A background image showing a galaxy formation simulation. It features a central bright yellow-orange star or galaxy core surrounded by a diffuse, blue and green nebula-like structure. The overall scene is set against a dark, deep blue space background with scattered small stars and dust particles.

# 星一つ一つまで再現した 銀河形成シミュレーションへ向けて

藤井 通子

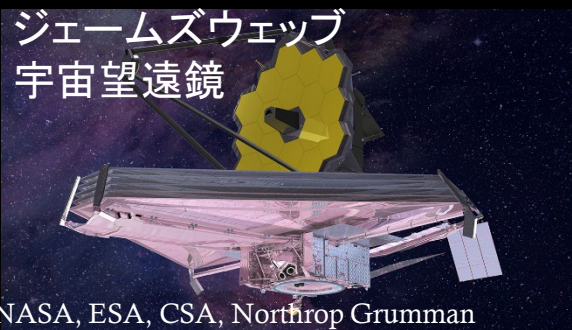
(東京大学理学系研究科天文学専攻)

# 天の川銀河

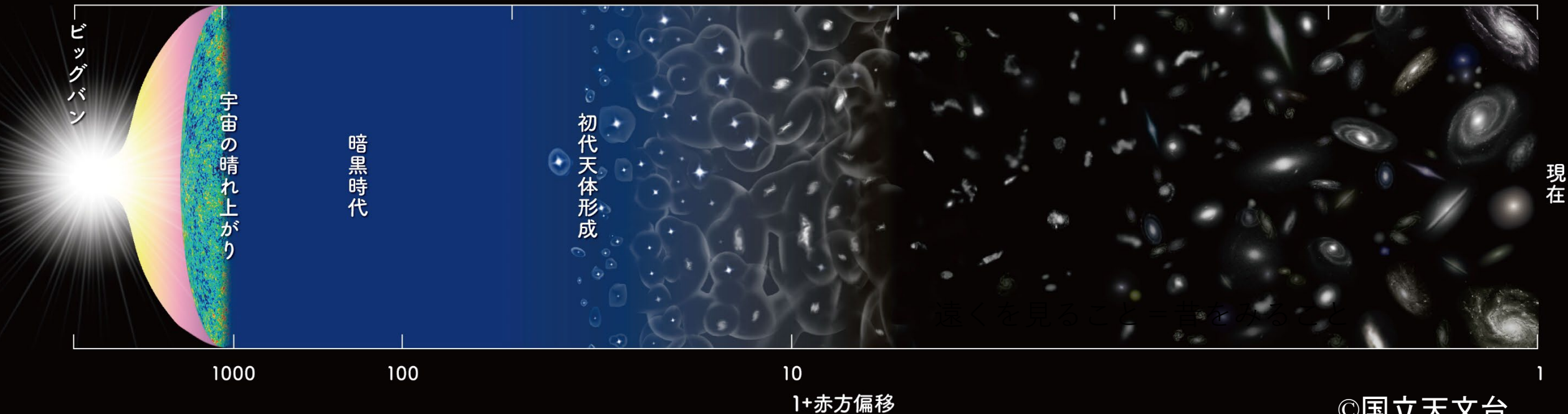
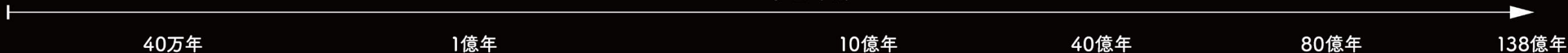
- 私たちの住んでいる銀河
- 常に横からしか見ることができない

