

# 理学研究を駆動するスパコン： 宇宙論研究の事例

長峯健太郎

大阪大学大学院理学研究科

宇宙地球科学専攻 宇宙進化グループ

**Kentaro Nagamine**

(U. Osaka / K-IPMU / UNLV)



# ビッグバン膨張宇宙における構造形成

宇宙背景放射：ビッグバンから～38万年後  
「晴れ上がり」

インフレーション期

ビッグバン

ダークエイジ  
(暗黒の時代)

銀河や惑星の  
生成と進化

量子ゆらぎ

宇宙背景放射：  
ビッグバンから～38万年後  
「晴れ上がり」

最初の星が数億年後に  
生まれ始める

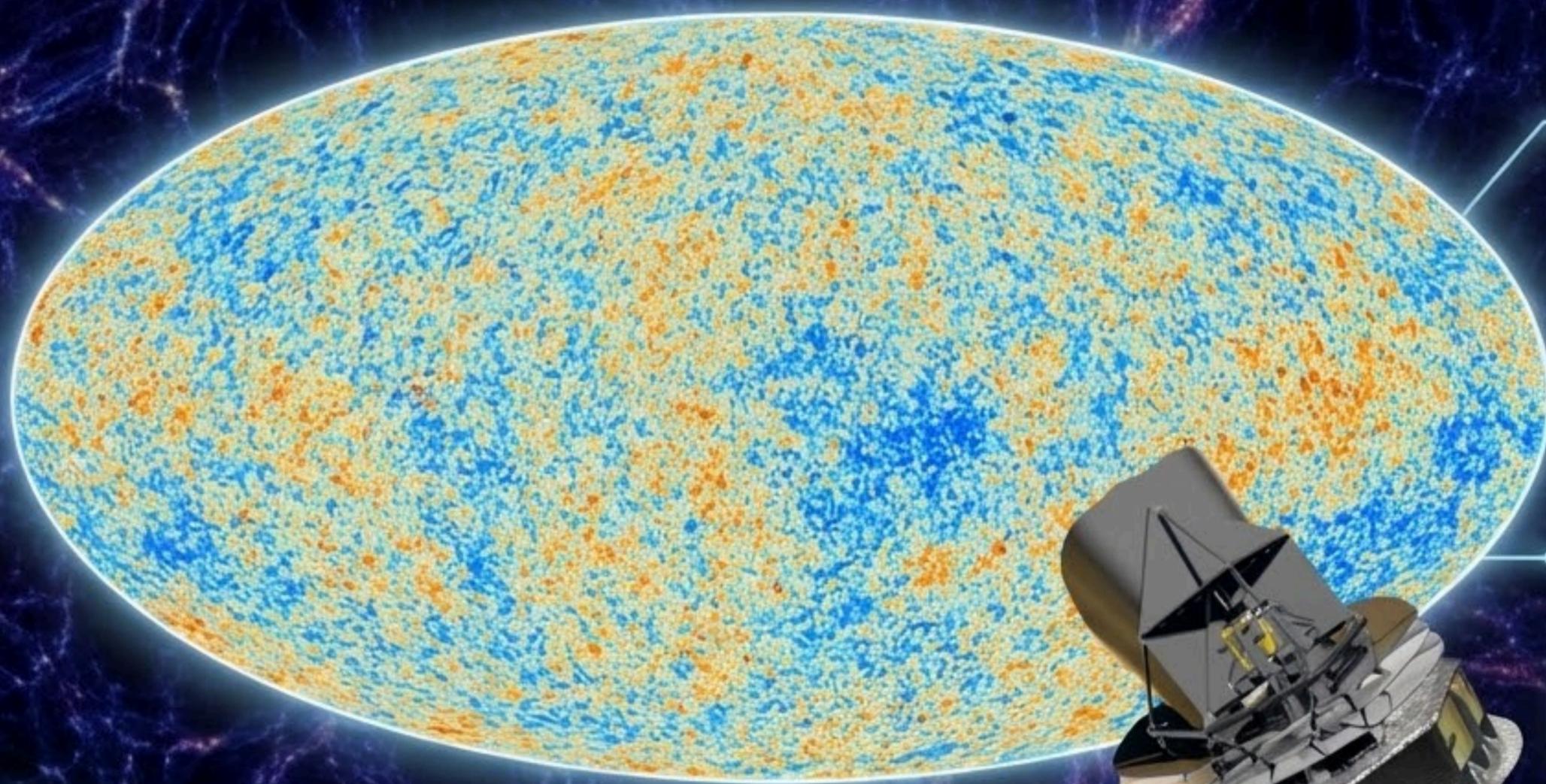
ダークエネルギーに  
よる加速膨張

Big Bang Expansion

宇宙年齢～138億年



# プランク衛星の観測データ



ビッグバンから  
~38万年後の  
赤ちゃん宇宙



🌡️ 絶対温度 2.7 ケルビン  
2.7K の黒体放射

📶  $10^{-5}$  のレベルの揺らぎ

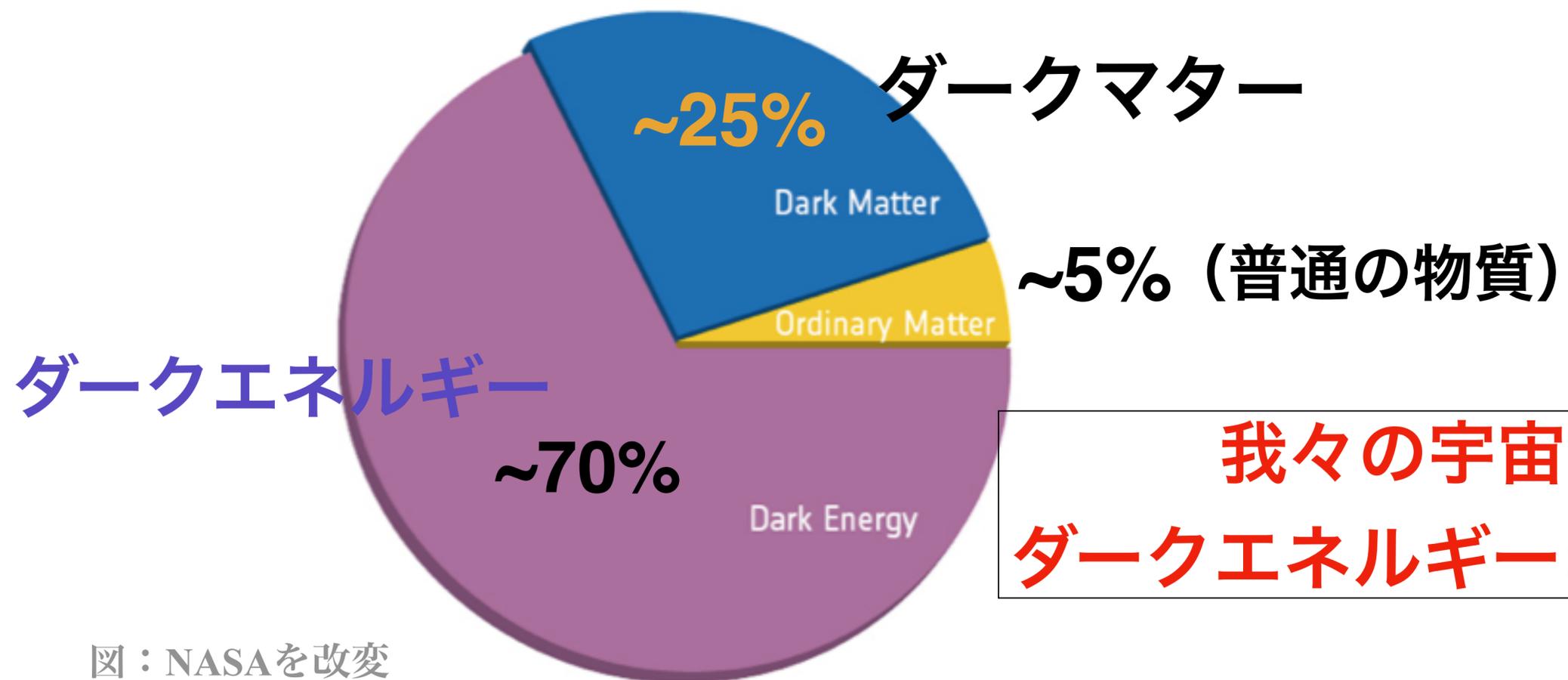
✅ WMAP NASA WMAP衛星のデータよりも解像度は良いが、基本的な宇宙の描像は変わらなかった

ESA 2013年3月



# 様々なデータを組み合わせた解析の結果：

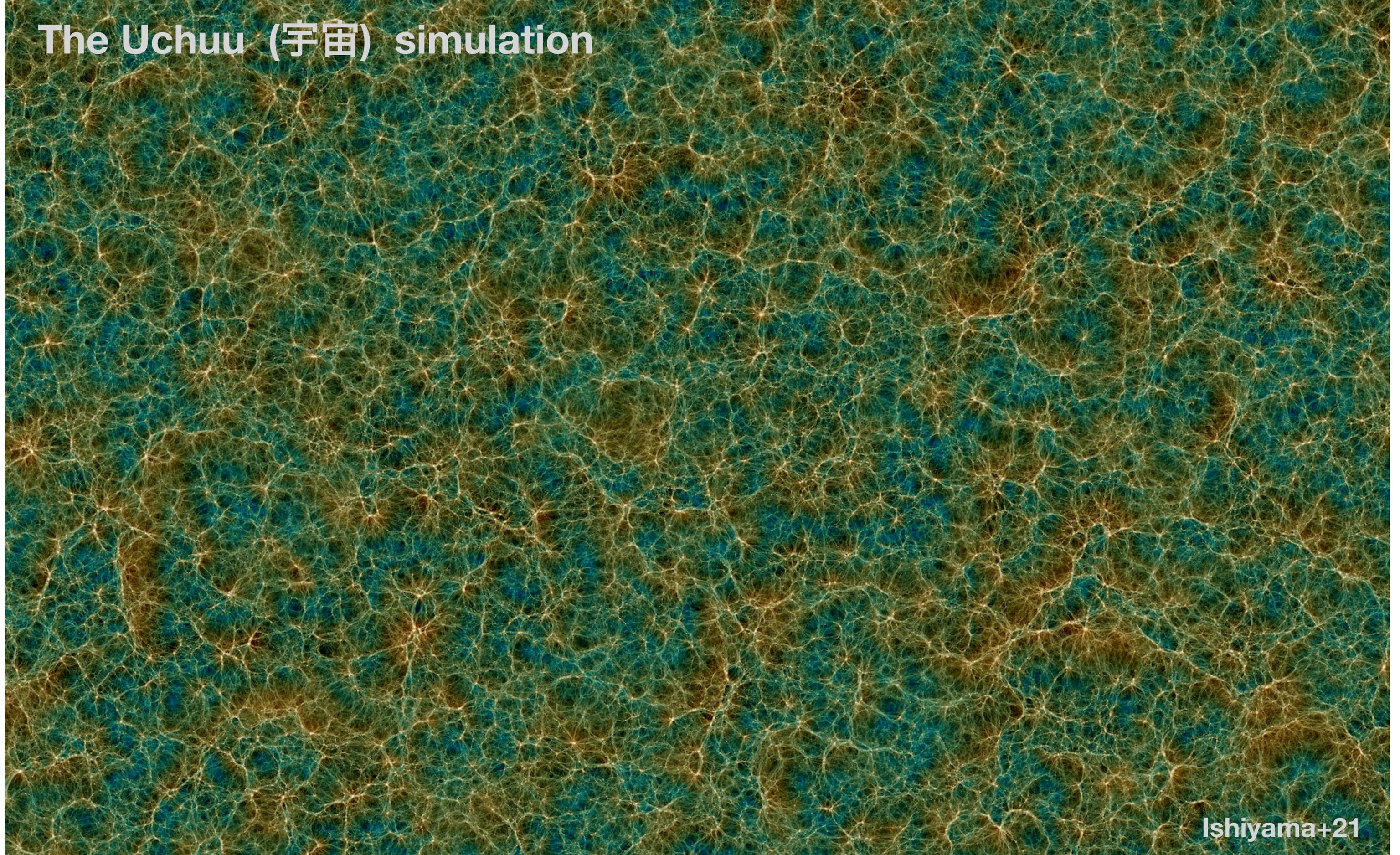
- 宇宙全体のエネルギーを**100%** とすると、
- **ダークエネルギー(暗黒エネルギー)** が **~70%**
- **ダークマター(暗黒物質)** が **~25%**
- 普通の物質 (ガス、星など) が **~5%** だけ！



