

2024年3月20日

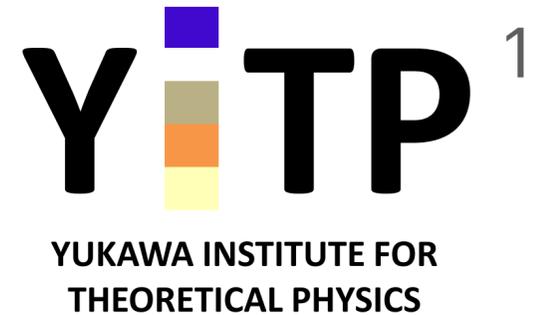
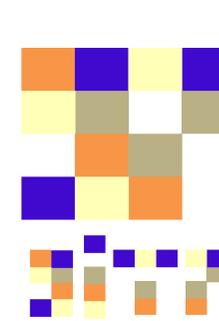
物理学会春季大会

「極限非平衡現象から探る宇宙
における物質と構造の創生」

20pVI-8

宇宙の構造形成における 非平衡重力ダイナミクス

樽家 篤史 (京都大学 基礎物理学研究所)



1

宇宙の構造形成

†1 Mpc = メガパーセク = 300万光年

宇宙には「大規模構造」と呼ばれる宇宙全体に広がる非一様な質量分布の空間パターンがある ($> 10^3 \text{ Mpc}^\dagger$) → 宇宙最大の‘**構造物**’

宇宙の標準モデル
にもとづく描像

- ▶ ダークマター、バリオン (+ ニュートリノ) から成る
(通常物質)
- ▶ 宇宙膨張と重力相互作用の影響を受けて小さな“ゆらぎ”から進化

大規模構造の成り立ち・進化 (= 構造形成) の理解は、宇宙論の一大テーマ
(→ 天文観測を通じて様々な検証・制限)

本講演では、

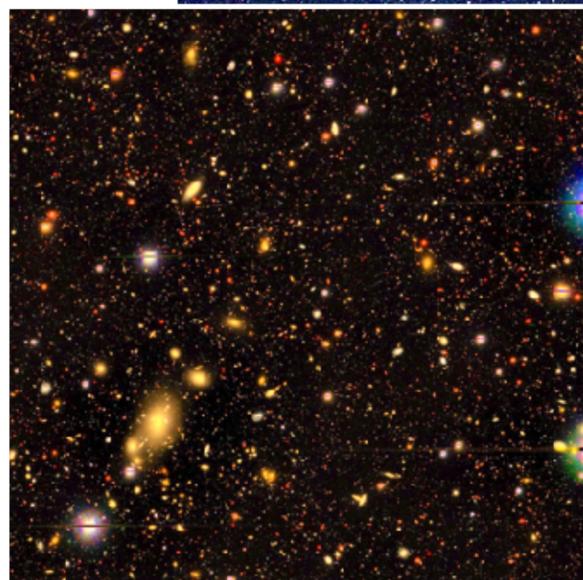
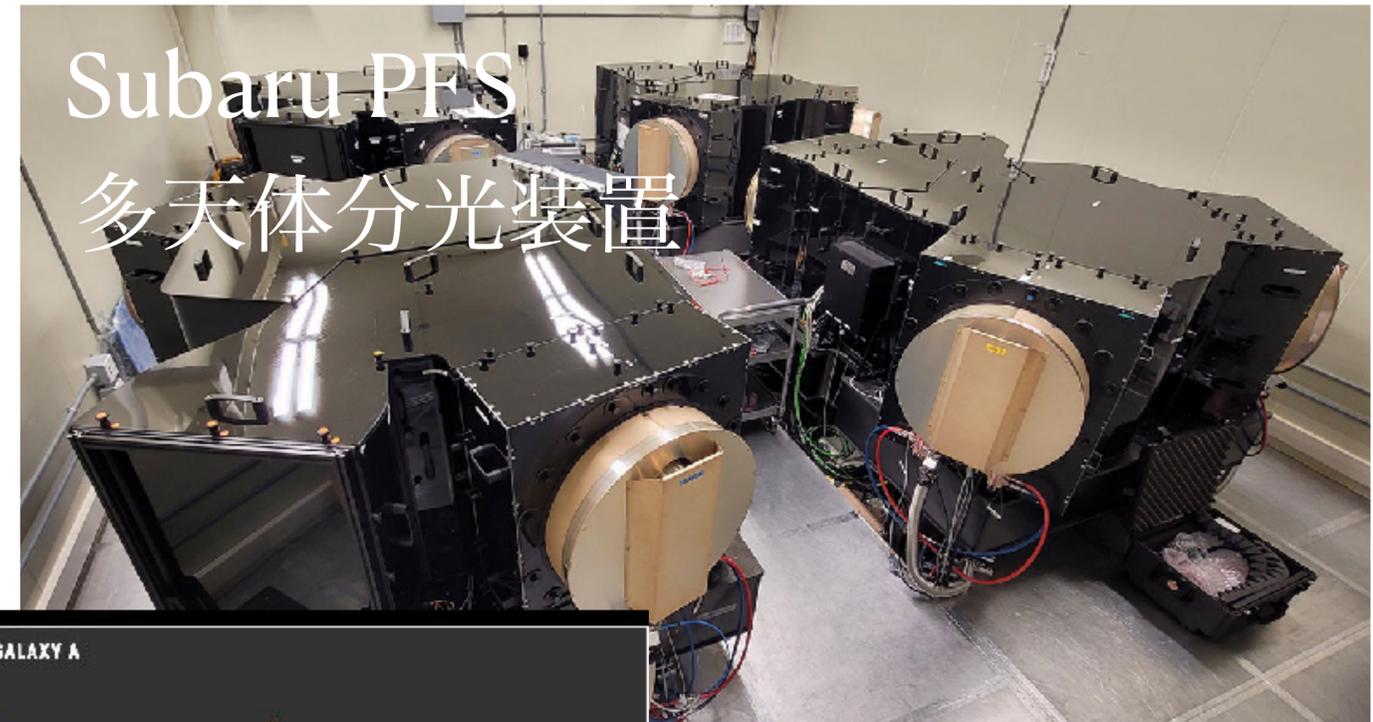
宇宙の大規模構造の進化を極限非平衡現象として捉え、
重力が生み出す構造の特徴と普遍性について概観

大規模構造を見る

銀河サーベイによる観測

✓ 撮像サーベイ

✓ 分光サーベイ



→ 銀河の写真撮る



→ 銀河のスペクトルを取る

大規模構造を見る

銀河サーベイによる観測

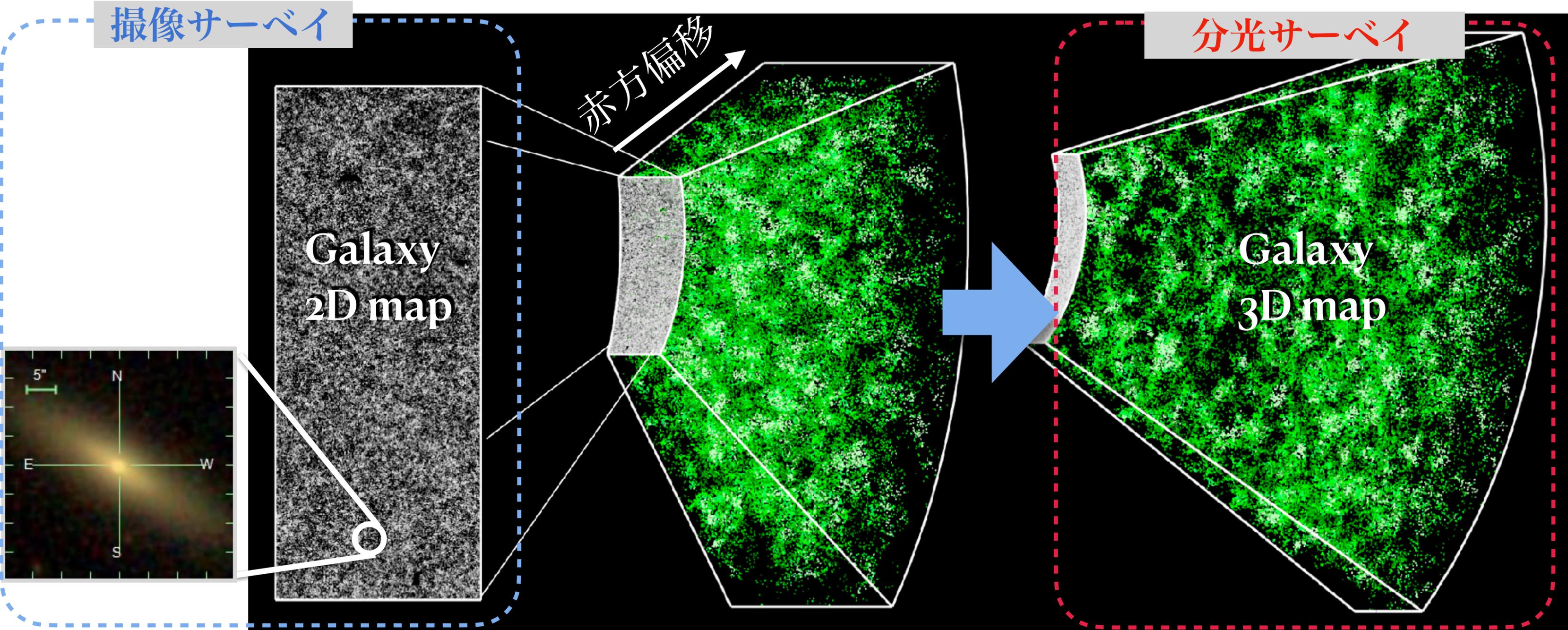
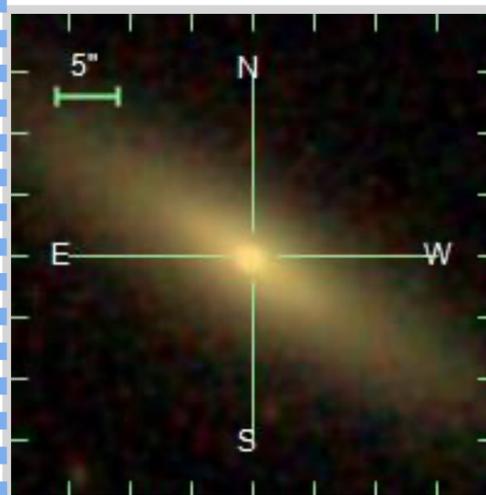
撮像サーベイ

