadaaki Takeda https://www.youtube.com/watch?v=Rdd9KAUcvgQ

## 自己紹介

- 斎藤貴之
- ・1977年2月18日生まれ
- 旭川市出身
- 略歴
  - 1992/4-1995/3 旭川北高校
  - 1995/4-2004/3 北海道大学物理学科、物理学専攻
  - •2004/4-2011/7 国立天文台研究支援員、研究員、学振研究員、専門研究職員
  - •2011/8-2013/3 東京工業大学研究員/特任准教授
  - 2013/04- 東京工業大学地球生命研究所研究員/特任准教授
  - •2018/12-神戸大学准教授





Photo by Nerrissa Escanler



- •背景
- •銀河形成シミュレーション
- •我々の取り組み
- ・まとめ



•背景

- •銀河形成シミュレーション
- ・我々の取り組み
- ・まとめ

## **ACDM** paradigm

• Energy budget • Cold dark matter • Galaxy formation



Hierarchical formation via merger and accretion





•背景

- •銀河形成シミュレーション
- ・我々の取り組み
- ・まとめ

## ちょっと寄り道:First galaxy simulation

DEVELOPMENT OF A "BAR-TYPE" DENSITY WAVE IN THE CENTRAL LAYER OF A GALAXY

> Per Olof Lindblad Stockholm Observatory April 1961

- 1960年代初頭、
   スウェーデン
- Computer : BESK
- N=116
  - メモリリミット
- ・4次ルンゲクッタ
- dt=8Myr
- 7.5 min/step

See Lindblad 2015: https://arxiv.org/abs/1503.01795

## 銀河形成シミュレーションモデル

- ・冷たい暗黒物質(ダークマター)
  - ・位相空間からサンプリングした粒子(№本粒子)に置き換えて重力 相互作用を計算:遠距離力
- ・通常の物質(バリオン)
  - ・ 圧縮性流体として扱う(SPH/メッシュ(AMR)法):近距離力
  - ガスの放射冷却加熱
    - 通常事前計算したテーブルを利用
  - 低温高密度ガスから星形成
    - ・質量の一部を重力相互作用だけする恒星集団粒子(Simple stellar population)へ
    - 計算機の能力、プログラミング能力の限界で、いまのところ個別の恒星を あつかえていない
  - 超新星爆発
    - ・大質量星がエネルギーと金属を放出(化学進化)



方程式

重力(ダークマター,ガス,星)

 $\nabla^2 \Phi = 4\pi G\rho$ 

圧縮性流体(ガス)  $\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \boldsymbol{v}$  $\frac{d^2r}{dt^2} = -\frac{\nabla P}{\rho} + a_{\rm visc} - \nabla \Phi$  $\frac{du}{dt} = -\frac{P}{\rho}\nabla \cdot \boldsymbol{v} + \frac{\Gamma - \Lambda}{\rho}$  $P = (\gamma - 1)\rho u$ 

## 重力計算

- ・重力相互作用の直接的な計算量はO(N<sup>2</sup>)
- 近似計算法
  - Tree法(Barnes & Hut 1986)、PM法(Hockney & Eastwood 1981)、TreePM法(Xu1995)、FMM(Greengard & Rokhlin 1987; Dehnen 2000; Springel 2020)
- 専用計算機
  - GRAPE(Sugimoto et al. 1989)
- チューニングカーネル
  - Phantom-GRAPE(Nitadori et al. 2006; Tanikawa et la. 2013)
    PIKG(野村; 第7回HPC-Phys 勉強会)

## 流体計算

- •極めて疎密の大きいガスを扱うため、圧縮性流体を解く
- 粒子法
  - Smoothed particle hydrodynamics (Lucy 1977; Gingold Monaghan 1977; Saitoh & Makino 2013; Hopkins 2013; Hosono, Saitoh & Makino 2013)
- メッシュ法
  - Adaptive mesh refinement (Teyssier 2002)
- •移動メッシュ法
  - Springel 2010
- メッシュフリー法
  - Gaburov & Nitadori 2011; Hopkins 2015



## 時間刻み法

- •Leap-frog 法がよく用いられる(2次精度)
  - +Hamiltonian-splitting
  - I. 遠距離力(PM)と近距離力(Tree)に異なるdt(Springel 2005)
  - 2. 重力相互作用と流体相互作用に異なるdt(Saitoh & Makino 2010)
  - 近接散乱が重要な系を高次スキーム(e.g., エルミート; Makino & Aarseth 1992)に置き換え(Fujii et al. 2007)
- 独立時間刻み法(Aarseth 1963; McMillan 1986; Makino 1991)を用い粒子ごとに異なる時間刻み幅を持たせる
  - O(N) の処理が卓越して効率的 ではない(Wadsley et al. 2004)



## サブグリッド物理

- ・ガス冷却/加熱
  - •事前に計算した放射加熱強度のテーブル
    - •赤方偏移、密度、温度、金属量の関数
  - ・最近だと Grackle (Smith+2016)
- •星形成
  - ガスが密度閾値を超えると無衝突粒子へ
    - 一般的には Schmidt 則に従って変換: ρ<sub>\*</sub>∞ ρ<sub>gas</sub><sup>1.5</sup>
  - Simple stellar population (SSP)近似
    おなじ年齢、金属量を持つ恒星の集団
- •フィードバック
  - ・超新星爆発、AGN からの熱・運動量・金属の周辺ガスへの放出
  - 放出される金属種はSNの計算から