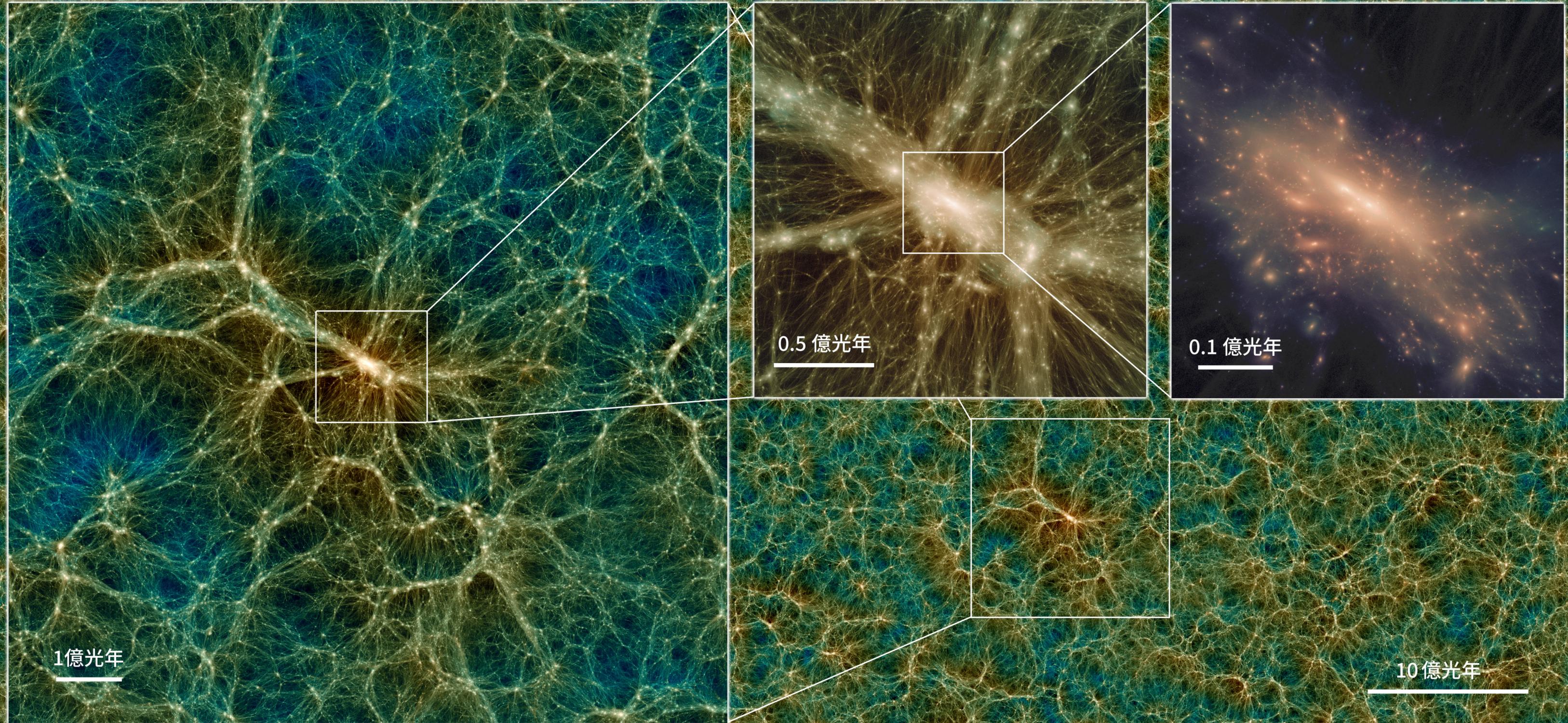
**我々の宇宙はダークマターと  
ダークエネルギーに支配された奇妙な宇宙**

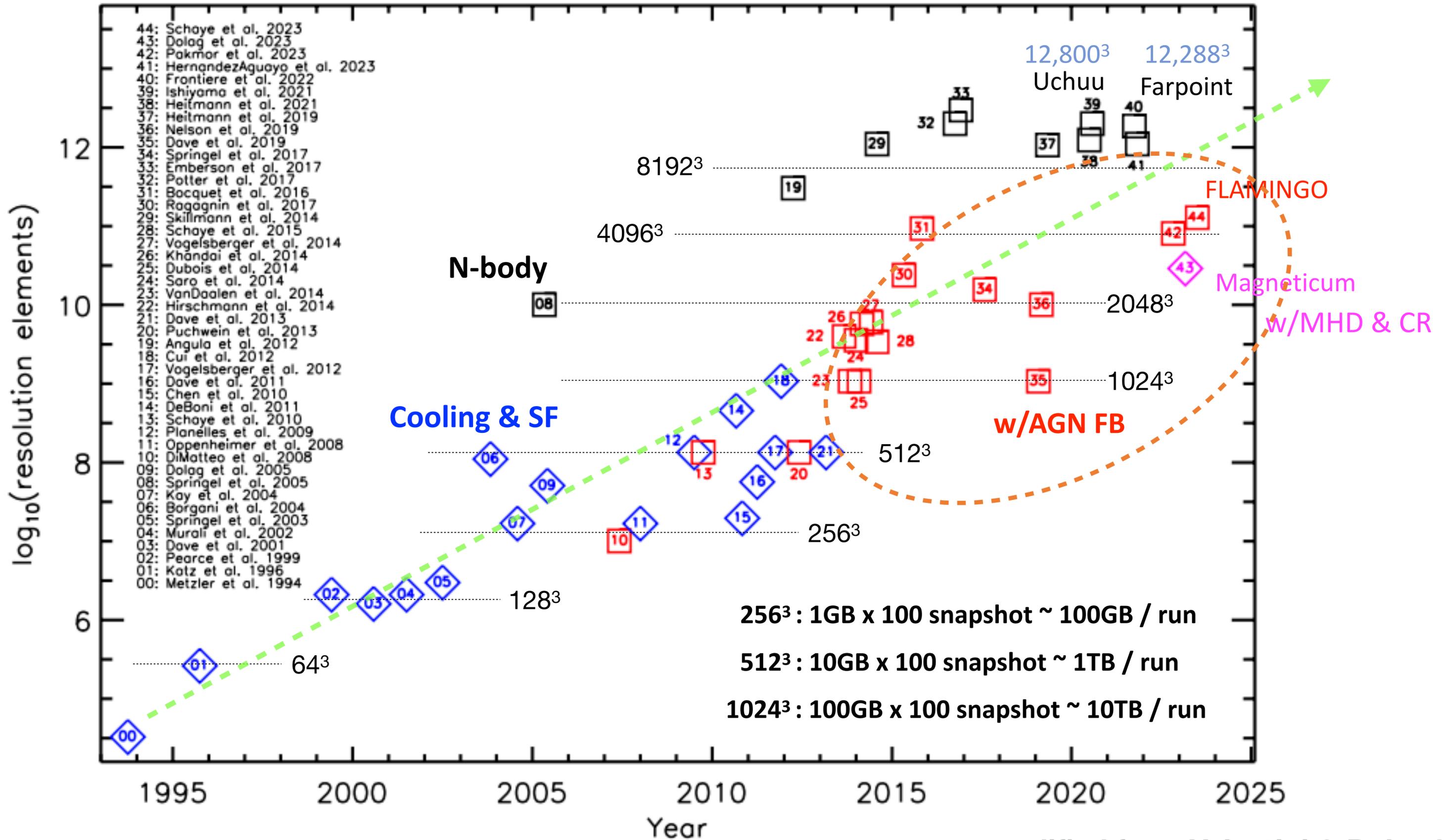
図：NASAを改変

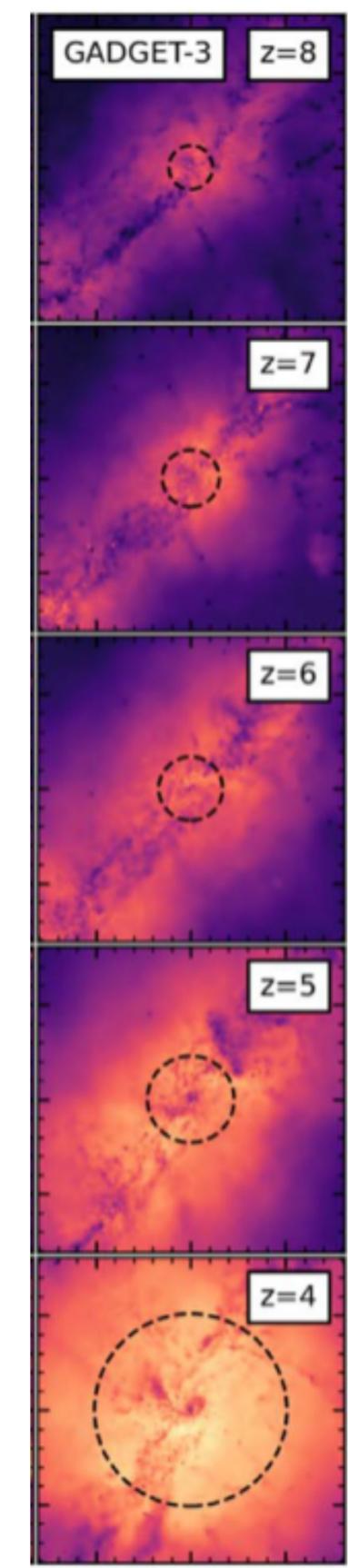
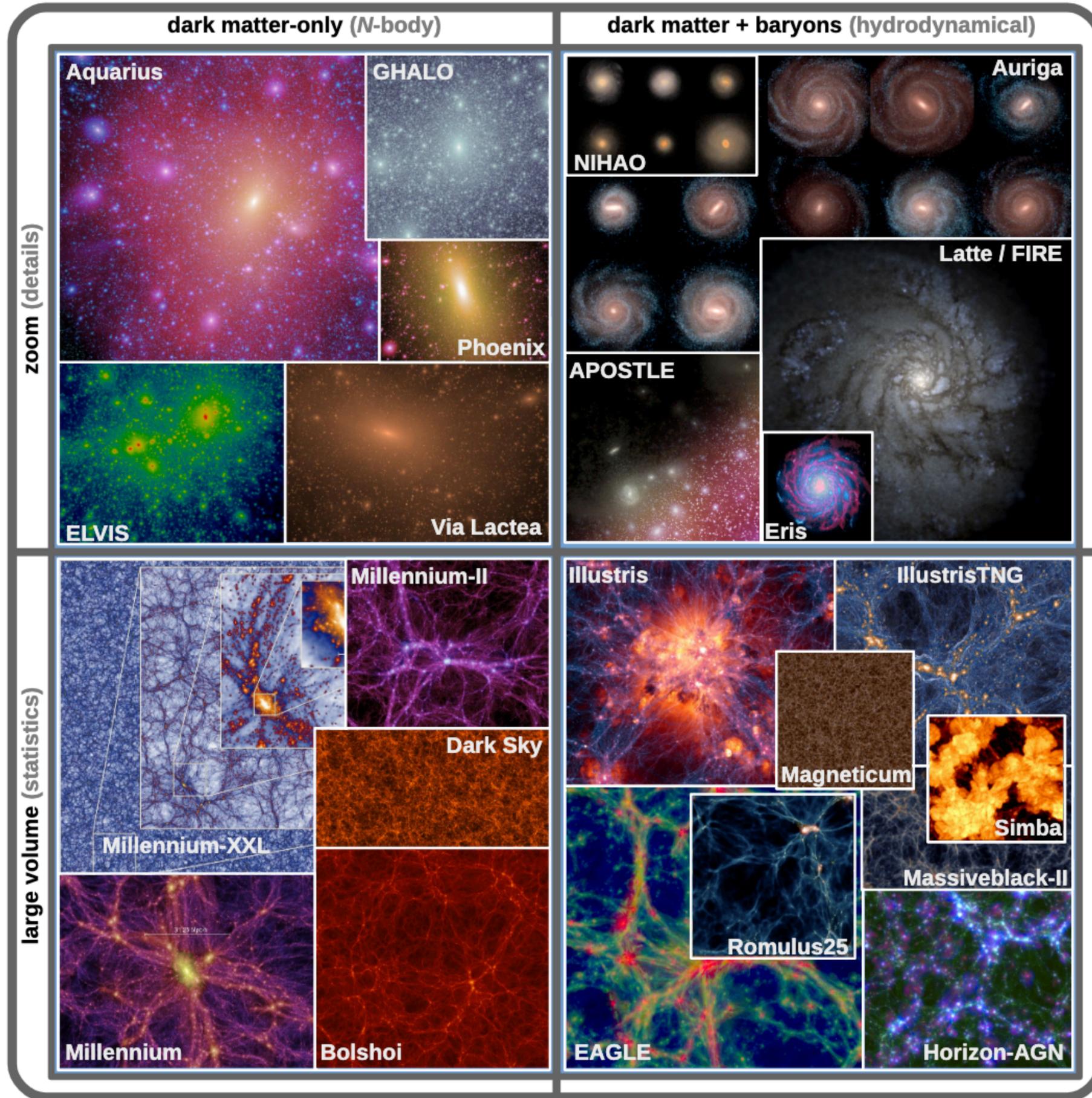
# The Uchuu (宇宙) simulation