Galaxy
2D map

赤方偏移

分光サーベイ

Galaxy
3D map



宇宙の大規模構造

スローンデジタルスカイサーベイ eBOSS で見た銀河宇宙

大規模構造の形成

小さな密度ムラが“重力不安定性”によって増幅

特に圧倒的なものが、

ダークマターの重力

しかも、ダークマターは“冷たい” → コールドダークマター (CDM)

重力相互作用しかせず、十分過去から非相対論的粒子

= 速度分散が十分小さい ($m_{\text{DM}} \gg T_{\text{DM}}$)

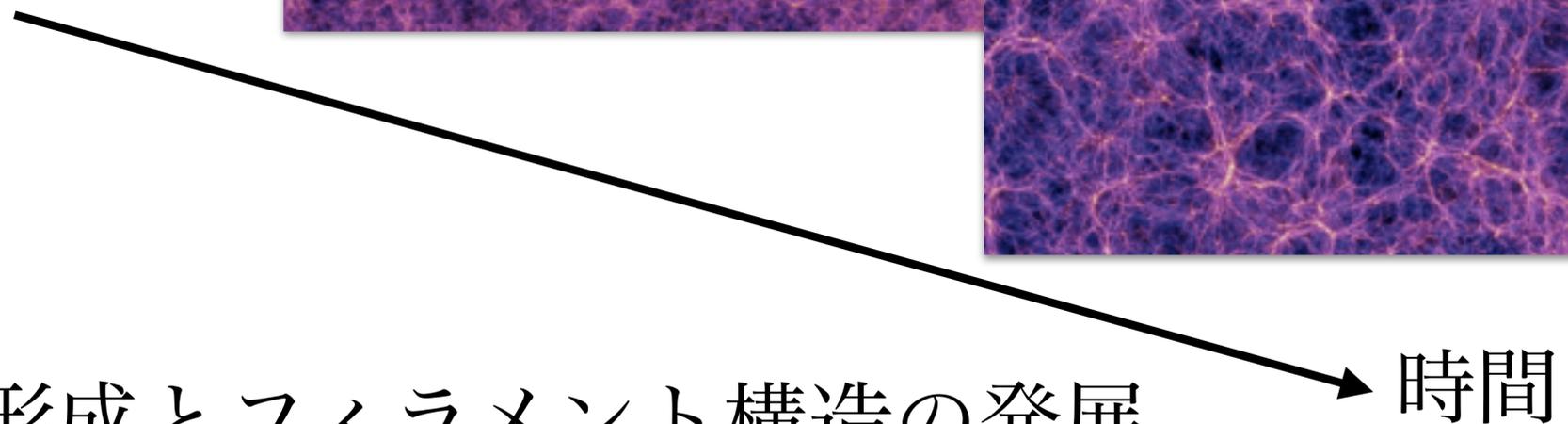
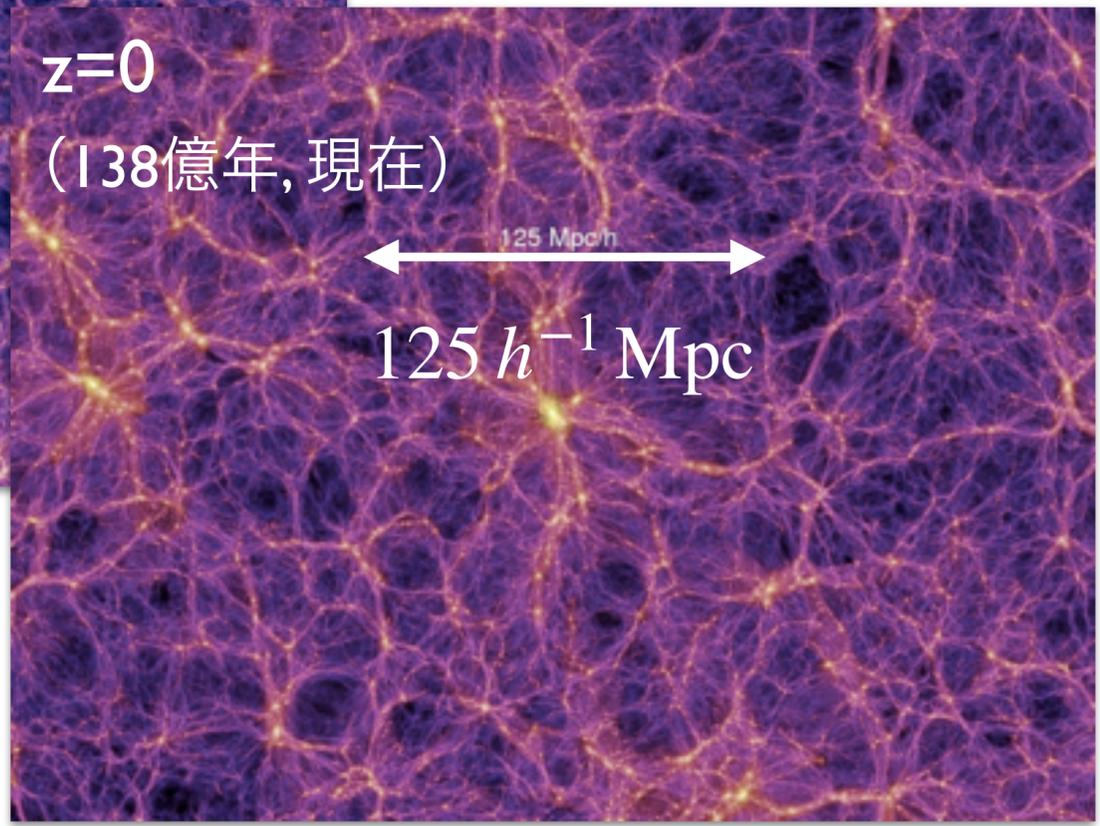
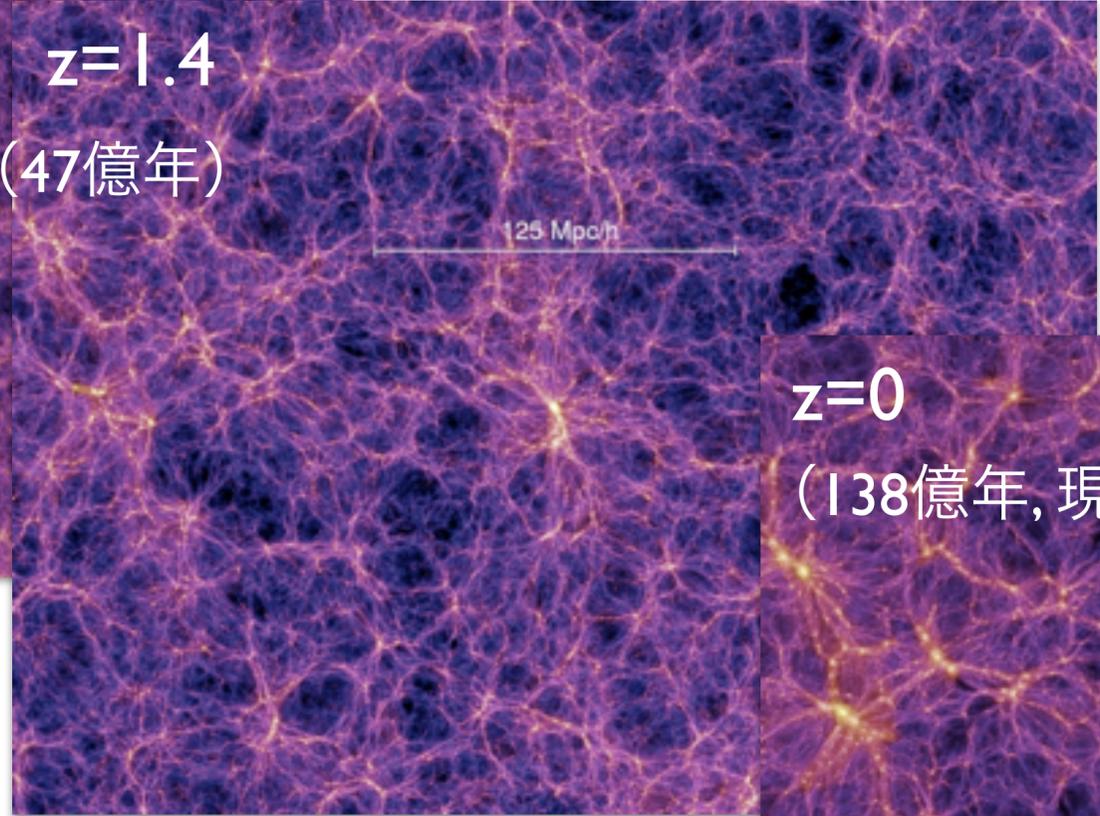
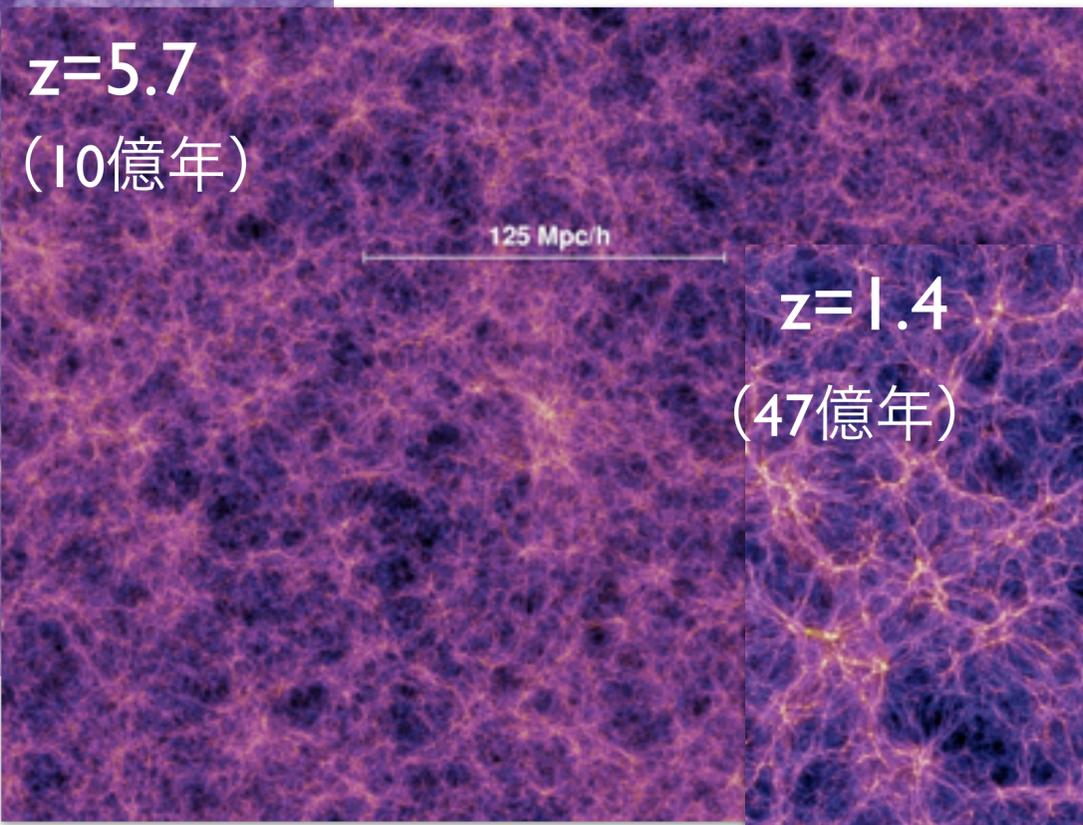