# 我々の宇宙の理解

新しい望遠鏡  
ができるたび、  
新しい謎が現  
れる

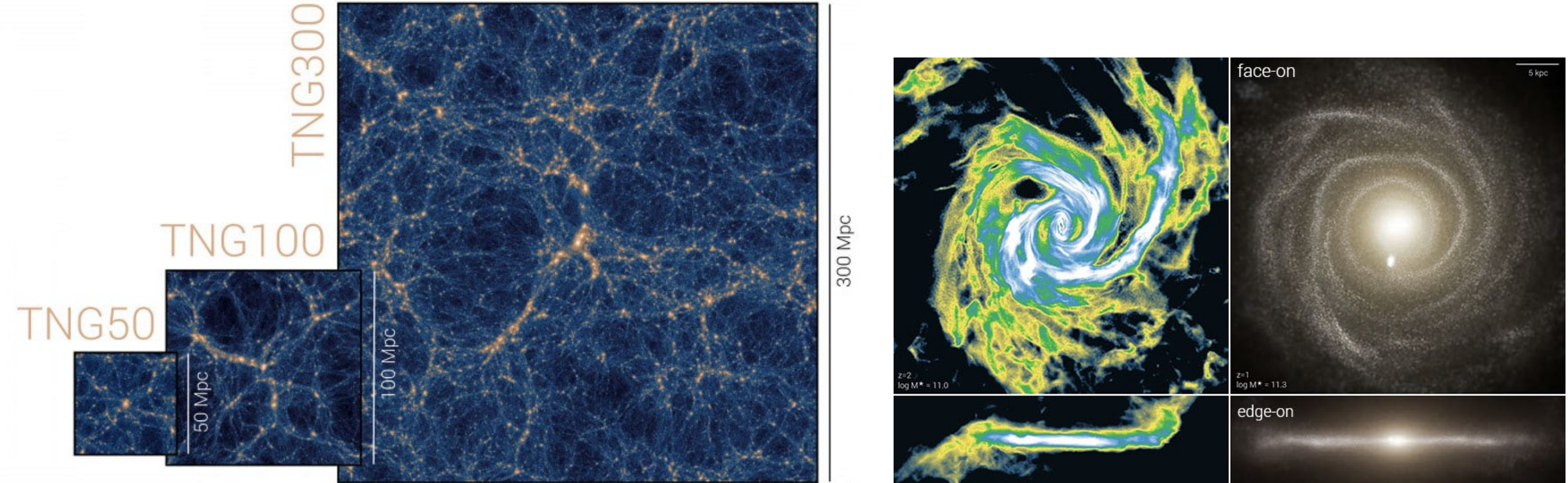


宇宙年齢

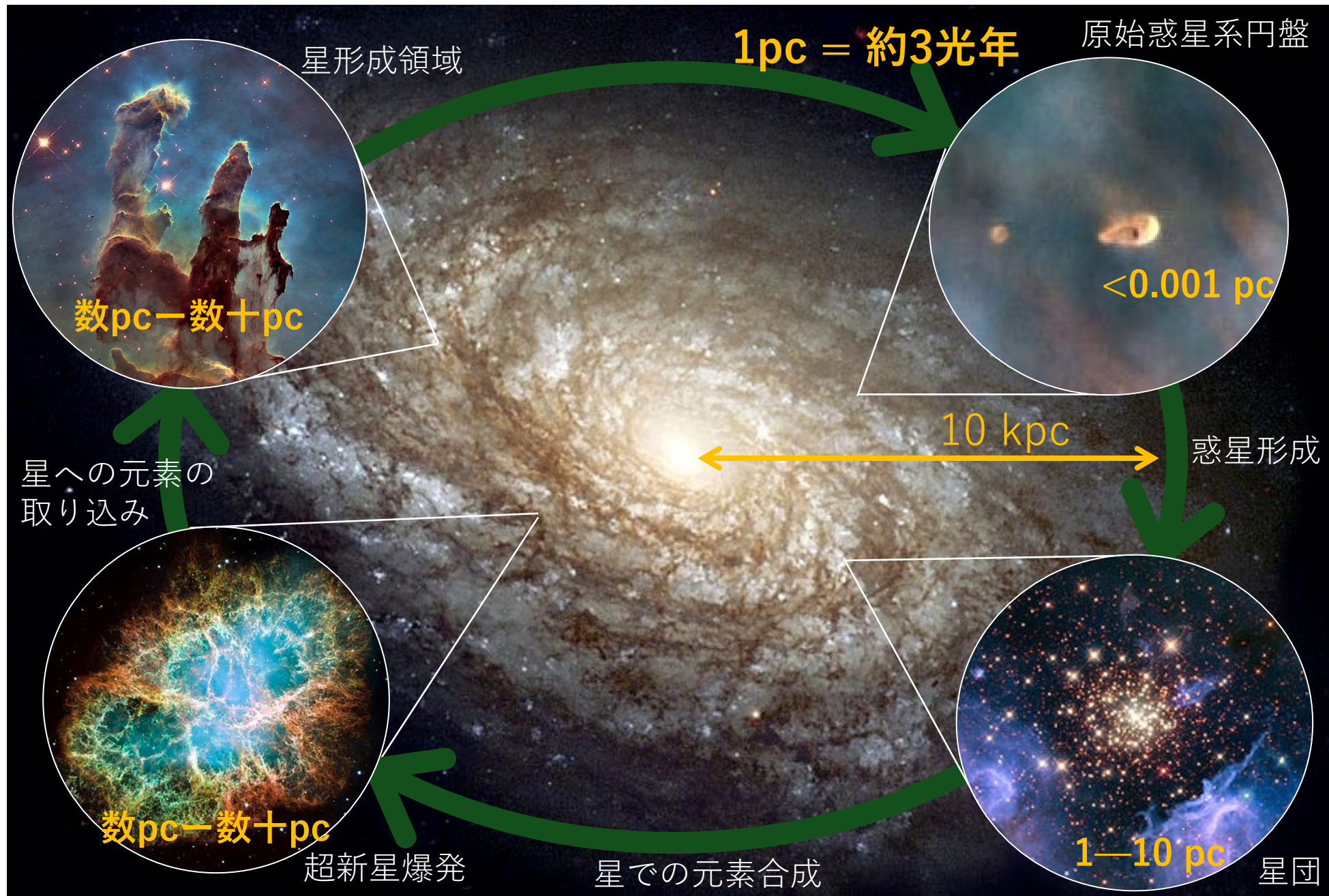


# ボリュームを増やす計算から分解能を上げる計算へ

Illustris-TNG Projectより <https://www.tng-project.org/about/>

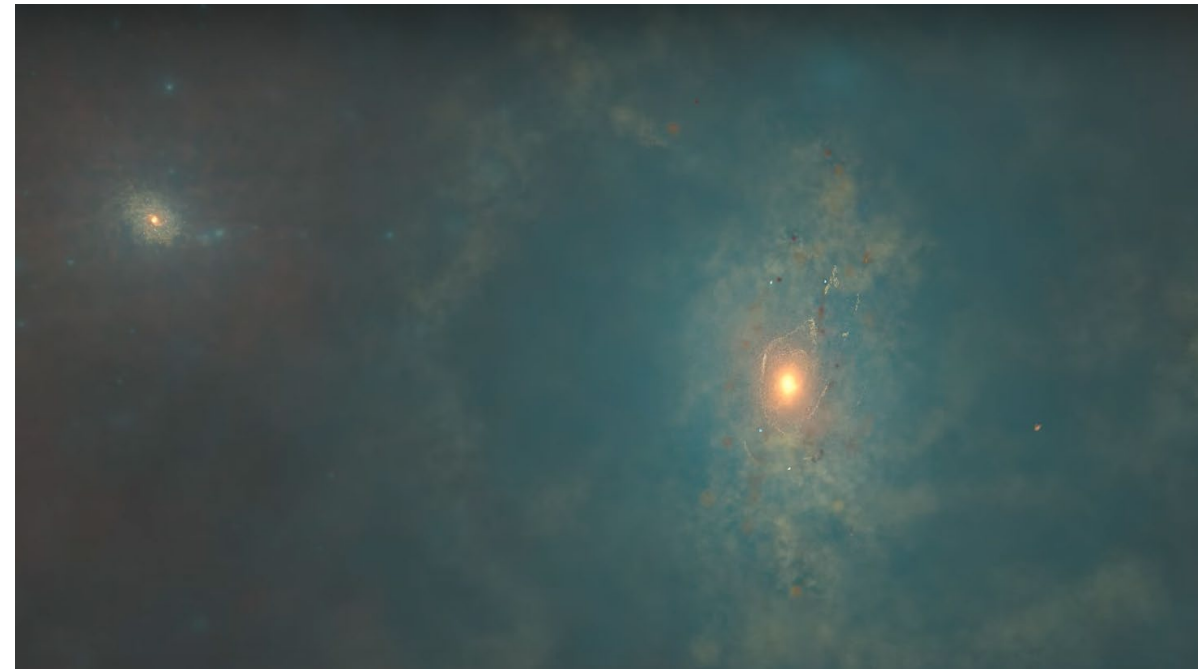


- 分解能を固定し、計算ボックスサイズを上げる計算は比較的簡単
- 一つの銀河を高分解能で計算するのは大変だが、皆がやりたいこと



# 銀河のシミュレーション

- 星、星間ガス、ダークマターからなる系
- 星などを粒子で表現し、その運動を計算し、時間発展させる
  - ある時間で重力や流体の計算を行い、常微分方程式を数値積分
- 今のスパコンで扱える粒子の数は $10^9$ 個くらい
  - 天の川銀河の銀河円盤の星の数は $10^{10-11}$ 個くらい
  - 数個の星を一つの粒子として扱う方法が主流
    - 星一つ一つを粒子で表現したい
- 幅広い時間・空間スケール
  - 宇宙年齢130億年( $10^{10}$ 年)