# The Uchuu (宇宙) simulation



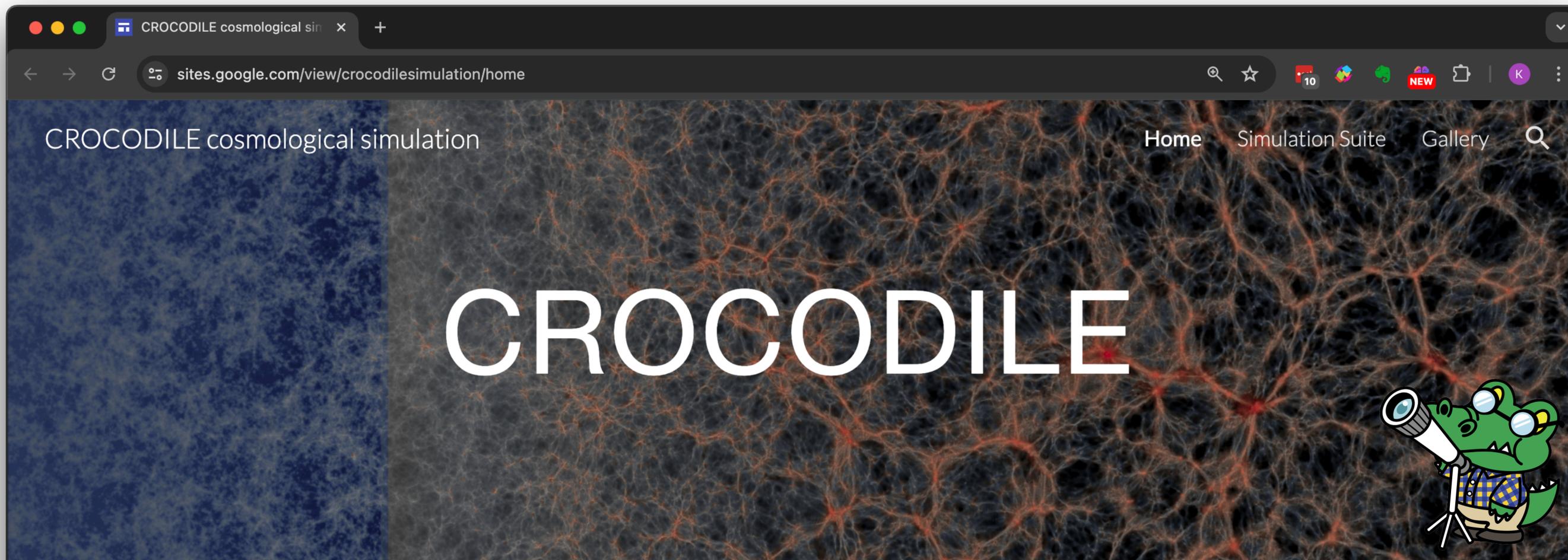




**AGORA**  
code comparison  
project

Roca-Fabrega+'21 (incl. KN)

Vogelsberger+'19



Welcome to the homepage of CROCODILE simulation project! CROCODILE simulation have been run with the GADGET4-Osaka code ([Romano et al. 2022a, 2022b](#); [Oku & Nagamine 2024](#)), a proprietary modified version of the public GADGET-4 code ([Springel et al. 2021](#)). GADGET4-Osaka uses TreePM to solve for gravity and the pressure-based entropy-conserving formulation of smoothed particle hydrodynamics (SPH) to solve for hydrodynamics. The SPH implementation includes artificial viscosity using velocity field reconstruction, artificial conduction, and a wake-up timestep limiter to ensure capturing subgrid physics effects in hydrodynamics. The CROCODILE implementation of galaxy formation physics includes radiative cooling and photoionization, star formation, stellar evolution considering a metallicity-dependent stellar initial mass function and hypernova fraction, dust evolution, stellar feedback, and supermassive black hole (SMBH) formation and feedback. Radiative gas cooling is implemented using the Grackle cooling library ([Smith et al. 2017](#)) with the ultraviolet background radiation of [Haardt & Madau \(2012\)](#). A non-thermal pressure floor is applied to prevent unphysical fragmentation. Dust production and destruction are modeled on-the-fly with 30 dust-size bins considering the diffusion of dust and metals ([Hirashita & Aoyama 2019](#); [Aoyama et al. 2020](#); [Romano et al. 2022a](#)). The stellar feedback includes supernova momentum input and galactic wind, which are modeled based on high-resolution simulations of superbubbles ([Oku et al. 2022](#); [Oku & Nagamine 2024](#)), as well as enrichment of 12 metal elements due to type-II and Ia supernovae and



<https://sites.google.com/view/crocodilesimulation/home>

# CROCODILE

Cosmological hydRodynamical  
simulation of struCture fOrmation and  
feeDback physIcs in gaLaxy Evolution

Dr. Wani

ワニ博士

— official mascot of  
UOsaka & Toyonaka city



理学部校舎建設現場での発掘風景

~1964



発掘されたマチカネワニの頭骨(上方から)



Monument near our School of Science



# CROCODILE

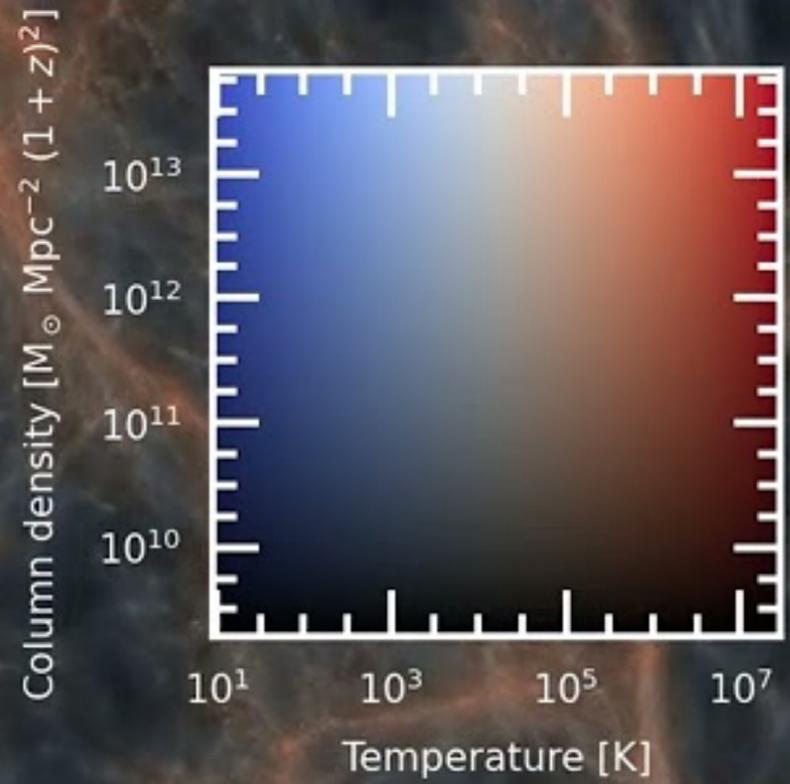
simulation

GADGET4-  
OSAKA code



Dr. Wani  
@Osaka U.

$z = 0.53$   
 $t = 8.38 \text{ Gyr}$



Understanding  
the matter  
distribution:

DM, gas, stars

HI, metals, dust, ...

25 & 50 Mpc/h

Star formation

SN & AGN fb

UVB

+ 100, 200, 500 Mpc/h



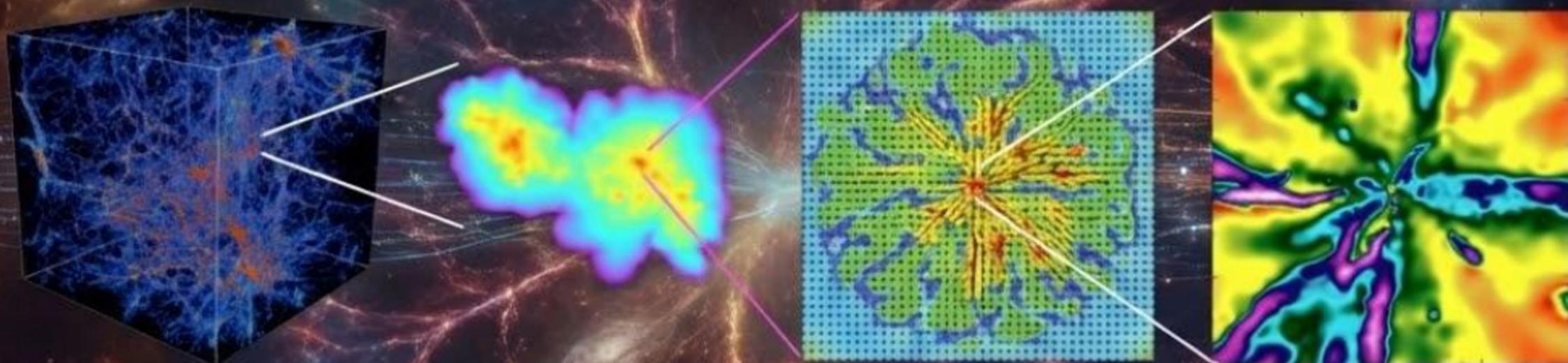
Oku & KN '24 ApJ

10 Mpc

# 宇宙論的構造形成・銀河形成

## 巨大ブラックホール形成

宇宙論的流体シミュレーション等を用いて、宇宙初期から現在までの構造形成進化を追い、宇宙望遠鏡などの観測と比較する事によって、宇宙論モデルを検証・発展させる。



### 最近の研究テーマ例(1-5)

1. 初代銀河はいつ生まれたのか？
2. 宇宙再電離、星形成史
3. 超巨大ブラックホールと銀河の共進化
4. 超新星爆発、ブラックホールからのフィードバック
5. ダークマター、ガス、星の分布