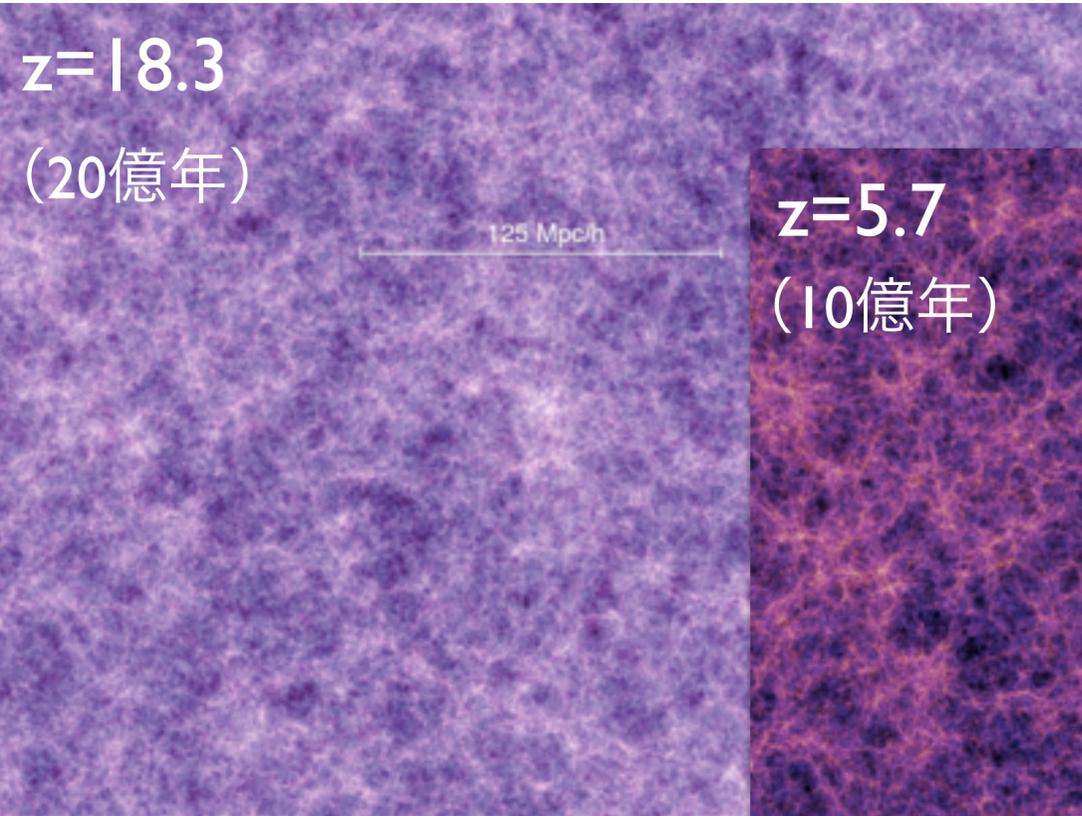
質量 温度

大スケールの観測ともマッチ：

宇宙マイクロ背景放射の非等方性、バリオンの追いつき現象、階層的クラスタリング、...

ダークマター優勢宇宙の構造形成

宇宙論的N体シミュレーションが描く宇宙



ハローの形成とフィラメント構造の発展

宇宙論的 N 体シミュレーション

(Angulo & Hahn '22 for a review)

ダークマター分布を質点粒子の集まりで表し、それらの運動方程式を解く手法

- **宇宙膨張**と**重力多体計算** (ツリー、粒子・メッシュ法)
- 宇宙論的な**初期条件** (原始ゆらぎの性質にもとづくランダム密度・速度場の生成)

周期境界条件の下で

様々なコードと大規模データが公開：

Gadget-2/4, GreeM, PKDGRAV₃, RAMSES, ...