# 重力多体問題

- 多数の粒子からなる系のシミュレーション
  - 銀河、星団、惑星系など

- 毎ステップ粒子間に働く重力を計算→位置と速度を更新

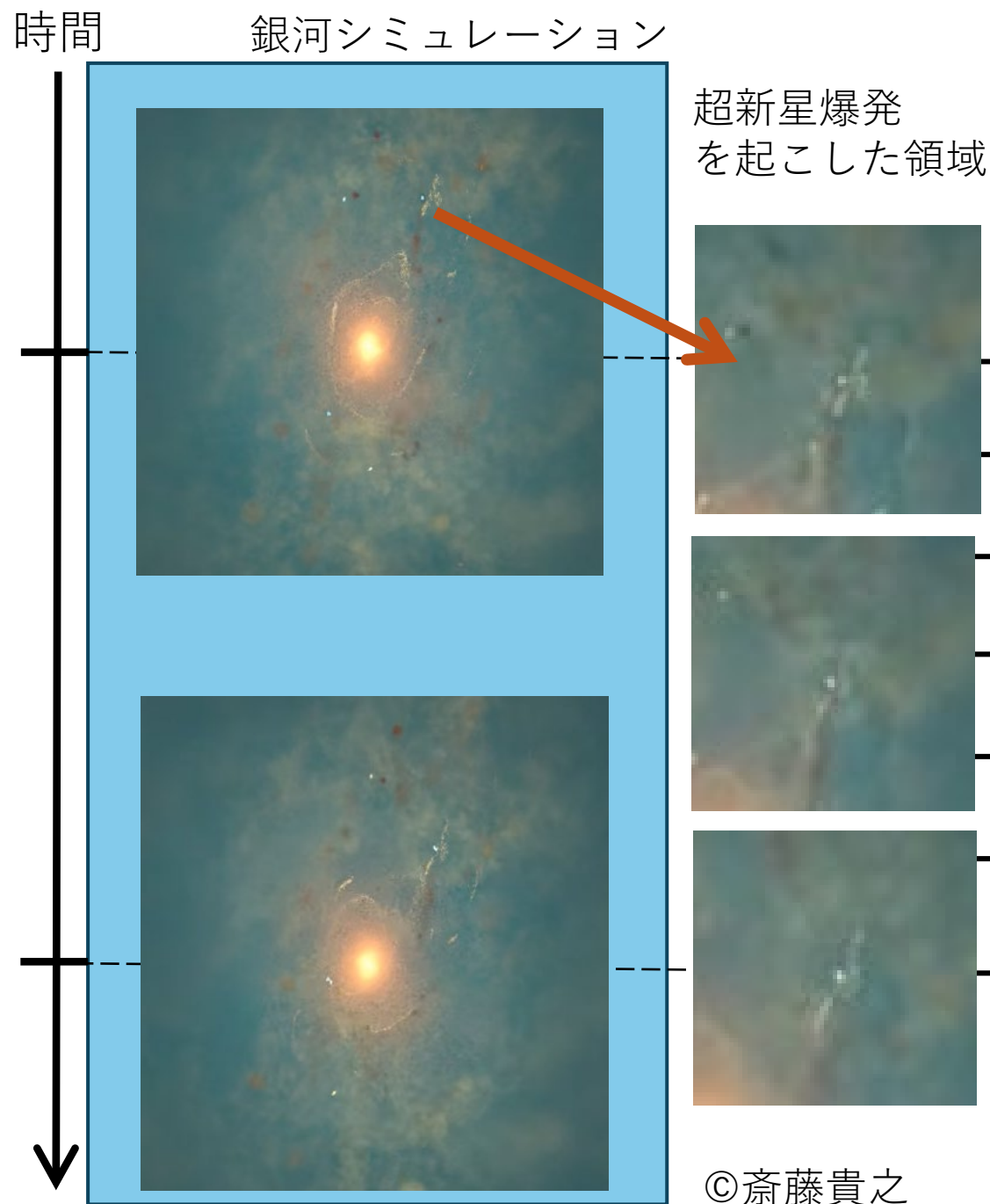
- シンプルな運動方程式

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i, 1 \leq j \leq N} G m_j \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i|^3}$$

- 計算コストは  $O(N^2)$  だが、ツリー法を使って  $O(N \log N)$  に
- 流体を粒子で表現する方法(smoothed-particle hydrodynamics; SPH法)と組み合わせて、ダークマター + 星 + 星間ガス (流体) から成る系も表現できる
- 重力は遠方からの寄与も評価しなければならないので、大変