### 最近の研究テーマ例(6-9)

6. 巨大ブラックホールへの物質降着現象
7. 星やブラックホールからの輻射輸送
8. 銀河サーベイ観測データとの比較
9. 大規模構造の未来発展

# パラメータ探しの問題

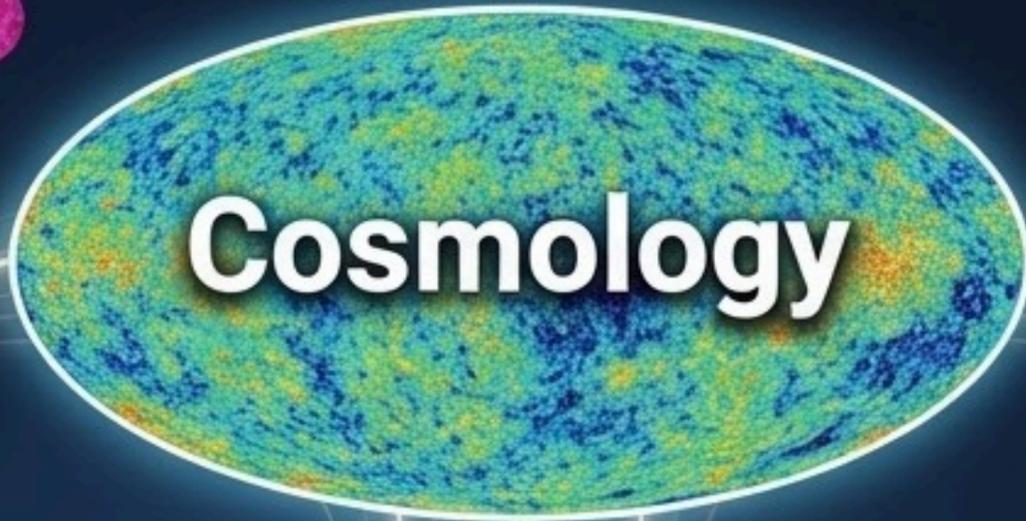
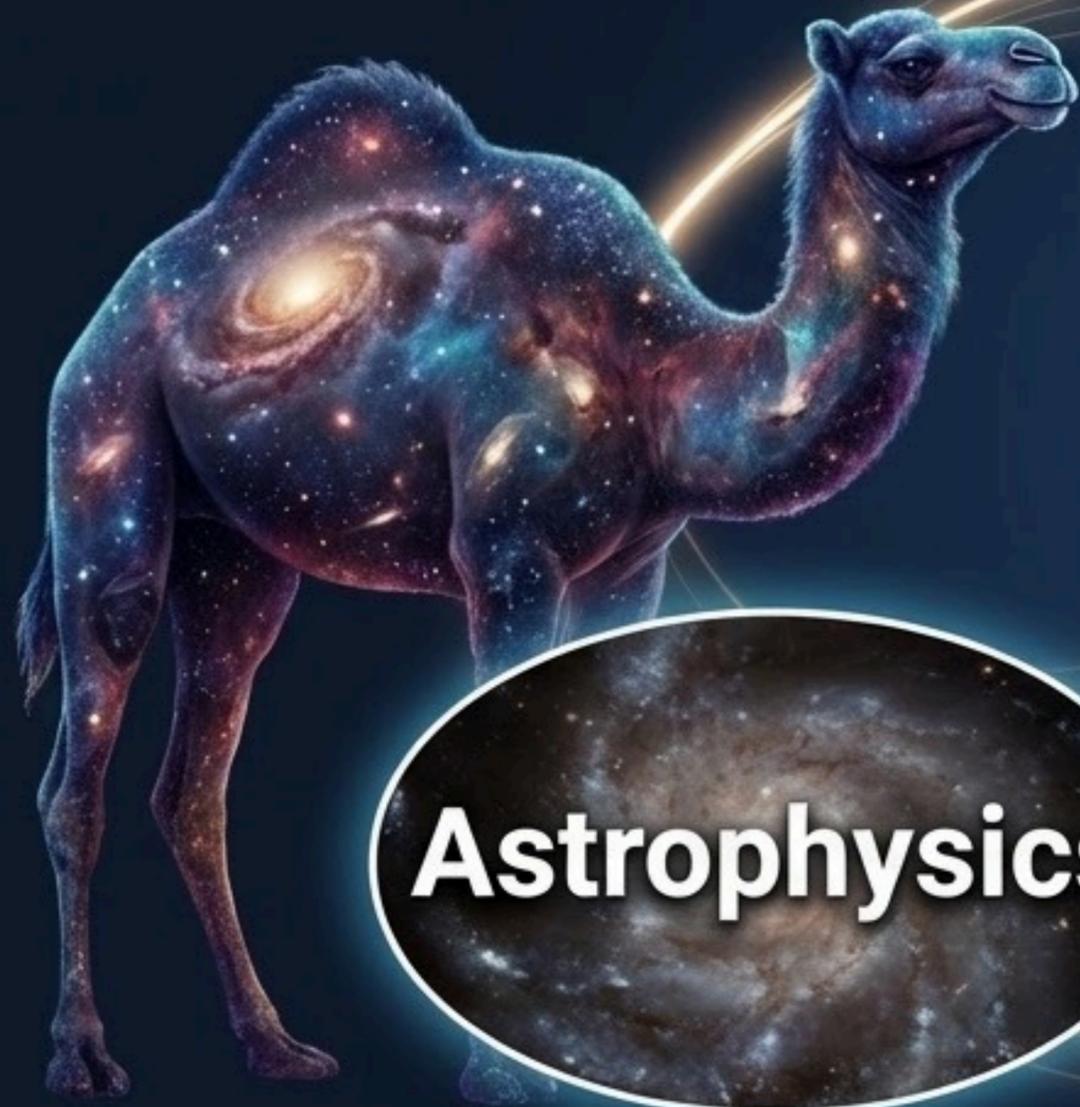


普通のフォワードモデリングだと  
膨大な計算資源が必要になってしまう、、、

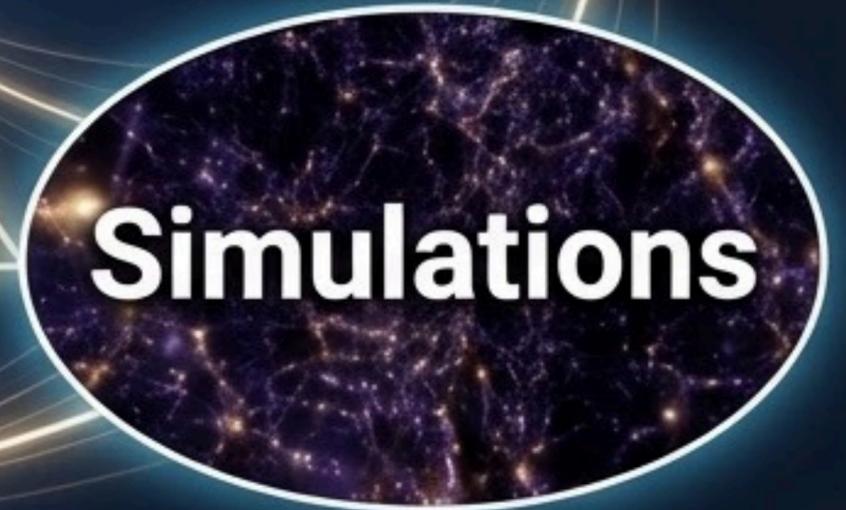
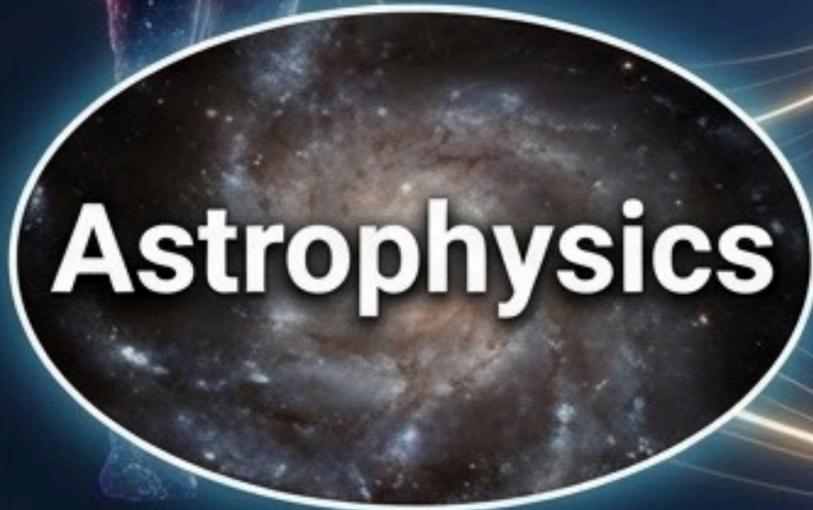


# CAMELS

<https://www.camel-simulations.org/>



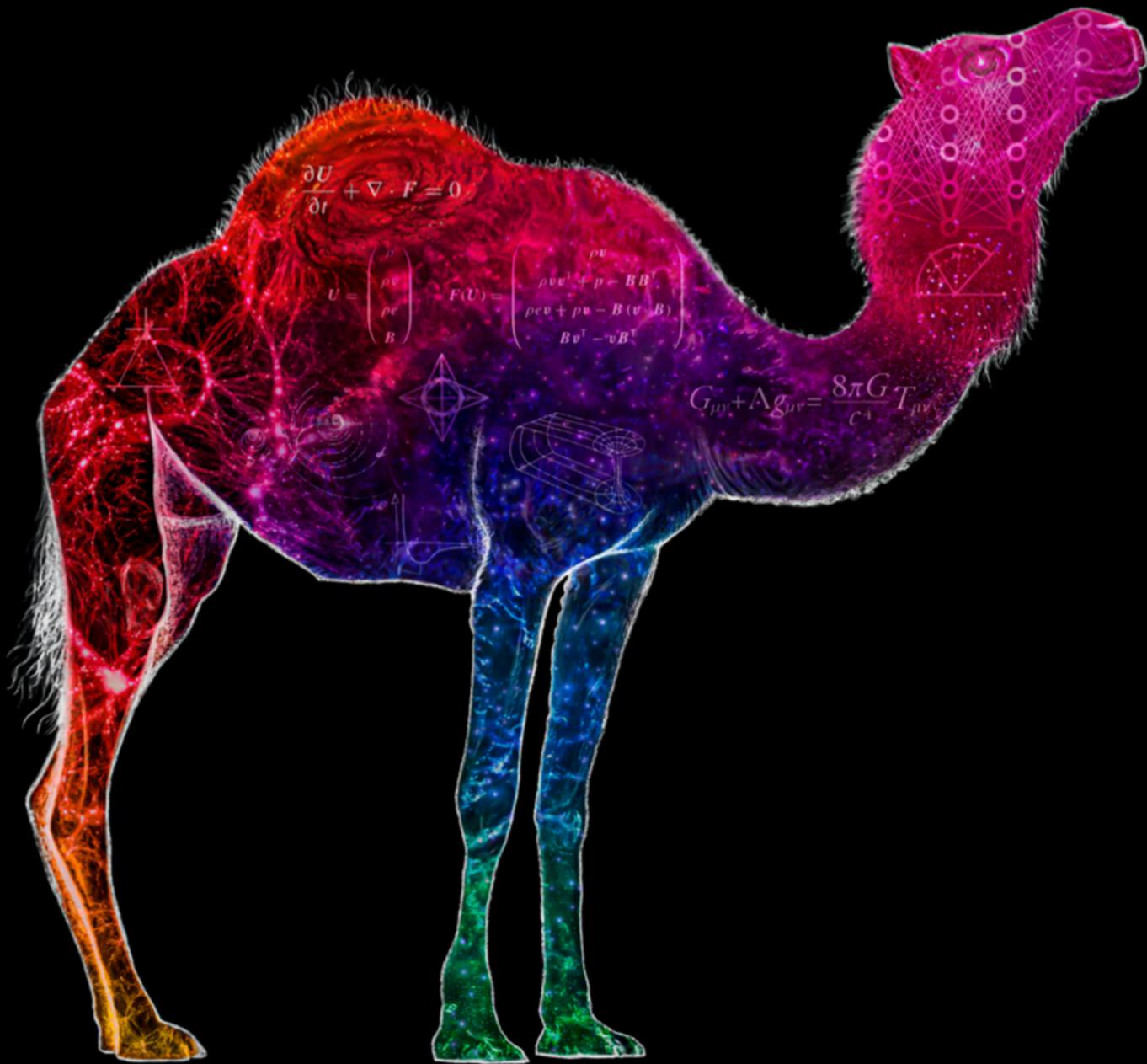
Machine Learning



# CAMELS

Cosmology and Astrophysics with  
Machine Learning Simulations

<https://www.camel-simulations.org>



## A set of 14,000+ simulations:

- 6,000+ N-body sims
- 8,000+ state-of-the art hydrodynamic sims

## Hydrodynamic sims w/ 9 different codes/subgrid models:

1) IllustrisTNG, 2) SIMBA, 3) Astrid, 4) Magneticum, 5) SWIFT-EAGLE, 6) Ramses, 7) Enzo, 8) **CROCODILE**, 9) Obsidian

## - Variations in cosmological & astrophysical parameters

2-4 cosmological & 4-30 astrophysical parameters

## - Hundreds of thousands of snapshots & galaxy catalogs

## - Designed for *Machine Learning Applications*

# CAMELS

<https://www.camel-simulations.org/>

≥ 4PB and increasing.