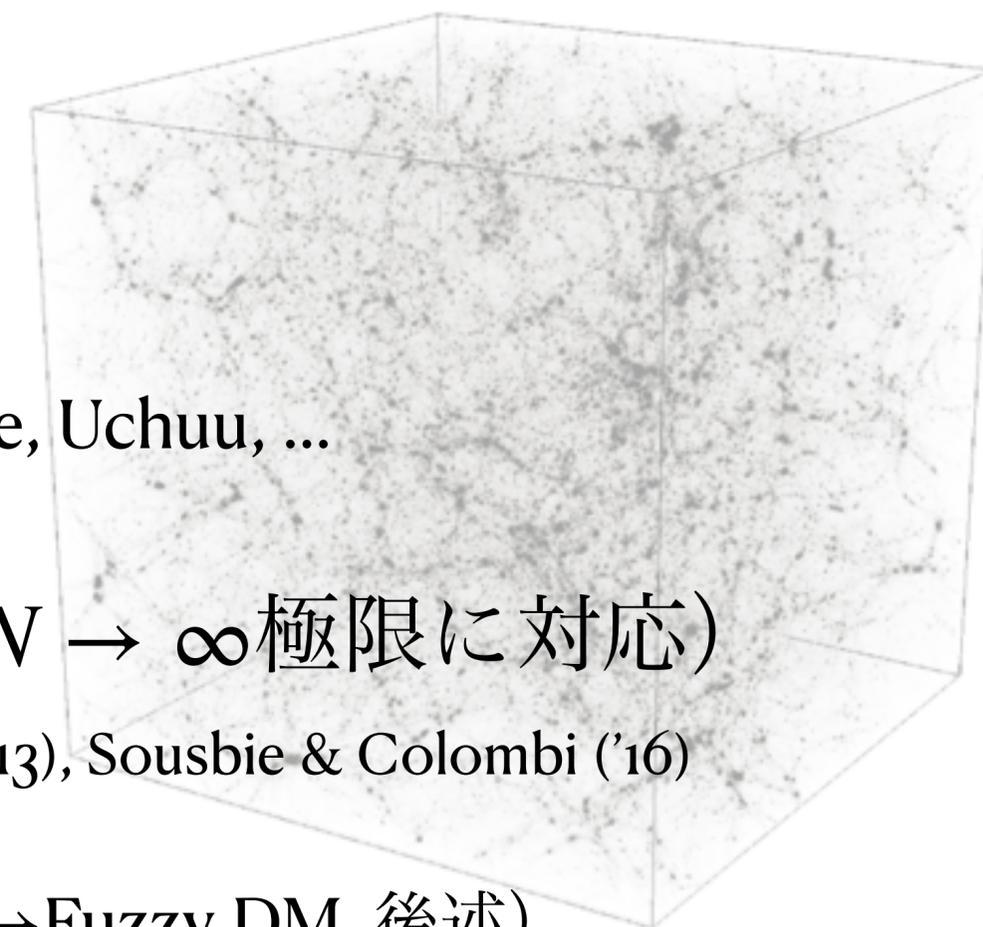
AbacusSummit, BACCO, Dark Quest, Illustris TNG, Quijote, Uchuu, ...

最近では、

Vlasov-Poisson方程式のシミュレーションも開発 ($N \rightarrow \infty$ 極限に対応)

Yoshikawa et al. ('13), Angulo & Hahn ('13), Sousbie & Colombi ('16)

注・ N 体シミュレーションでは扱えないダークマター候補もある (→Fuzzy DM, 後述)



重力進化のタイムスケール

Binney & Tremaine ('87, '08)
「Galactic Dynamics」

ρ : 質量密度

N : 粒子数

自由落下時間

$$t_{\text{ff}} \sim (G\rho)^{-1/2}$$

初期条件

力学平衡

(2体) 緩和時間

$$t_{\text{relax}} \sim (N/\ln N)t_{\text{ff}}$$

熱平衡
(実は不安定)

無衝突系

衝突系

大規模構造の自由落下時間は宇宙年齢に匹敵 ($t_{\text{ff}} \sim t_{\text{age}} = 138$ 億年) :

▶ 大規模構造は、基本的に**無衝突系**^注

注：ダークマターの性質にも依る（後述）

▶ 初期条件の痕跡を今でも残している（大規模構造の観測から宇宙論ができる理由）

→宇宙の構造形成は、本質的に非平衡過程

大スケールから小スケールまで

質量密度ゆらぎ： $\delta(x) \equiv \rho(x)/\bar{\rho} - 1$ の大小で大別

ほぼ一律に

大スケール	線形 ~ 弱非線形 $ \delta \ll 1$ $ \delta \sim \mathcal{O}(0.1)$	<ul style="list-style-type: none"> ゆらぎの振幅はスケールに依らず^{ほぼ一律に}冪的成長 圧力ゼロ流体として記述 (シングルストリーム近似) → 摂動計算による高精度の予言 (Bernardeau et al. '02 for review)
小スケール [†]	非線形 ~ 強非線形 $\delta \gtrsim 1$ $\delta \gg 1$	<ul style="list-style-type: none"> 高密度領域に質量降着、ハローの形成・合体 (マルチストリーム) 解析計算は球対称自己相似解などに限られる (e.g., Fillmore & Goldreich '84, Bertshinger '85, but see AT & Colombi '17)

[†]実際には、バリオンの効果 (銀河形成、AGNフィードバック) も効いてくる

ダークマターハロー

Springel et al. ('08)



$z=1.8$



Diemand, Kuhlen & Madau ('06)
($\sim 3 \times 10^6$ 光年)

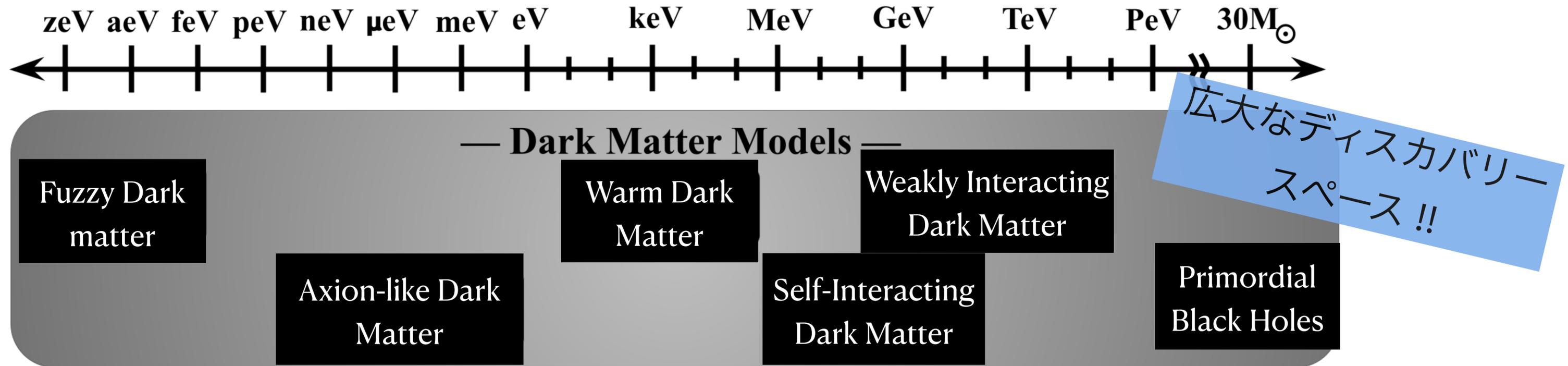
- ダークマターからなる自己重力束縛系
(力学的な準平衡状態)
- 広範な質量スケールに存在[†] : $10^{-8} \sim 10^{16} M_{\odot}$
(M_{\odot} : 太陽質量)
- 重いハローには、バリオンが落ち込み、
星・銀河を形成 → 天文観測のターゲット
(光学、重力レンズ、X線、サブミリ、...)

ダークマターの性質によって顕著な違いが現れうる

[†]下限はダークマターの質量などに依る

CDMの正体とハロー

コールドダークマター (CDM)の候補は何十桁の質量にわたって存在



arXiv:2209.08215

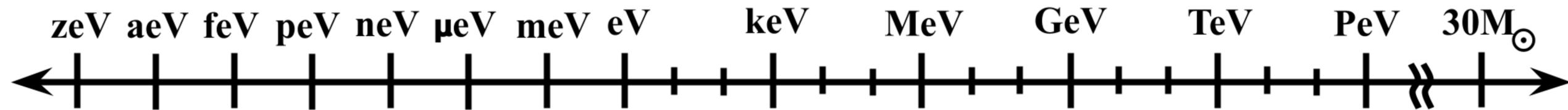
大スケールの構造形成は変えないが、

小スケールの構造 (ハロー) に影響 → 天文観測から候補を峻別できる可能性

(e.g., 小スケールのゆらぎにカットオフが入るなど)