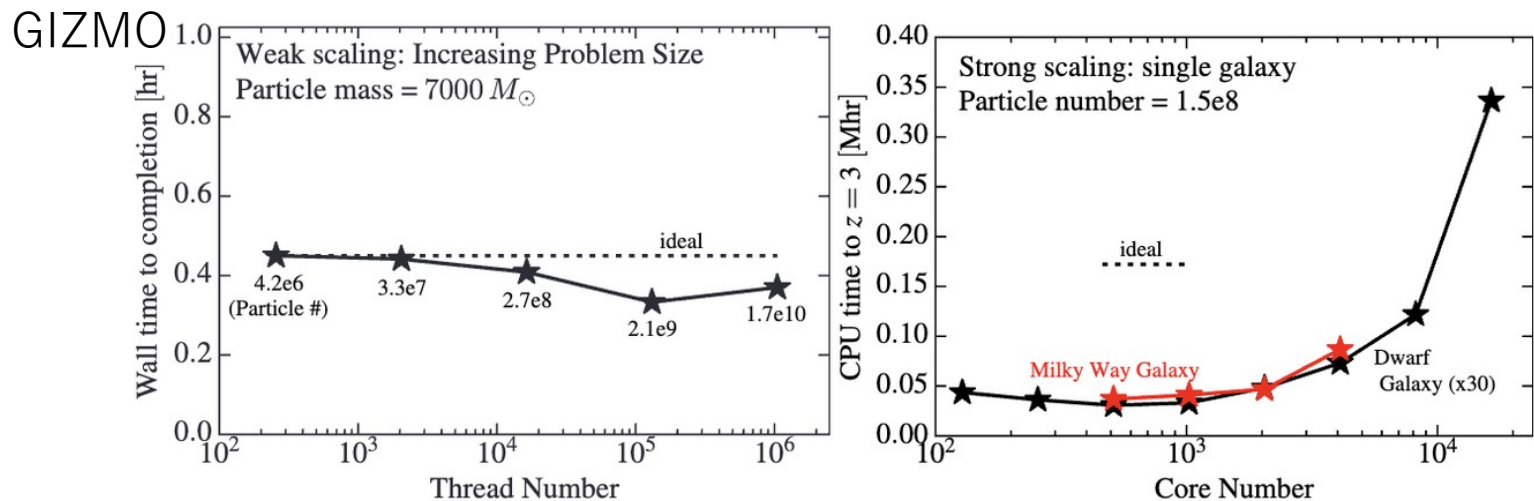
# 大規模並列 シミュレーションの課題

- 銀河の構造は細かいところまで見るとかなり複雑
  - 一部の低温高密度ガスから星が生まれる
  - 寿命が来た大質量星は超新星爆発を起こして、周囲の星間ガスを高温に
- 細かい構造は短い時間スケールで時間変動するので、時間刻みも短くなる（全体の構造の時間スケールに対し3-5桁違う）
- 短い時間刻みを必要とする粒子は一部
  - ロードバランスが悪くなる
  - ノード間通信が増えて、通信のオーバーヘッドが大きくなる  
(10000コアを超えてくると致命的)