Now L25 & L50

~1.6PB

~1.8PB

## Suite

- IllustrisTNG
- SIMBA
- Astrid
- Magneticum
- CROCODILE
- SWIFT-EAGLE
- Ramses
- Enzo
- Obsidian

### SB

5 cosmological parameters

Most astrophysical parameters

Different random seed

1,024 simulations

### LH

$\Omega_m, \sigma_8$   
 $A_{SN1}, A_{SN2}$   
 $A_{AGN1}, A_{AGN2}$

Different random seed

1,000 simulations

### 1P

$\Omega_m, \sigma_8$   
 $A_{SN1}, A_{SN2}$   
 $A_{AGN1}, A_{AGN2}$

Same random seed

~80 simulations

### CV

Same cosmology & astrophysics

Different random seed

27 simulations

### EX

Same cosmology  
Extreme astrophysics

Same random seed

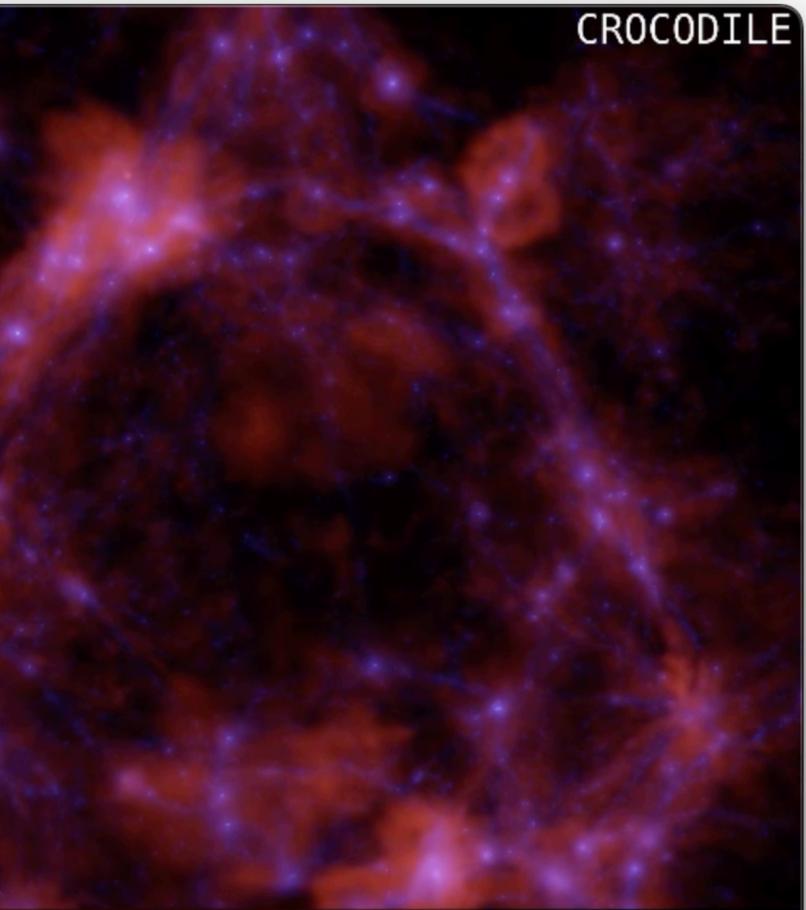
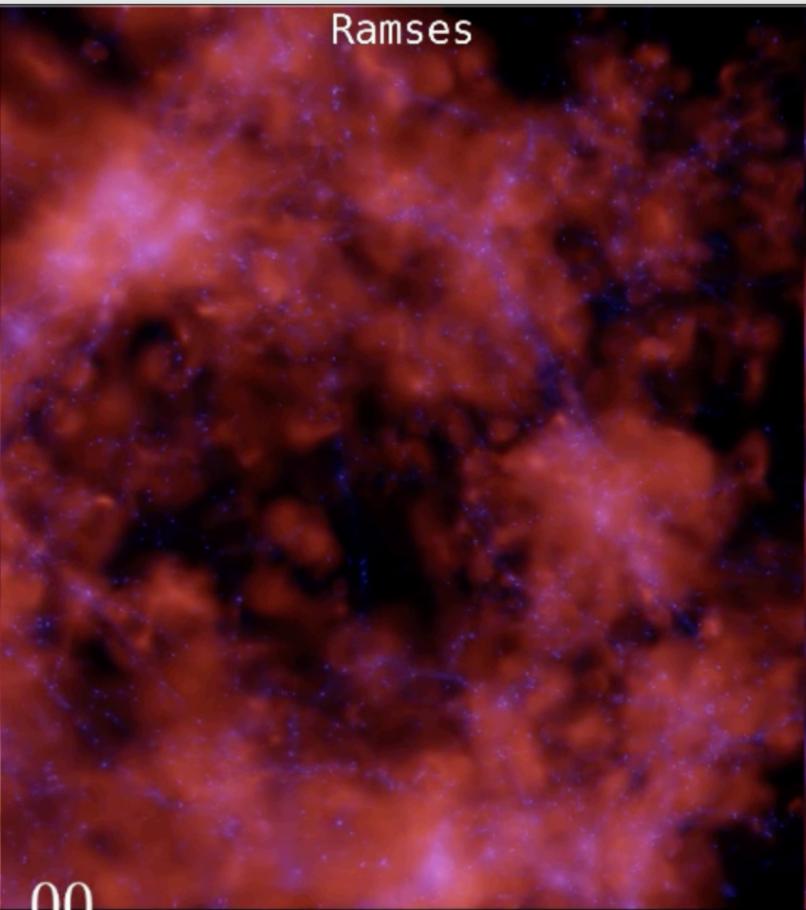
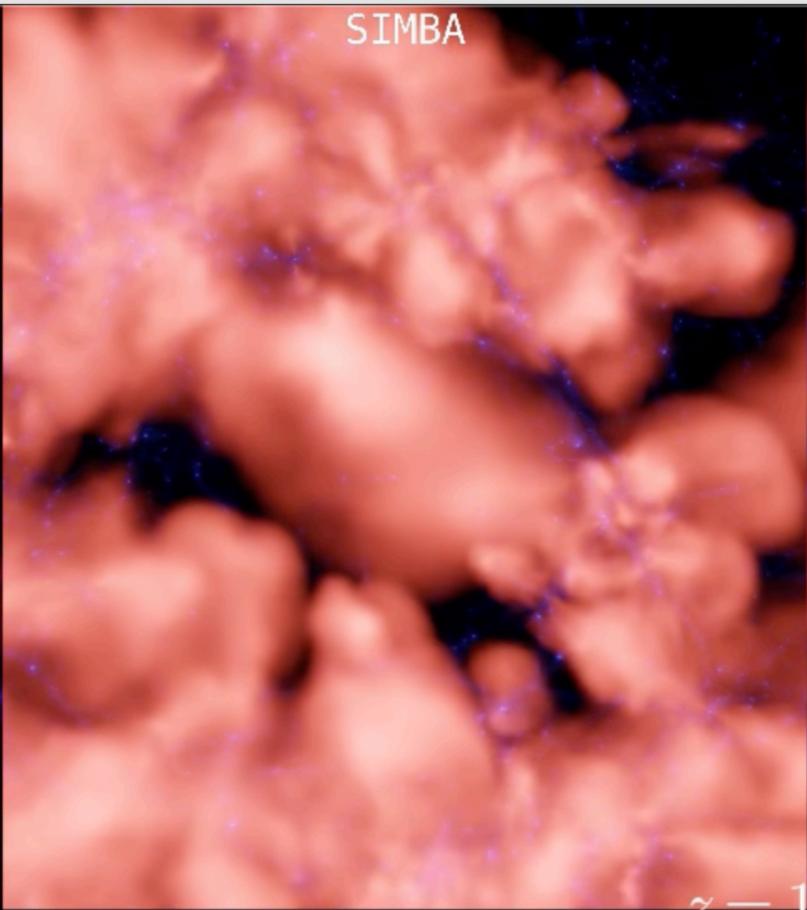
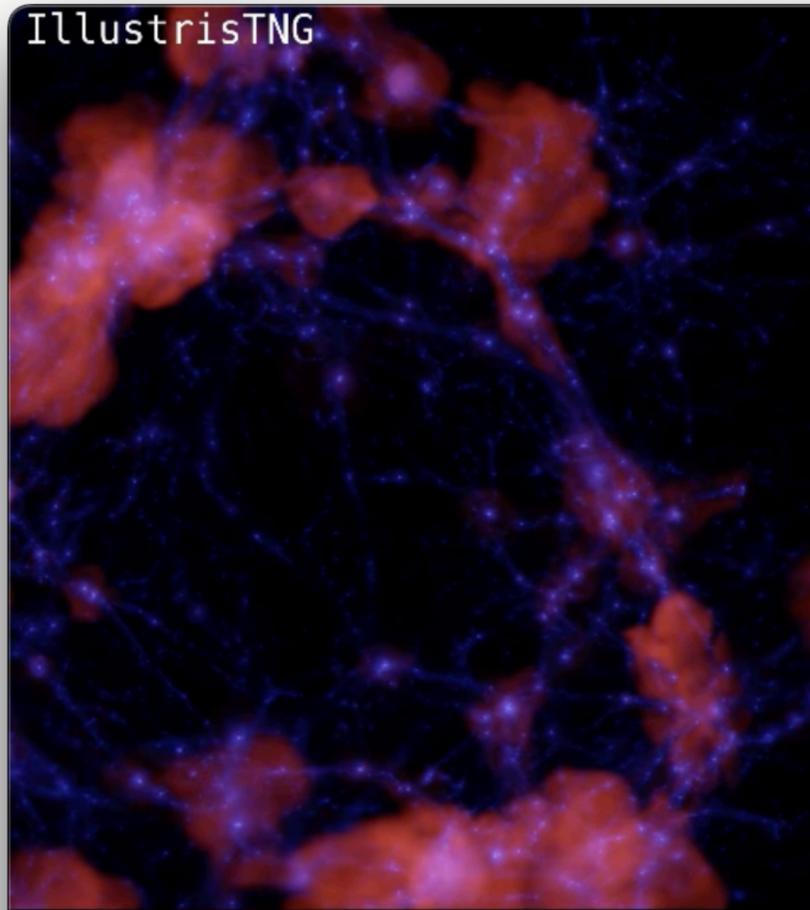
3 simulations

IllustrisTNG

SIMBA

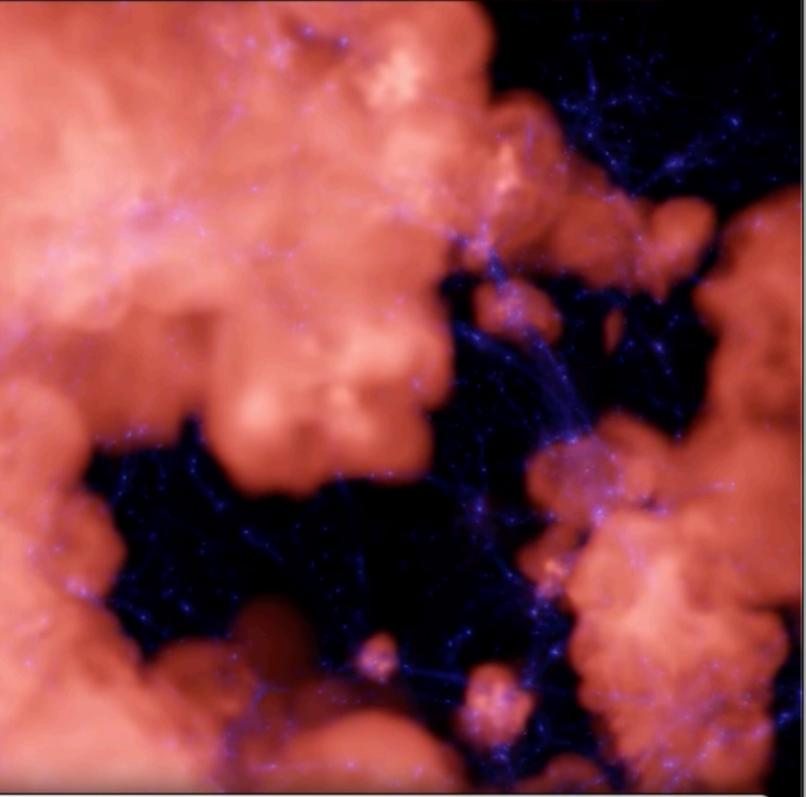
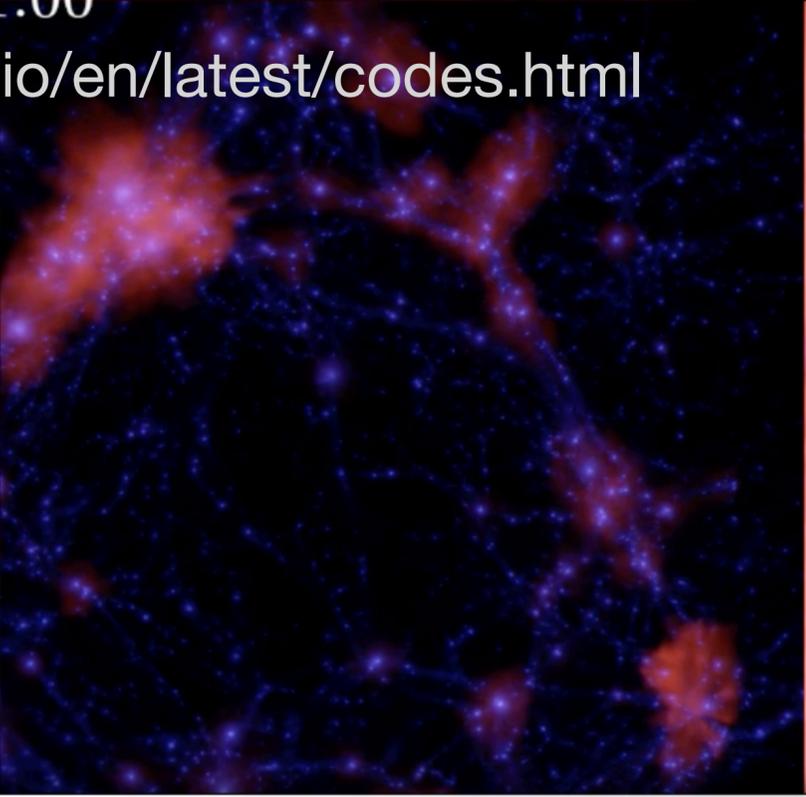
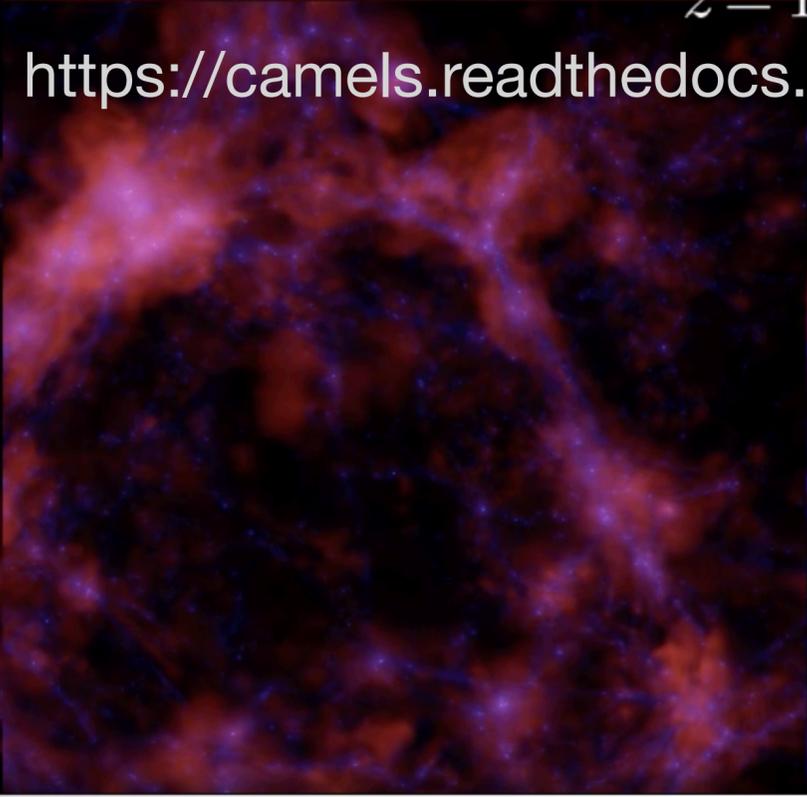
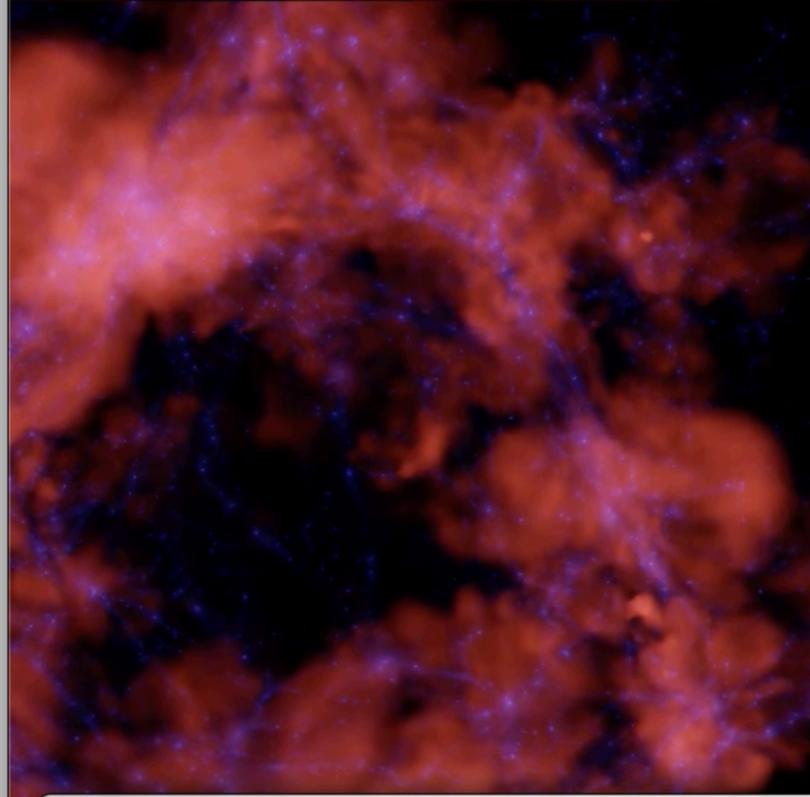
Ramses