CDMの正体とハロー

コールドダークマター (CDM)の候補は何十桁の質量にわたって存在



arXiv:2209.08215

— Dark Matter Models

Fuzzy Dark
matter

Axion-like Dark
Matter

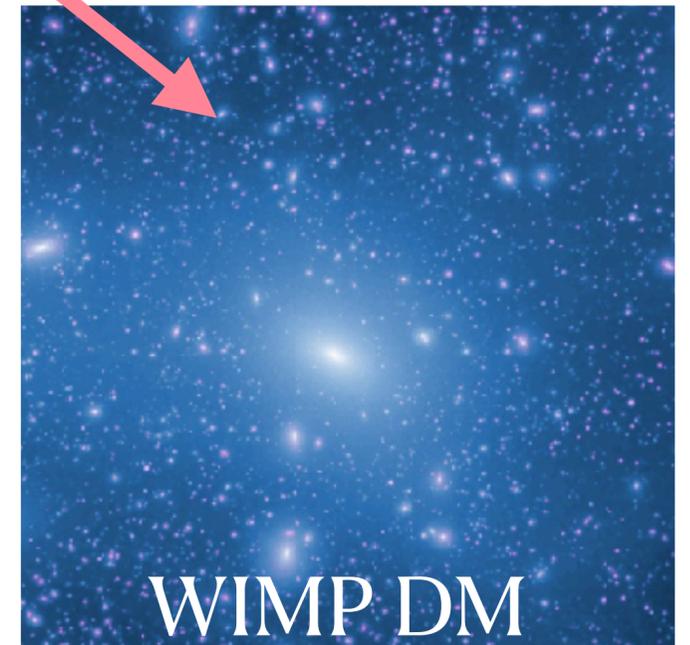
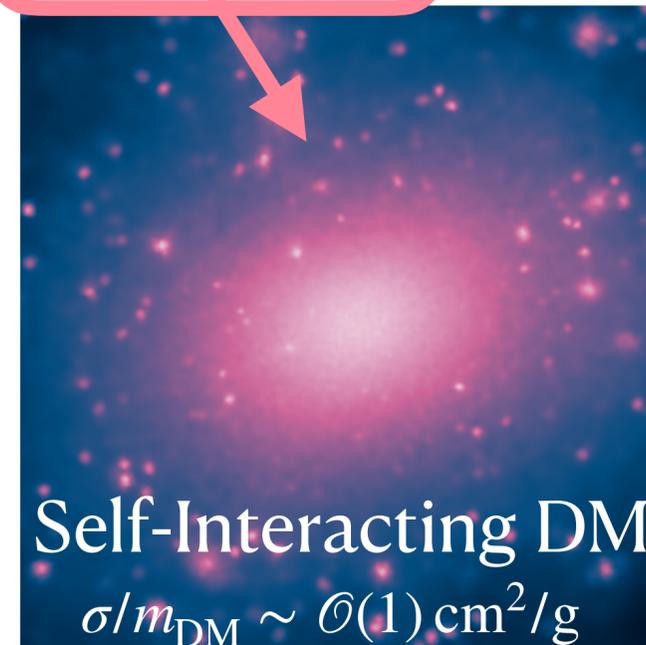
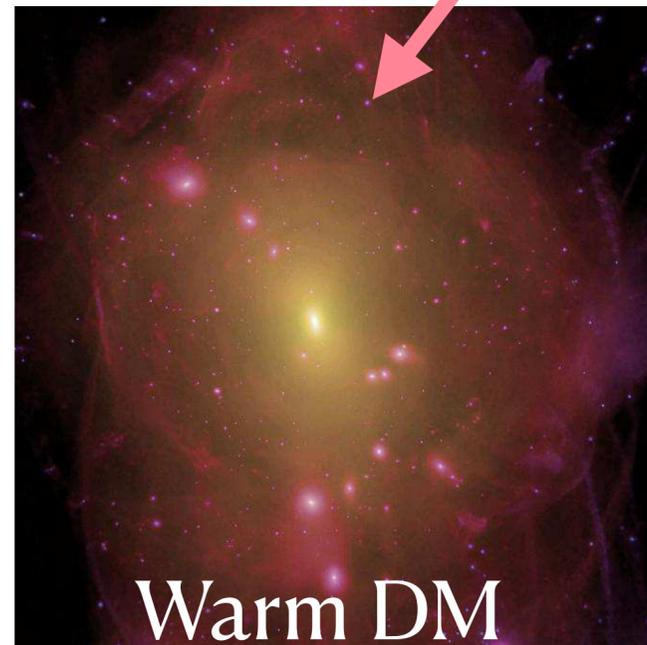
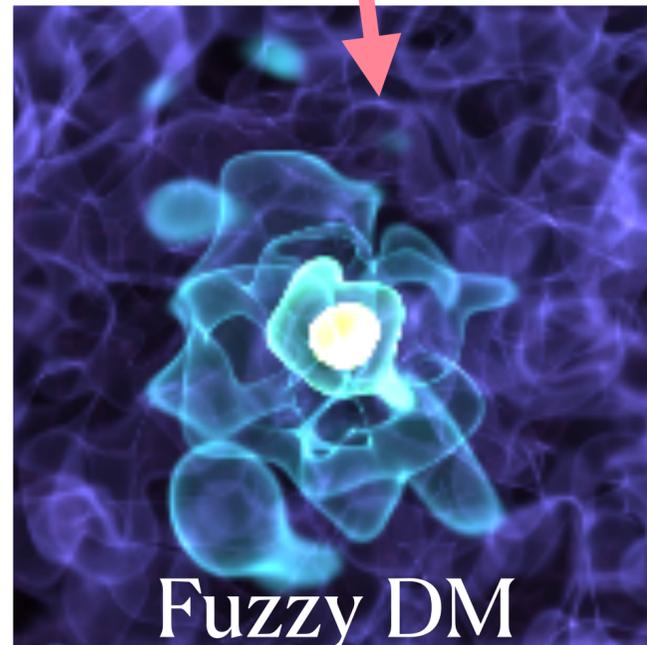
Warm Dark
Matter

Weakly Interacting
Dark Matter

Self-Interacting
Dark Matter

Primordial
Black Holes

<https://www.mpa.mpg.de/garching.mpg.de/galform/millennium-II/index.html#Images>
arxiv.org/abs/1104.2929
arxiv.org/abs/1705.00623
arxiv.org/abs/1705.05845

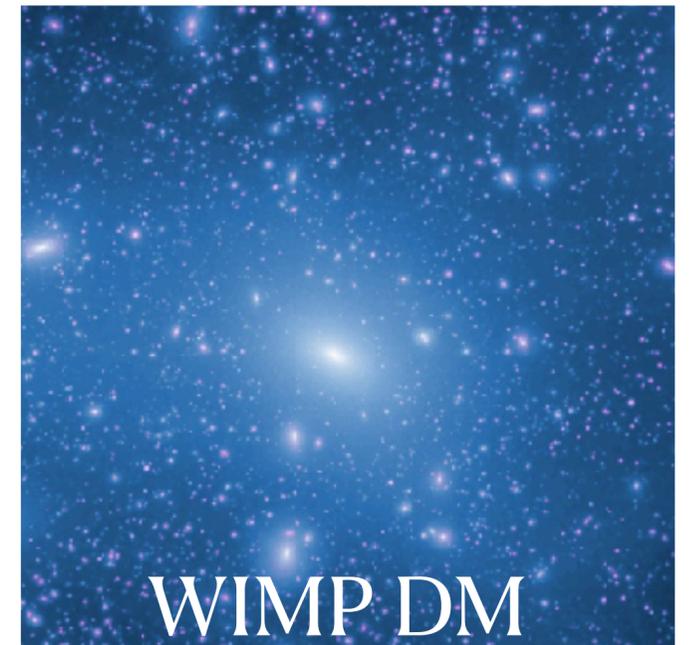
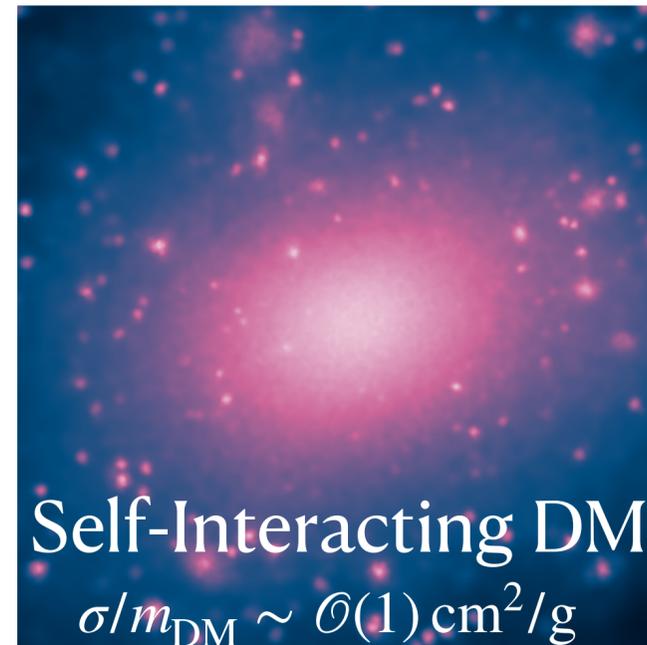
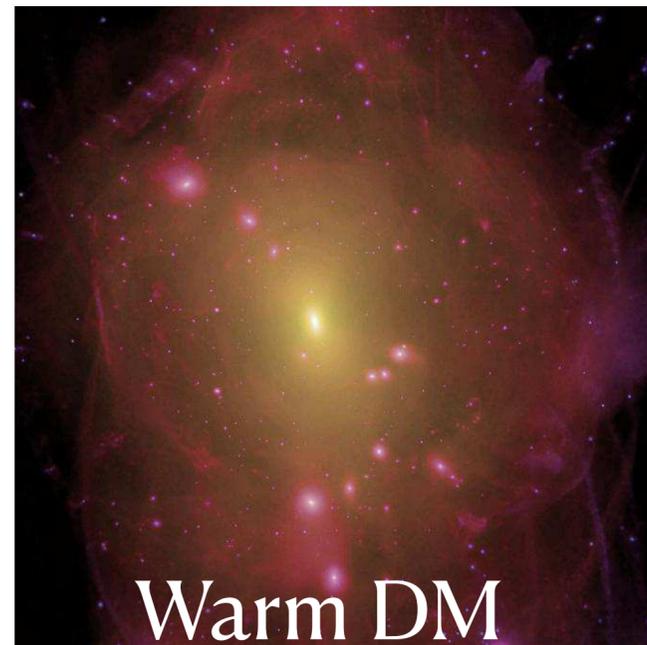
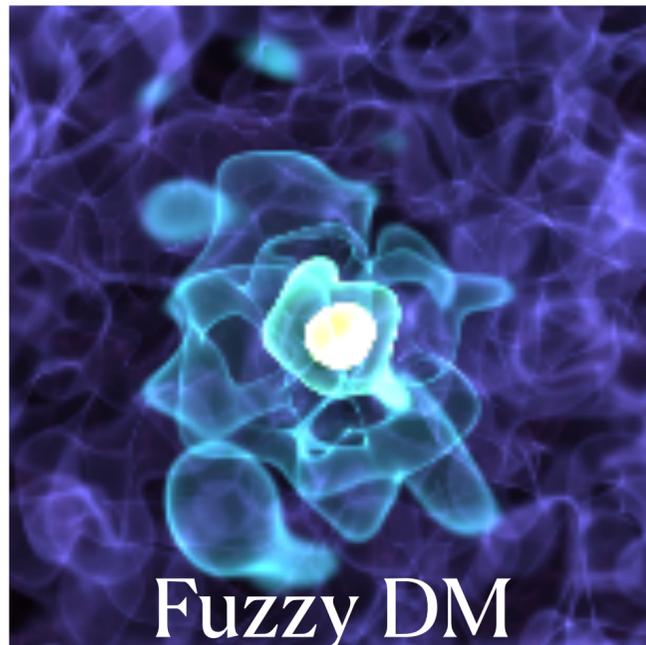