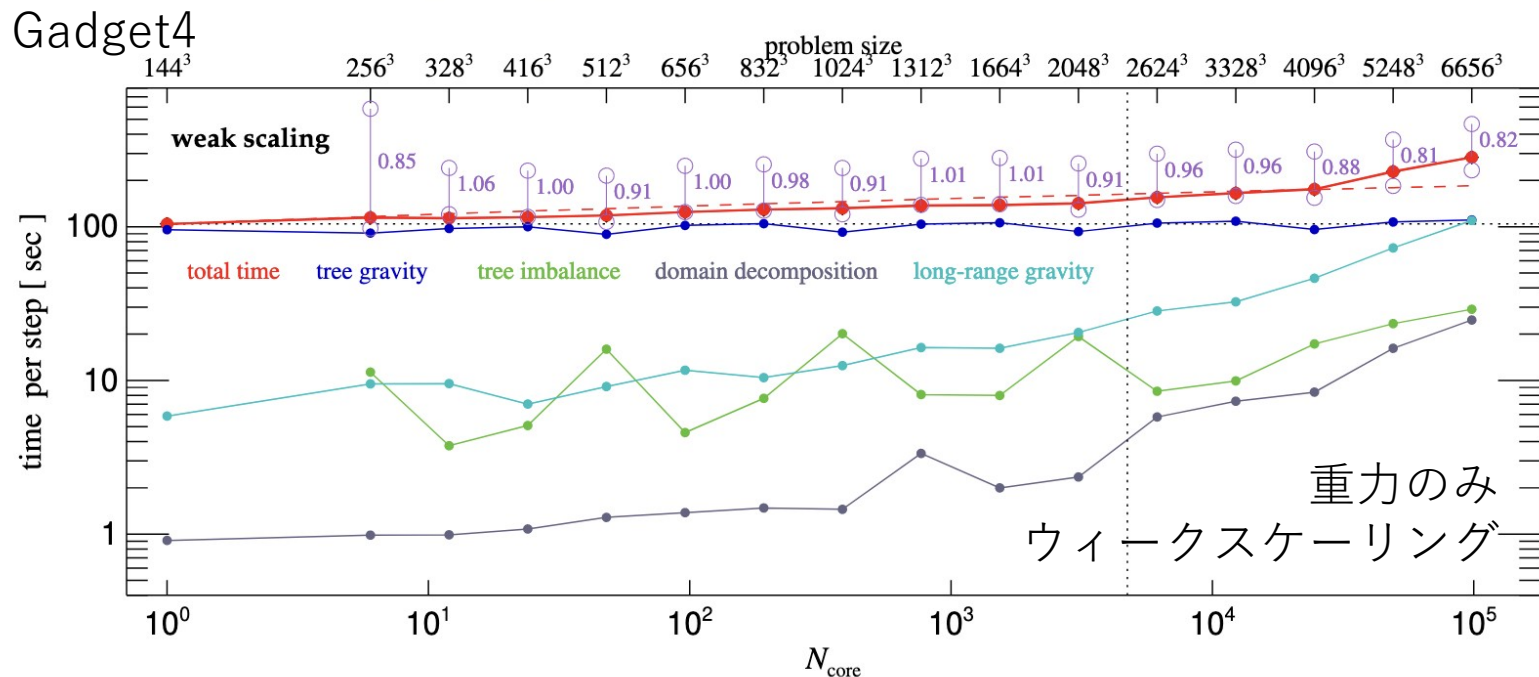




# 銀河のシミュレーションでの並列化効率



- 現在の銀河形成シミュレーションで用いられているコードの並列化効率の一例



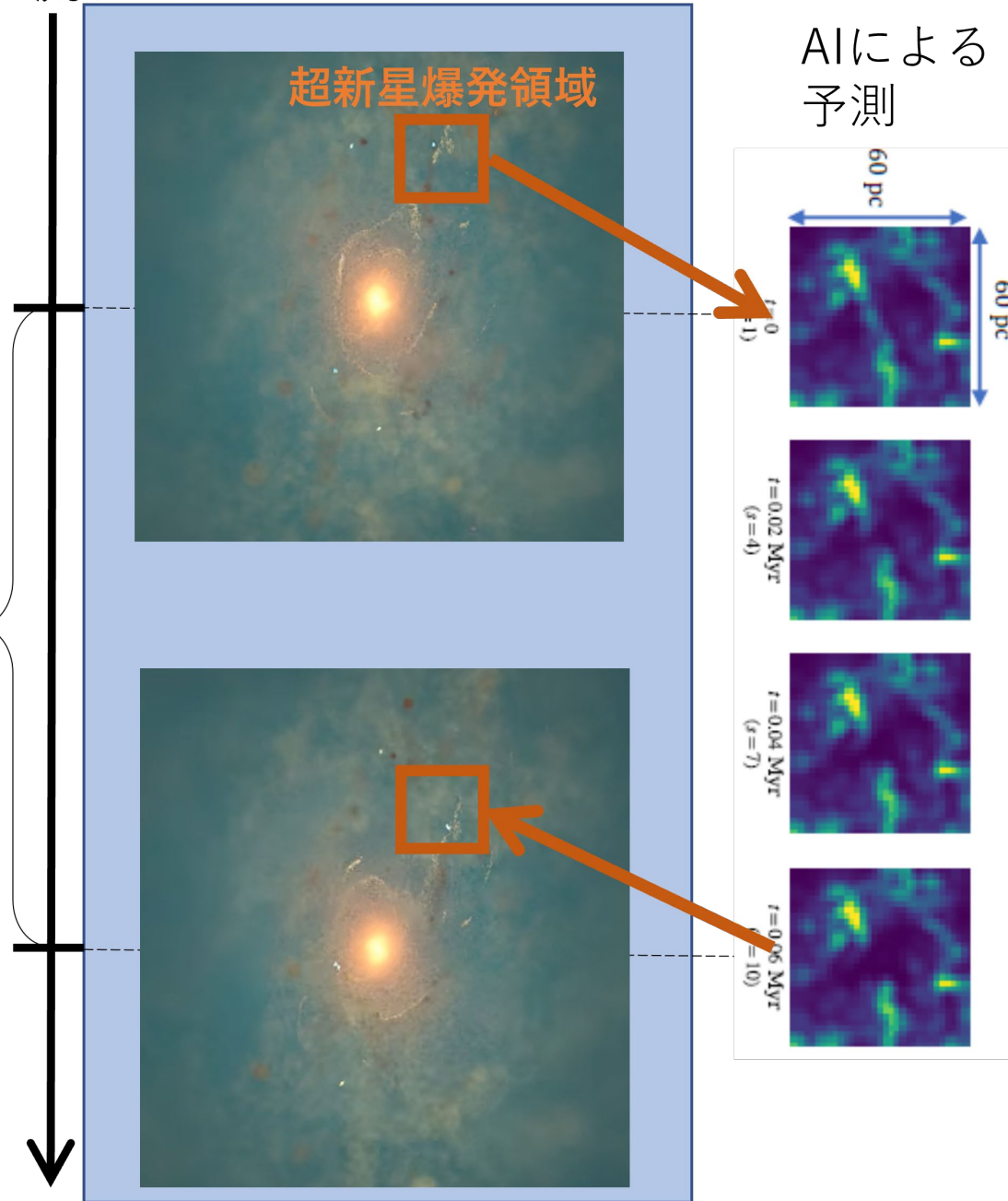
- 数千コアを超えるとそれ以上速くならない
- 銀河の規模を固定すると、粒子数  $N$  を増やして分解能を上げるとステップ数は  $N^{1/3}$  で増える