CROCODILE



$z = 1.00$

<https://camels.readthedocs.io/en/latest/codes.html>

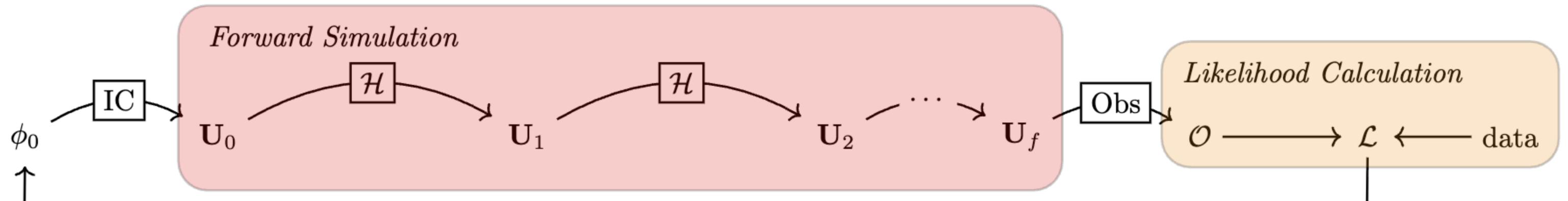


00:31  -00:11

Magneticum LAGLLE ASTRID Obsidian

# Differentiable Simulations (微分可能シミュレーション)

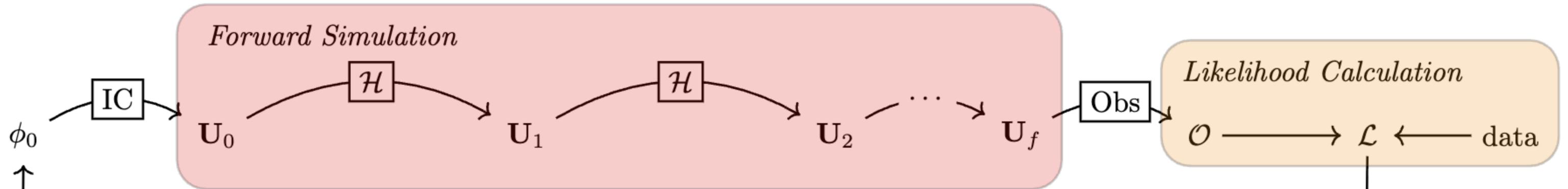
## Normal Forward Simulation



e.g. Horowitz+ '25a; Horowitz, Lukic, KN, Oku '25

# Differentiable Simulations (微分可能シミュレーション)

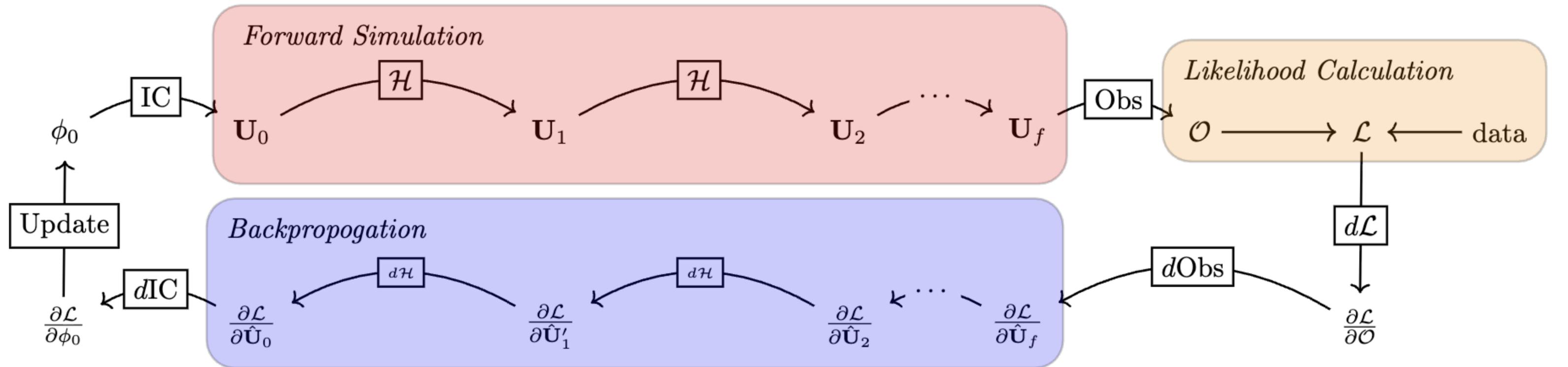
## Normal Forward Simulation



どう初期条件を変更したら、現実の宇宙により近くなるか？

宇宙物理学の知見、洞察、直観、MCMC, ...

# Differentiable Simulations (微分可能シミュレーション)



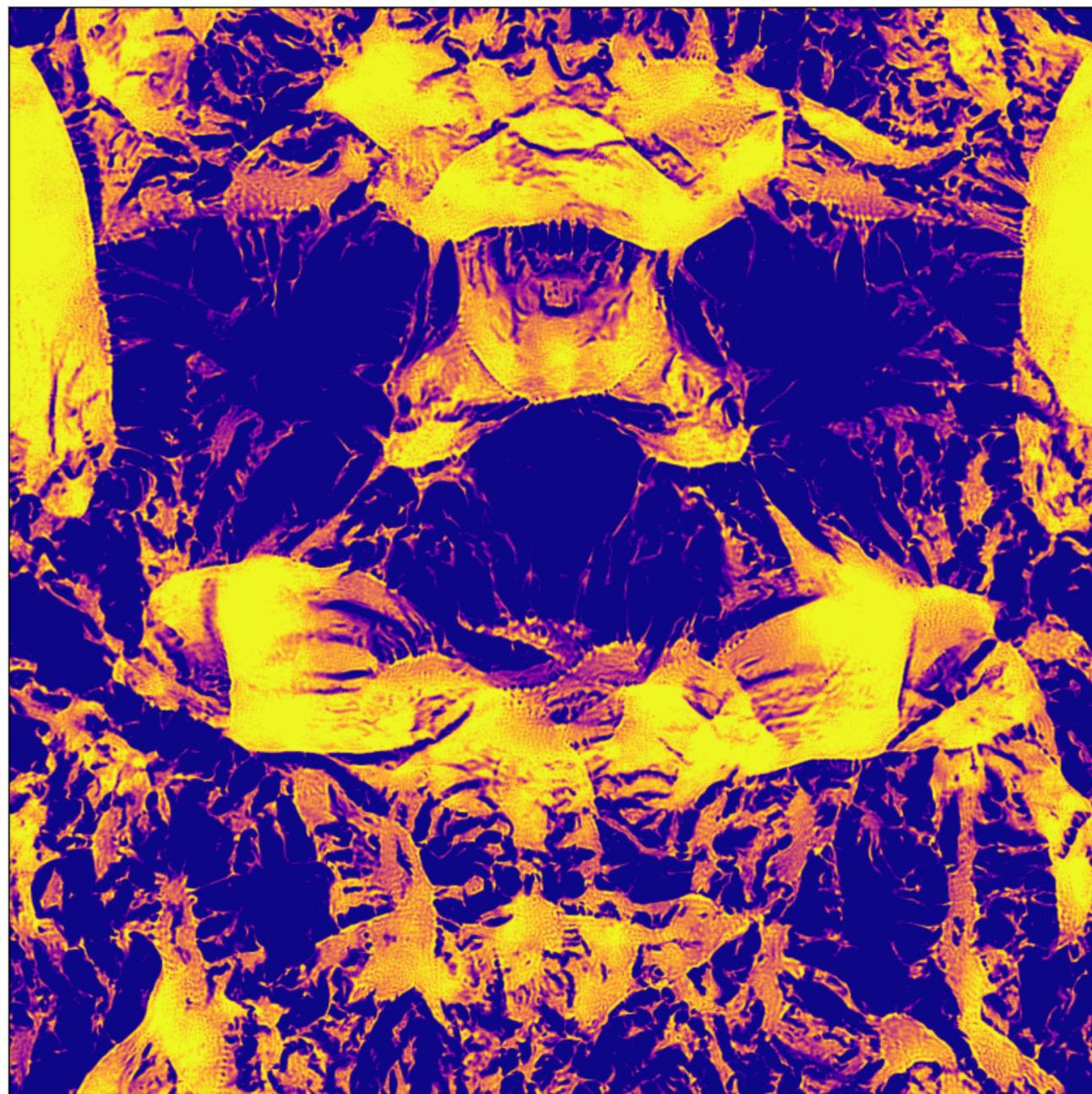
## バックプロパゲーション

Use gradients to optimize (like training a neural network) or sample w/ gradients (HMC)