CDMの正体とハロー

それぞれの特徴

実はわかっていない点も多い

WIMP	中心の弱いカスプ構造 [†] とたくさんのサブストラクチャー ([†] $\rho(r) \propto r^{-1 \sim -1.5}$)
Self-interacting	中心は平坦なコア構造と多様性に富んだサブストラクチャー (cored or cuspy)
Warm	中心は弱いカスプ構造を持つ一方、サブストラクチャーは抑制
Fuzzy	ソリトンのような安定なコア構造と、波動性・干渉性による大きなゆらぎ



重力の非線形性が導く普遍性？

(1) WIMP DM：弱いカスプを持った冪的構造

- 全体の密度構造は NFW/Einasto プロファイルで記述

(Navarro, Frenk & White '96, '97, Einasto '65)

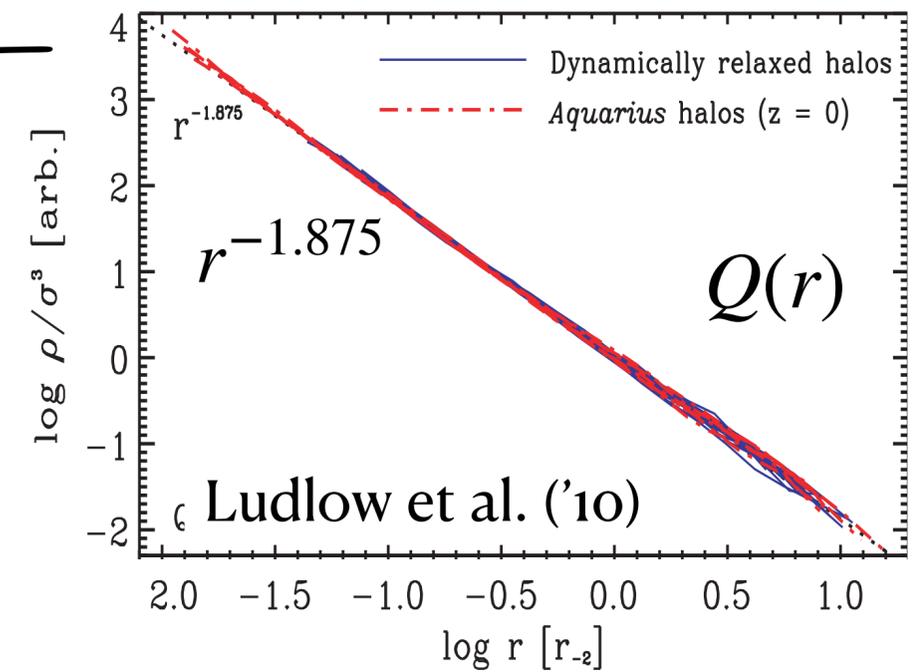
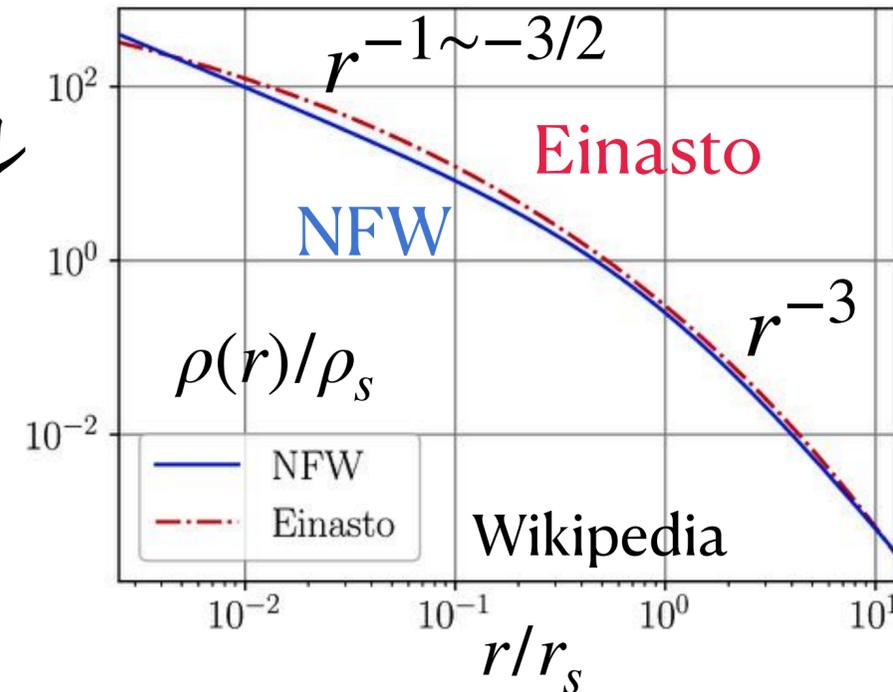
$$\left(\begin{array}{l} \text{原始ハローのプロンプトカスプ } \rho \propto r^{-3/2} \\ \text{(Ishiyama et al. '10; Delos \& White'22)} \end{array} \right)$$

- 擬位相空間密度プロファイル $Q(r)$ は、ハロー外縁まで単一べきで記述

(Taylor & Navarro '01)

速度分散

$$Q(r) \equiv \rho(r) / \{\sigma_v(r)\}^3 \propto r^{-1.875}$$



何か深淵なものが他にも隠されている？

位相空間に隠れた普遍構造

Enomoto, Nishimichi & AT ('23, '24)