# AIの利用

- 短い時間刻みを必要とする現象を、数値積分せずにAIによる予測で置き換えられないか？
  - 今でも、分解できない小さなスケールの現象は、サブグリッドモデルと呼ばれる物理に基づいたモデルで計算されている（例：星形成）
- 超新星爆発後のシェルの膨張シミュレーションの結果を学習  
→機械学習で予測するモデル（サロゲートモデル）を作成  
(平島、藤井他 2023)
- 銀河のシミュレーションに組み込む

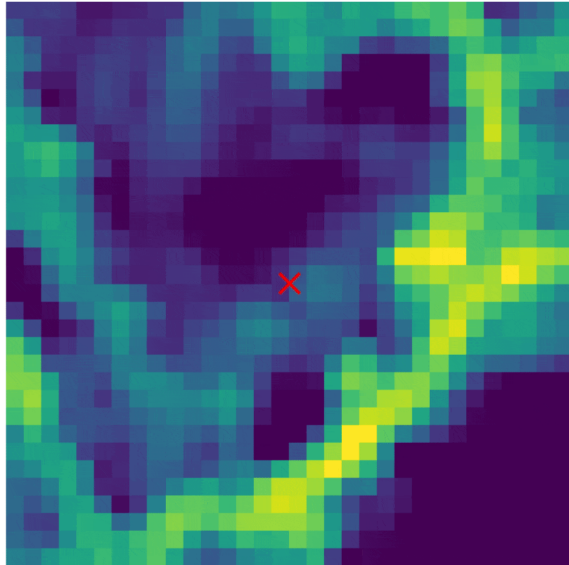
時間の流れ

シミュレーション

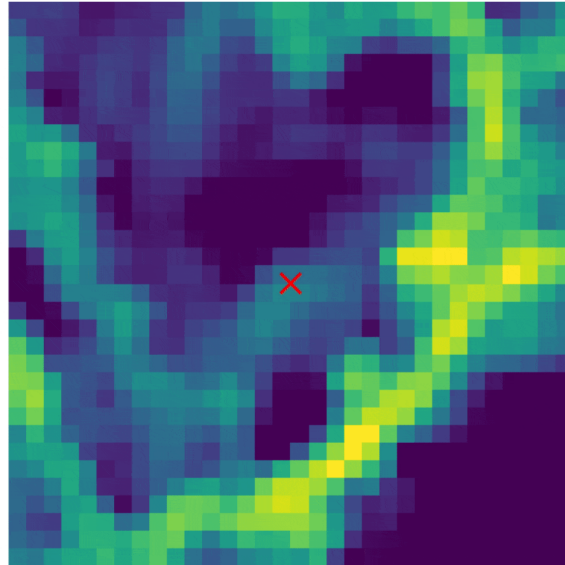


# 超新星爆発後のシェルの膨張の推論

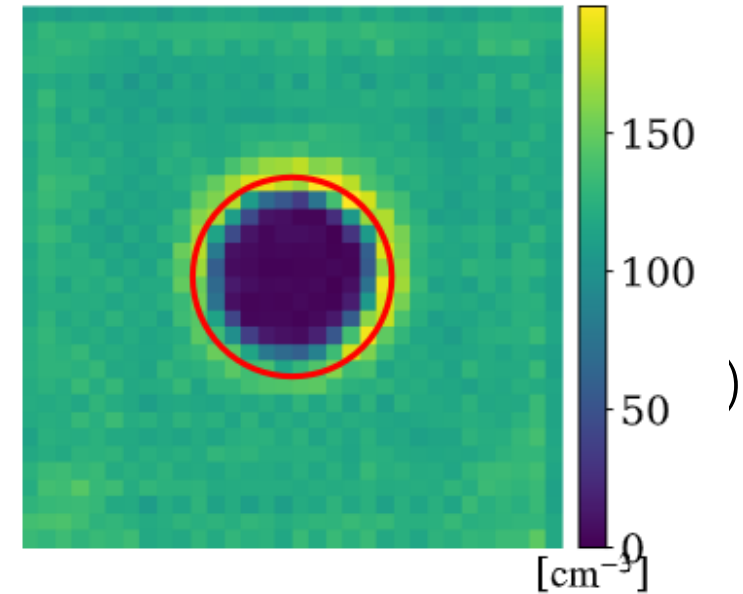
学習データは左のような分布だが、それを使って、解析解のある等密度の場合も推論できる



Simulation (t=0.007 Myr)



3D-MIM (t=0.007 Myr)