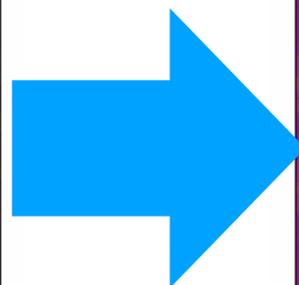
e.g. Horowitz+ '25a; Horowitz, Lukic, KN, Oku '25

# Diff-Hydro の実演デモ

100万パラメータの最適化fit、diff-hydroで1200 timestep, 500回反復



GPU (A100)で2時間

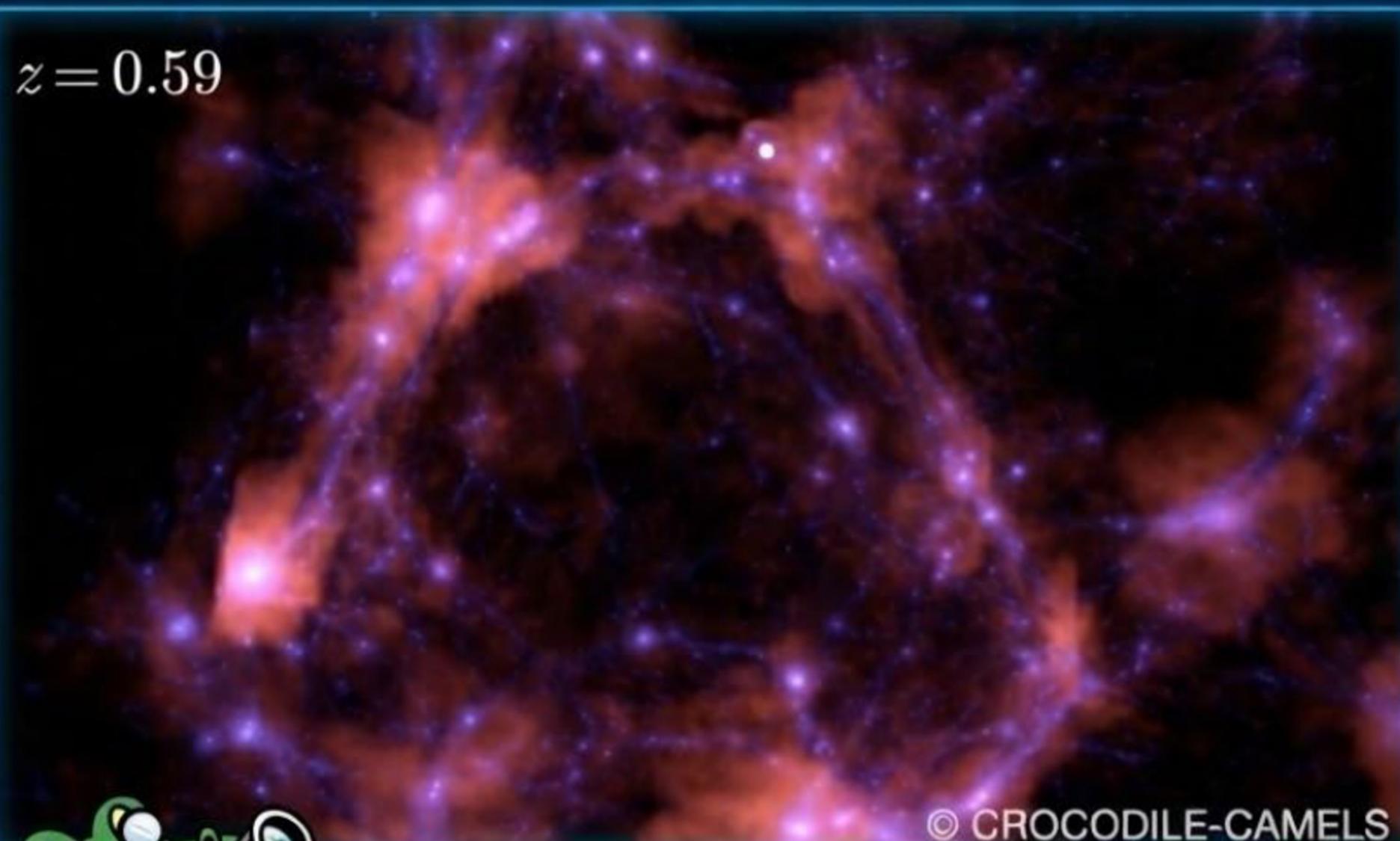


(最新の H100なら  $\approx$ 1時間)

# CROCODILEと微分可能流体力学

宇宙論的流体シミュレーション (N体+SPH法流体)

$z = 0.59$



© CROCODILE-CAMELS

## CROCODILE シミュレーションの概要

- 📦  $(25-500 \text{ Mpc}/h)^3$ , 解像度  $\sim 1 \text{ kpc}$
- 🌀 再電離期から現在までの星形成、超新星とAGNフィードバック、金属量汚染進化を包括的に扱い、IGM Ly $\alpha$  吸収統計とも整合的。

📄 (Oku & Nagamine '22, '24)

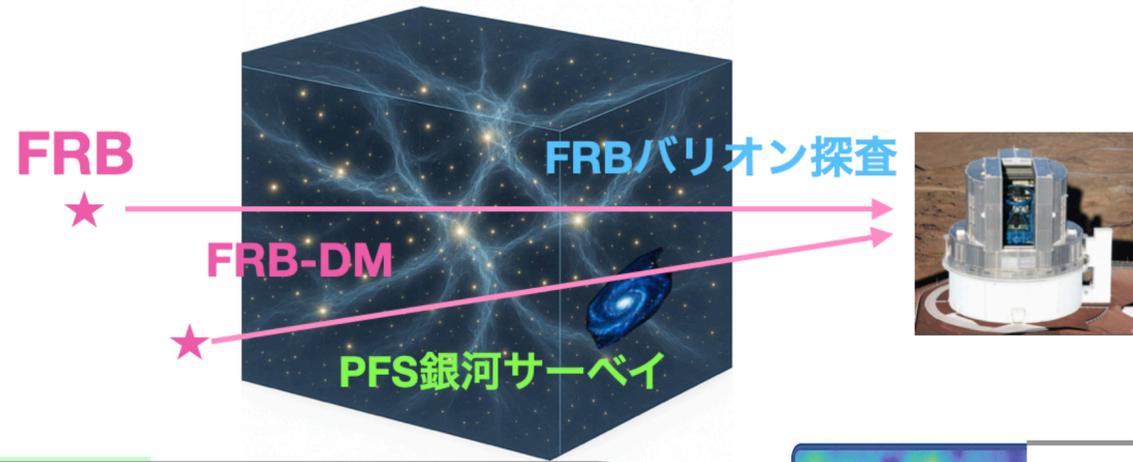
## 微分可能流体力学 (diff-hydro) への展開

本モデルをJAXベースの微分可能流体力学 (diff-hydro; DH)に移植し、CROCODILE-DHを開発する。🧠

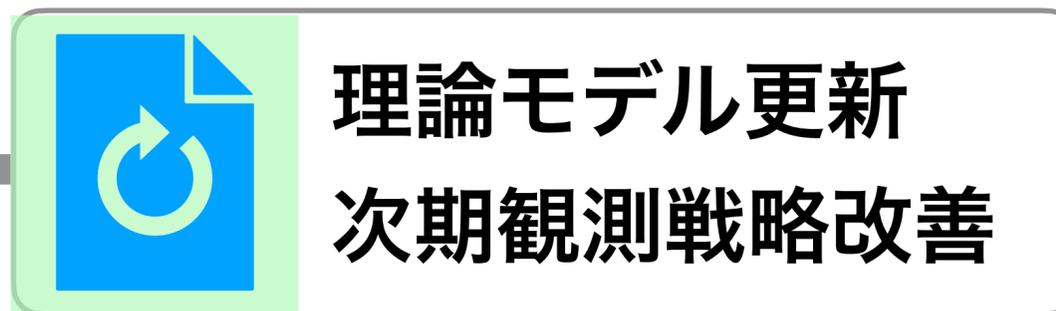
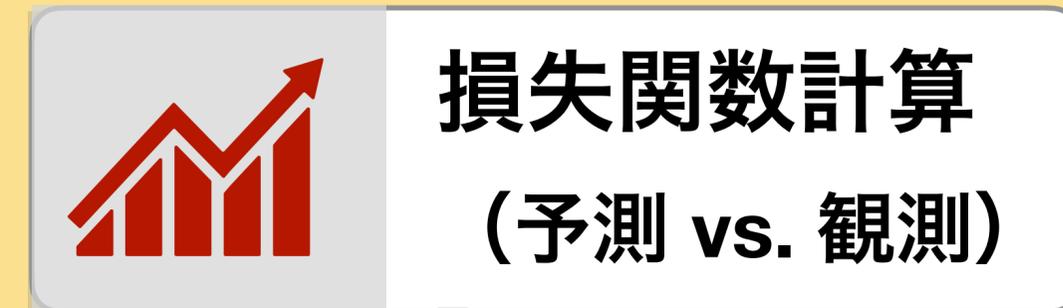
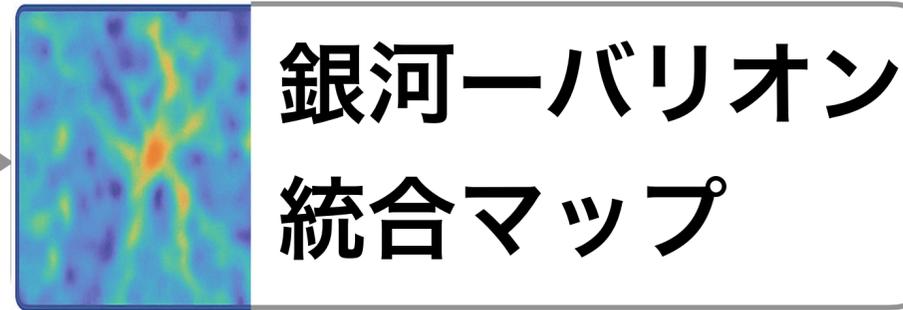
シミュレーションの自動微分が可能となり、  
観測データとの誤差 (損失関数) から物理パラメータの勾配  
を直接計算し、データ駆動でモデルを最適化