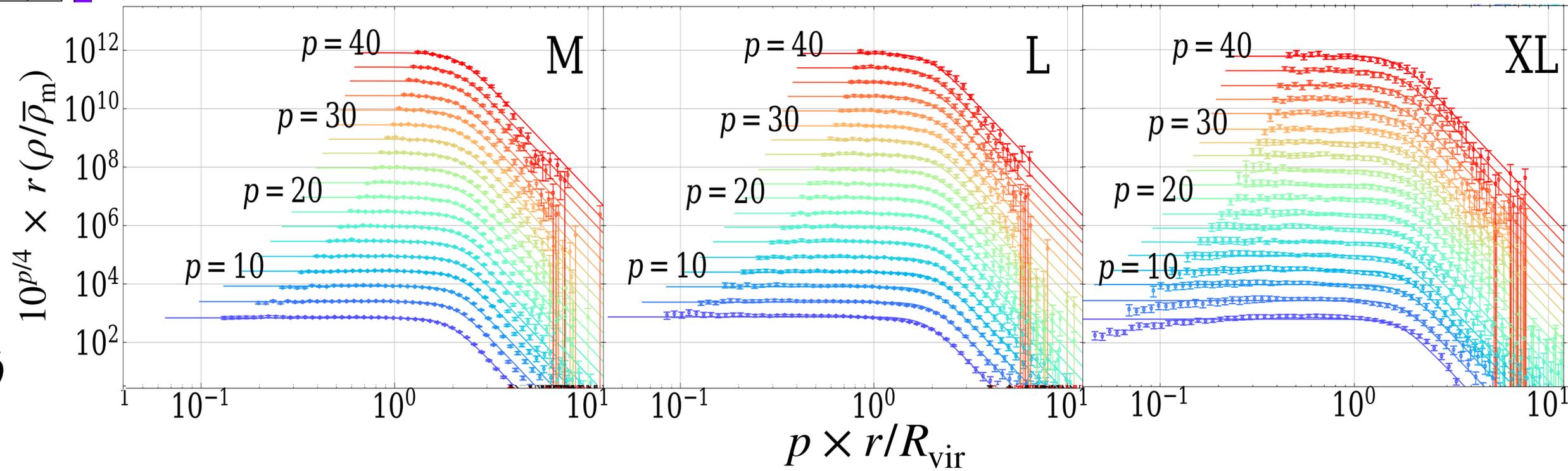
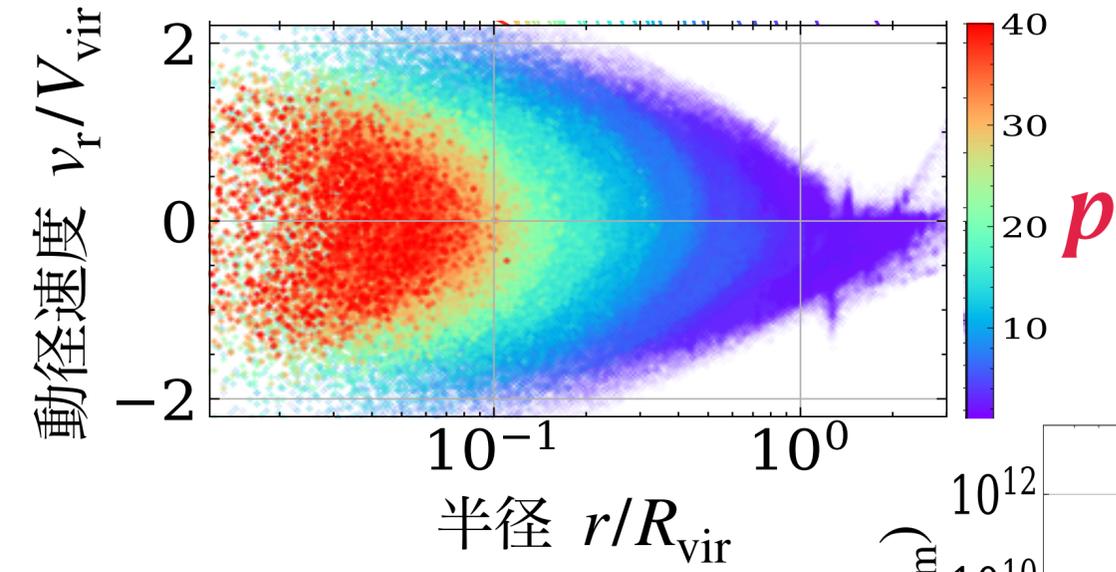
ハロー中のダークマターは中心周りを周回運動 → 周回数 p で粒子を分類

玉ねぎ構造をした位相空間

中心は r^{-1}

各 p の密度プロファイルは2重冪則に従う
(足し合わせるとNFW/Einastoプロファイルが再現)

銀河スケール ← 銀河群スケール → 銀河団スケール

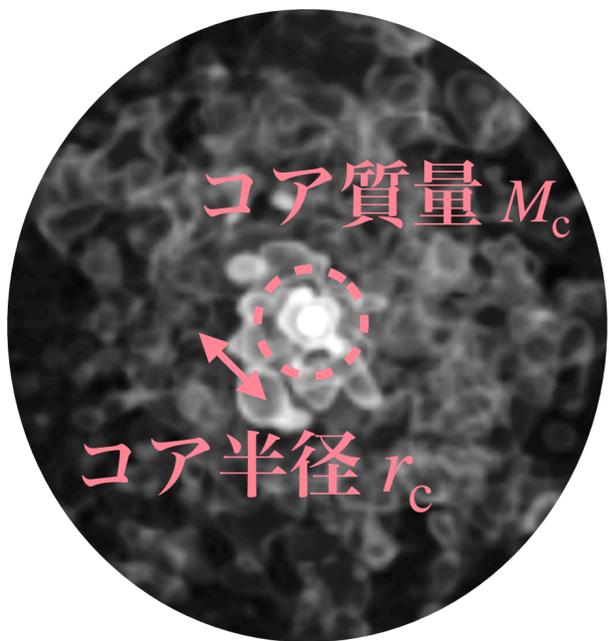


知られている自己相似解では説明できない

Warm DM でも現れそう
Enomoto et al. ('24, in prep)