初期の銀河形成シミュレーション



## (1991-2010年代前半)

- ・ 立派な星円盤が出来ない
   という角運動量問題
  - 最初の3Dシミュレーションの 頃から指摘されていた(see Katz & Gunn 1991, Navarro & Benz 1991)
- フィードバックが非効率なため、バリオンクランプが過剰
   形成され、力学的摩擦で角
   運動量を失いつつ銀河中
   心部に沈降

## SSP 近似下でのフィードバック問題



• SSP (星粒子を同じ年齢金属量を持 つ集団)近似のもとでのSN の 寄与  $U_{SN} = \epsilon_{SN} m_* E_{SN} / N_{NB} m_{SPH}$ = 2.5×10<sup>15</sup> /  $N_{NB}$  [erg/g]  $pprox m_{SPH} = m_*$ 

- ・温度で書くと  $T_{SN} \sim 4 \times 10^5 / (N_{NB}/32)[K]$
- Thermal FB は有効ではないために 何らかのモデル化が必須
   →冷却を止める or Kinetic FB

 本質的には個別の恒星を分解すること が必要



## Illustris simulation





#### Illustris(TNG50)

og M★ = 11.3

5 kpc

Latte/FIRE

#### Sandra

TNG:https://www.tng-project.org/media/ (Pillepich+2019) Sandra:Appleburm+2021 Latte/FIRE:https://fire.northwestern.edu/milky-way/ (Wetzel+2016)

## MWサイズ銀河ハロー内のDM粒子数の増加



- 1990年代:~ 103
  - Tree法、GRAPE
- •2000年代:~104-5
  - Gadget/Gasoline など並列コード
- •2010年代:~106-7
  - •スキームの更新
  - •扱われる物理の増加
  - より複雑な subgrid-models
  - ・数千コアで数ヶ月-数年
- •2020年代:

スパコンの性能進化(Top500) **Performance Development** 



- この30年で7桁以上の成長
- ・銀河形成シミュレーションは
   4桁程度



3桁以上のギャップ

https://www.top500.org/statistics/perfdevel/

#### 分解能があがらないのは何故?

- •CFL条件は、高密度高温領域が一番厳しい(超新星領域)
  - •ある密度を分解するサイズ:

 $\rho \propto m/h^3 \rightarrow h^{\infty}m^{1/3}$ 

- SNのエネルギーは分解能に比例する領域に入るとする:
   E<sub>SN</sub>∞ | /m→cs∞ | /m<sup>1/2</sup>
- dt<sub>CFL</sub> =h/cs ∝ m<sup>5/6</sup>→ほとんど m に比例
- 宇宙年齢は一定
- ・現在の高分解能計算の典型値: |pc/1000km/s→1000年
- 独立時間刻み法を使っても、O(N)パートのせいで N<sub>a</sub> «Nのところでも計算が効率化しない(Wadsley+2004)



•背景

- •銀河形成シミュレーション
- •我々の取り組み
- ・まとめ

# 極星スケールを 直接公解する 銀河形成シミュレーションを 実現する

## ► ASURA-FDPS(開発中)

#### • ASURA

- 圧縮性流体(DISPH)
- 放射冷却加熱
- •星形成

# CELib 化学進化 Star-by-star model

フィードバック(SNII/Ia/AGB/NSMs)

#### • FDPS

- プロセスプール管理運用
- ・領域分割
   ・遠距離、近距離相互作用(PMMM/TreePM/P<sup>3</sup>T/SPH)
- •時間積分
- ・ロードバランサー

PIKG
 ・相互作用カーネル自動生成

### パフォーマンスに関係する新実装

- I. サブドメイン分割による独立時間刻み法
- 2. 高パフォーマンス相互作用カーネルの自動生成
- 3. PMMM(Nitadori 2014)による高速周期境界演算
- 4. 深層学習によるサブドメイン分割領域推定

通常の独立時間刻み法



Step 2, 3 が主となる

時間刻み方向にハミルトニアン分割を適用



領域ことに分割





MPI\_Comm\_split で実現



- 重力相互作用カーネルの性能は~30-36Gflops
- 流体相互作用カーネルの性能は~22-32Gflops
- ・理論ピークに対して、24-28%、17-25%

## Weak scaling test(富岳全系利用)





・システム:

SuperMUG-NG Xeon 3.1GHz

- ・6656^3=294876348416 粒子重力相互作用に 270 sec  $\rightarrow$  3.5x10<sup>8</sup> part/sec/GHz
- ASURA-FDPS at Fugaku full system
  - 125139576422 粒子重力流体力学相互作用に 21 sec  $\rightarrow$  3.0x10<sup>9</sup> part/sec/GHz







Hirashima, Moriwaki, Fujiil, Hirai, Saitoh, and Makino, MNRAS submitted.



Michiko Fujii & Takaaki Takeda 4D2U NAOJ https://www.youtube.com/watch?v=bvKDx8tneUM



- •背景
- •銀河形成シミュレーション
- ・我々の取り組み
- ・まとめ

## まとめ

- ・恒星スケールを直接分解する銀河形成シミュレーションを富
   ・岳上で実現するのためのシミュレーションコード開発中
- ・時間積分モデル、深層学習による孤立進化領域予測モデル、 星形成モデルの構築
  - ・富岳全系を用いた自己重力流体の計算で 31 Pflops 達成(Eff=~ 4%; ~ I Gflops/W)
    - ノードあたりのメモリの少なさが律速
  - TensorFlow(C++ API)が想定以上に遅かった
     別推論エンジン利用を検討
  - Star formation model の構築
- 富岳にて銀河形成シミュレーション試験中