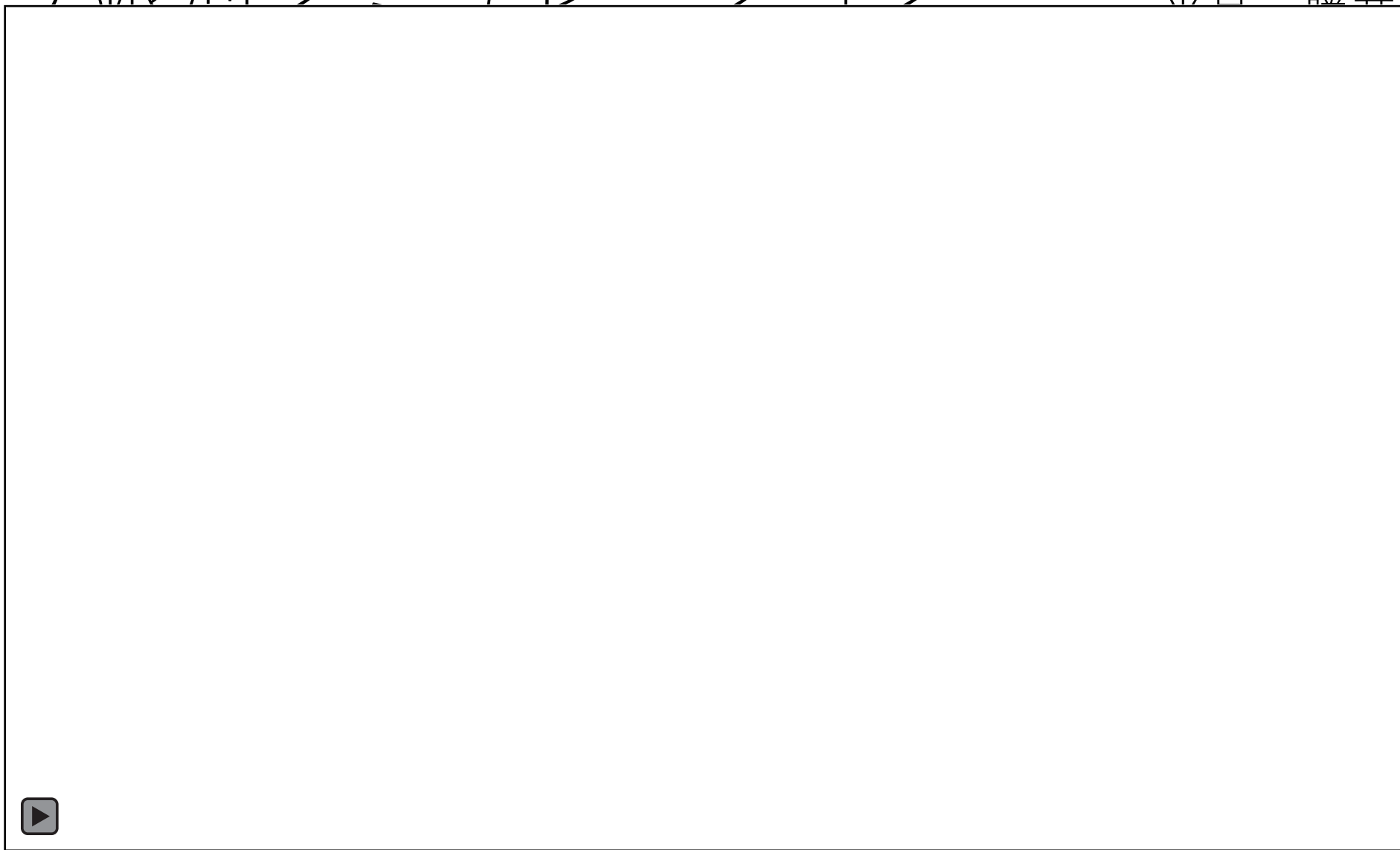


(a) Spherical

- Memory In Memoryというモデルで密度変化を3次元で推論
- 現在はU-Netを使って、密度以外にも速度や温度を予測している
- モルフォのSoftNeuro<sup>®</sup>を用いて高速化
  - 「富岳」で使えるのライブラリは最適化されておらず、とても遅かった

# AI入り銀河シミュレーション

平白 藤井他、投稿中



Pure simulation

with machine learning

# まとめと今後の展望

- 天の川銀河サイズの銀河の形成過程を星一つ一つまで再現してシミュレーションしたい
  - 宇宙の物質の形成過程
  - 太陽や太陽系の形成過程
- 5桁以上異なる時間・空間スケールを扱うことが課題
  - 一部の細かい領域が並列計算のボトルネックとなる
  - 単精度で足りず、倍精度が必要な個所も
- 新しい計算手法の開発が今後必要
  - 機械学習を取り入れた高速化はひとつのアイデア
  - 超新星爆発についてはML入りで動いており、大局的な性質は正しく再現されていそう
- 銀河のシミュレーションは相互作用計算計算以外のこまごまとした部分に少しずつ時間がかかる
  - 加速部では高速化しづらい