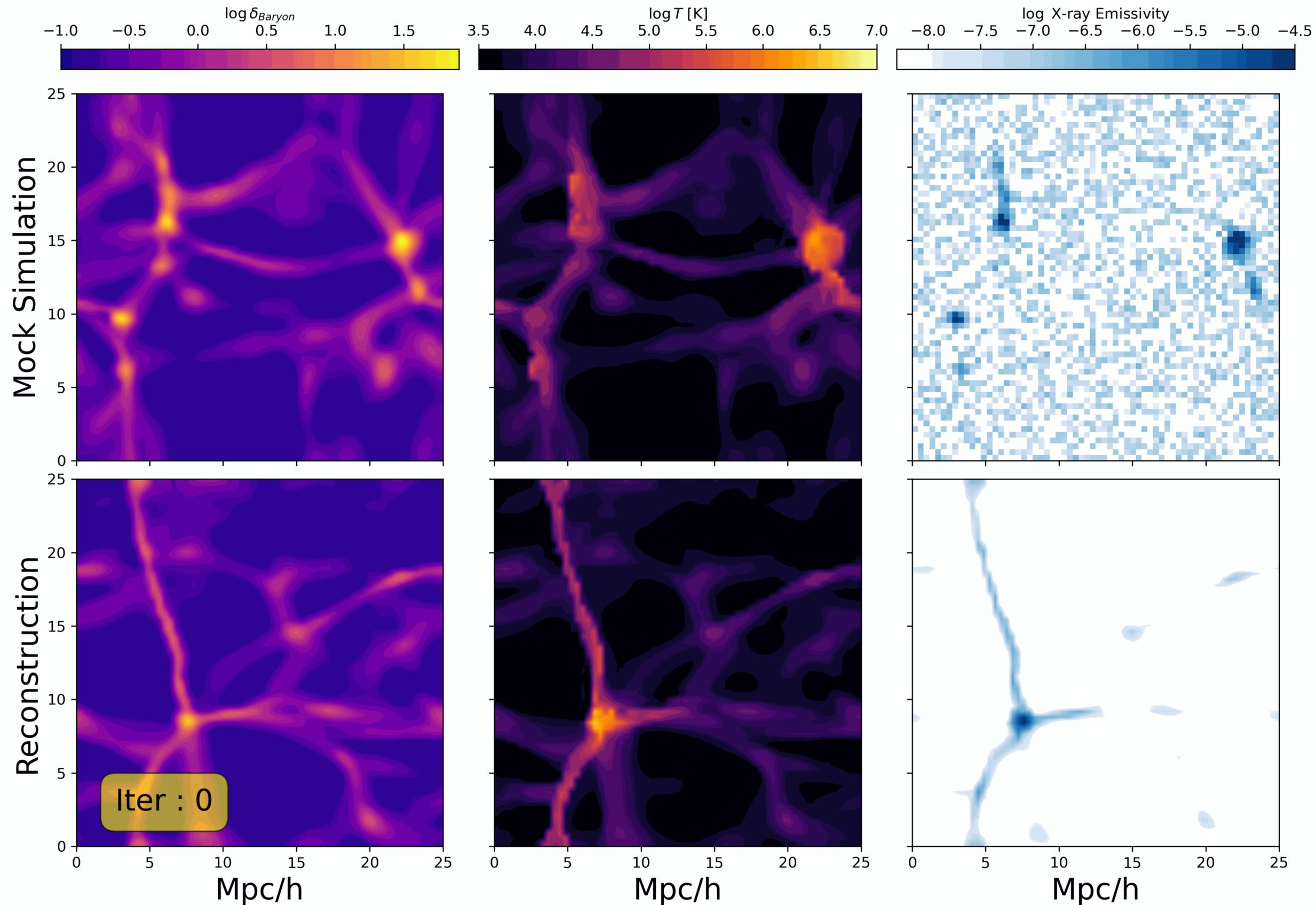
# データ駆動型のワークフロー



理論・高速最適化フェーズ



# jaxPM + diffhydro cosmological simulation



L25,  $256^3$   
demo w/  
cooling

Optimized to  
the X-ray map

# 大学が自前でスパコンを持つ意義

— 商用クラウドでは代替できない7つの理由 —

## 若手の教育

ジョブスケジューラ・並列化・  
大規模データ処理を実機で経験

## 技術職員の存在

計算科学の専門スタッフが  
学内にいて気軽に相談できる

## コスト優位性

大規模GPU計算では  
オンプレが圧倒的に安い

## 高速通信と性能

InfiniBand前提の強スケーリング  
MPI計算はクラウドでは困難？

## 機密性とデータ主権

機密データの国内保持、  
データ所在地を学内で保証

## 文化とコミュニティ

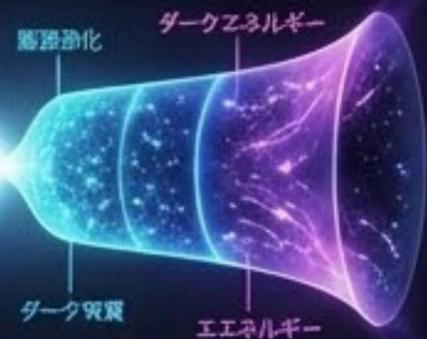
計算科学の求心力・共同研究  
のハブ、HPC文化の継承

## 計算機科学の研究

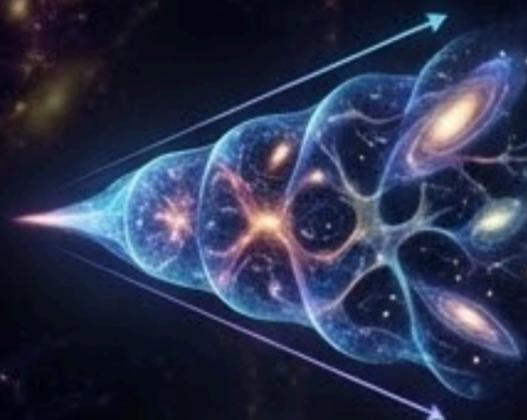
ベンチマーク・システム研究に  
自由に触れる実機が不可欠

# Summary

## 現在の宇宙論の到達点と課題



- 精密宇宙論の成功（ダークマターとダークエネルギーに支配された膨張宇宙モデル）

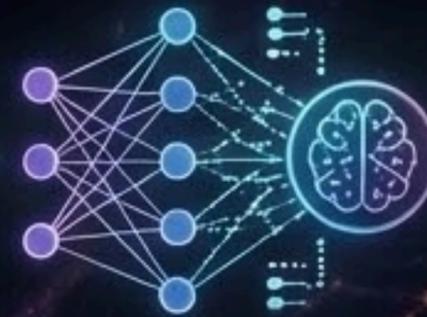


- 非線形な現在の宇宙への進化も理解されるようになってきた。

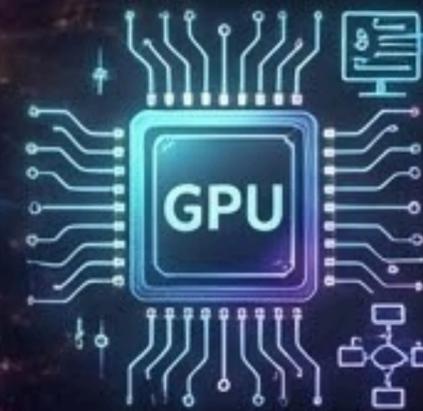


- しかし、さらなる精緻なパラメータ探し問題。

## 将来の展望と技術



- 機械学習・AIを用いた新しい解析手法



- 微分可能シミュレーション、GPU



- 大学が果たす役割

# Dark matter particle candidates

DM particle mass  $m_{\text{DM}}$

GeV-TeV

**CDM** — **Thermal relic WIMP** (10GeV ~ 1TeV)

$v_{\text{th}} \approx 0 \text{ km/s}$

(cf. self-interacting DM)

keV

**WDM** — becomes non-relativistic earlier than CDM;  
suppress perturbation at galactic or smaller scales

$v_{\text{th}} \approx 0.03 \text{ km/s}$

(gravitino, sterile neutrino,...)

eV

**HDM** — remains relativistic until late time, and erase  
structures at super-galactic scales.

$v_{\text{th}} \approx 30 \text{ km/s}$

( $\nu$ ,...)

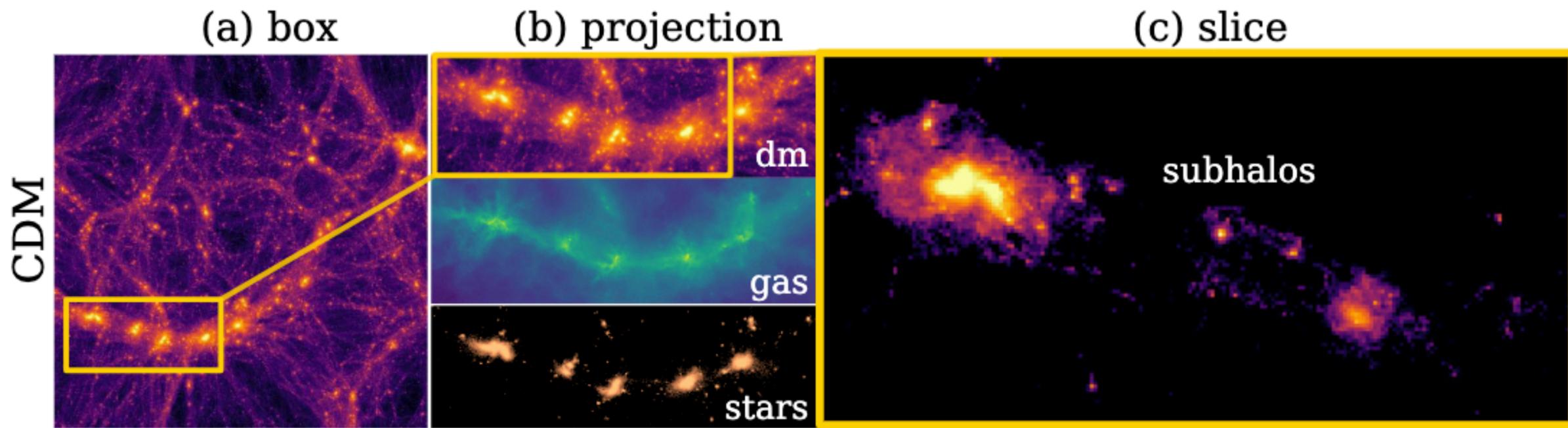
$\mu\text{eV} \sim \text{meV}$

standard QCD-**axion**

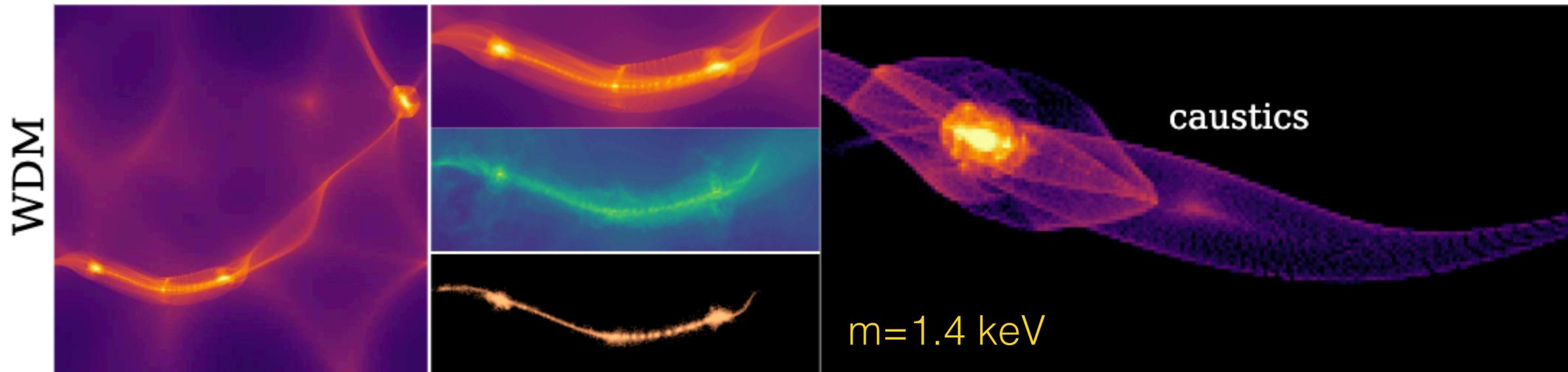
$\sim 10^{-22} \text{ eV}$

**FDM** (Fuzzy DM; axion-like, ALP, ULA)

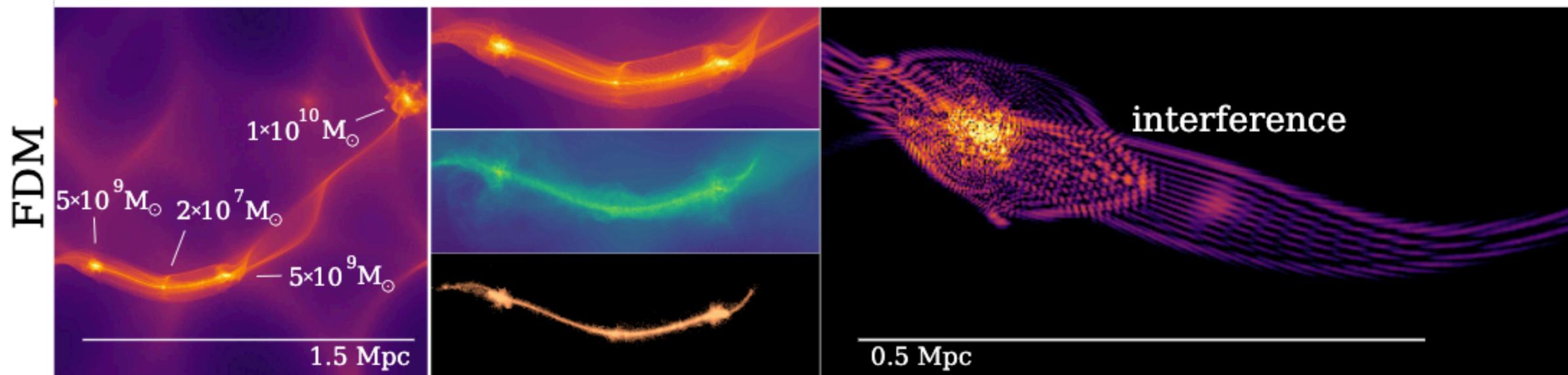
**CDM**



**WDM**



**FDM**



$z \sim 7$   
Mocz+ '21



# 長峯健太郎

大阪大学大学院理学研究科  
宇宙地球科学専攻 教授

CROCODILE 宇宙論的流体シミュレーション



専門：宇宙物理学理論・宇宙論

研究内容：

ダークマターとダークエネルギーに支配された宇  
ける構造形成を、初期宇宙から現在まで、第一  
原理から宇宙論的流体シミュレーションによって  
解く。近年は、観測データと計算科学を融合した  
データ駆動型の宇宙論研究にも注力し、新しい  
理学研究の展開を目指している。

スパコンとの関わり：

17年間の在米研究時代に様々なスパコンやコードで研究  
(NCSA@イリノイ大、SDSC@UCSDなど)。NSF Cyber  
Infrastructure委員会でTeragrid → XSEDEの移行にも関  
与。2013年から現職、D3センターのOCTOPUS、SQUIDも  
利用。D3センター高性能計算機システム委員会、筑波大  
計算科学研究センター委員会も務める。