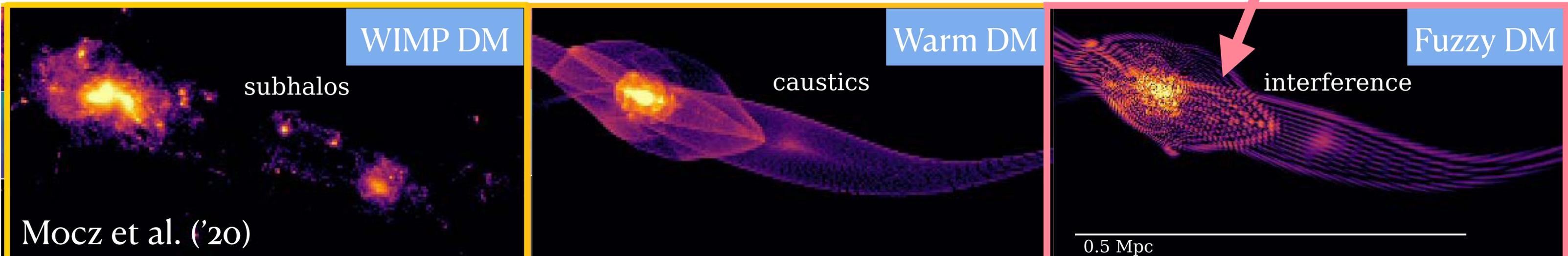
重力の非線形性が導く普遍性？

(2) Fuzzy DM：中心コア構造とハロー全体に成り立つ冪則

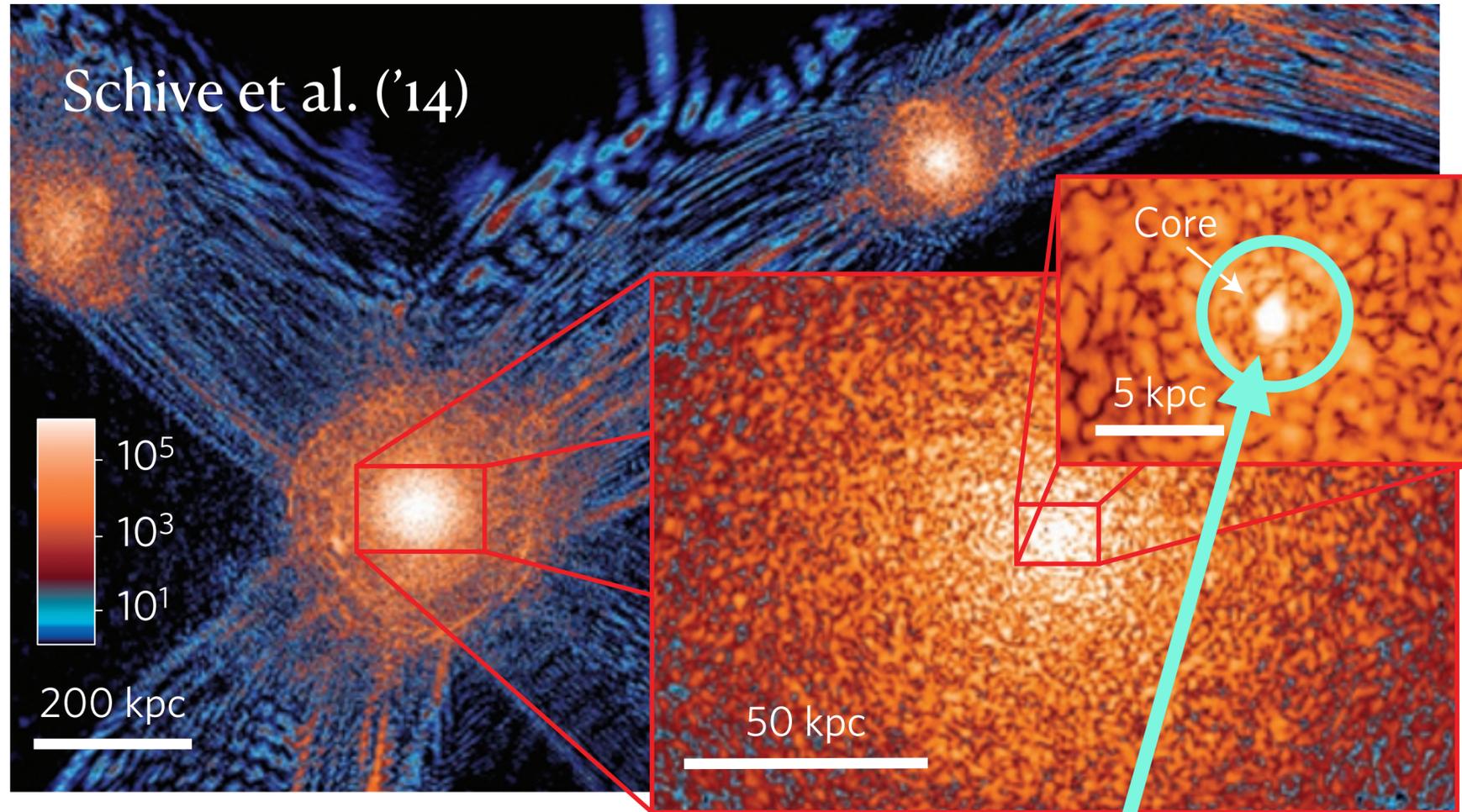


- とんでももなく軽いダークマターで現れる性質 ($m_{\text{DM}} \sim 10^{-22} \text{ eV}$)
ド・ブロイ波長が天文学スケール ($\lambda_{\text{dB}} \sim 0.5 \text{ kpc}^\dagger$) $^\dagger 1 \text{ kpc} = 3,000 \text{ 光年}$
- Schrödinger-Poisson 方程式にもとづくシミュレーションで発見
(波動性と干渉効果の帰結？)

ハロー質量 M_h



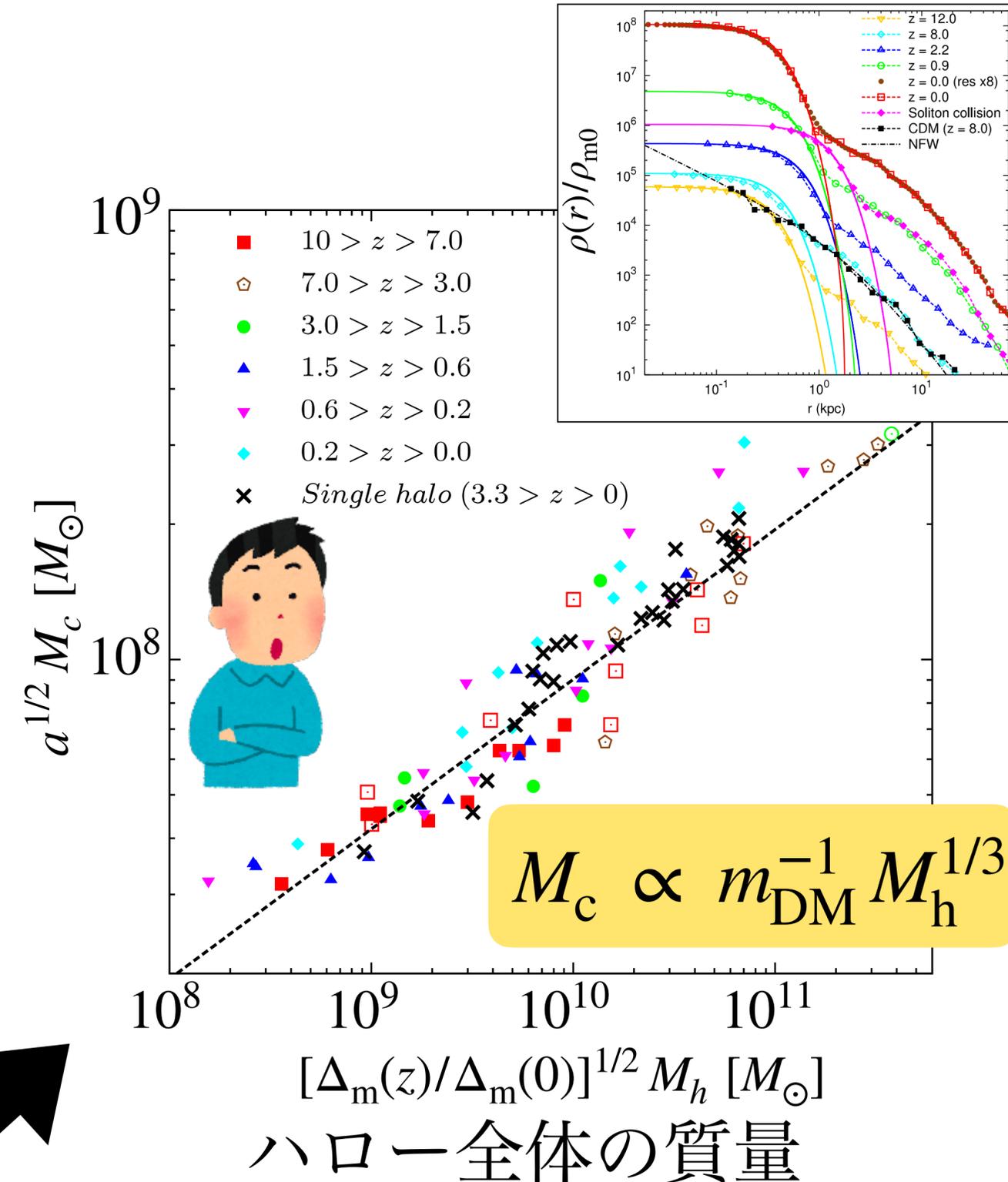
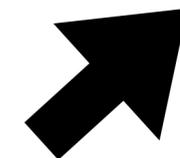
ソリトンコア・ハロー関係



ハローの中心に高密度コアが形成
=“ソリトン”コア

単一べきの関係が普遍的に現れるとの示唆

ソリトンコアの質量



ソリトンコア・ハロー関係

最近ではこの普遍性に**疑問符**が...



数値シミュレーション： べき指数が違う、多様性がある、etc.

Schwabe et al. '16, Du et al. '17, Mocz et al. '17, Nori & Baldi '21, Mina et al. '22, Chan et al. '22,

解析モデル： 単一べきで表されない、ハロー合体・進化史に依存

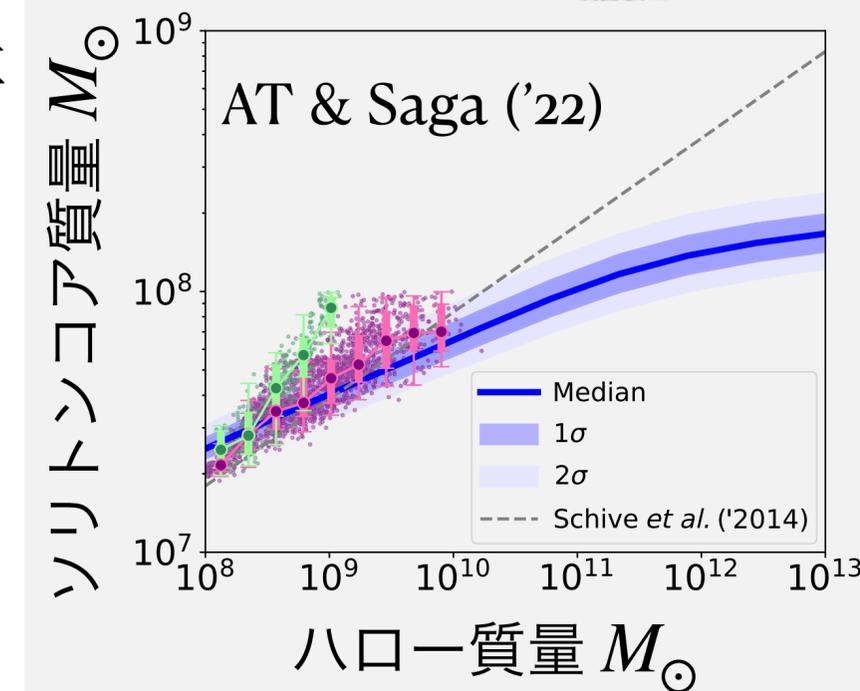
AT & Saga '22, Kawai et al. '23

とはいえ、

近傍宇宙の矮小銀河

ダークマター質量の観測的制限に应用されている

(e.g., Schive et al. '14, Safarzadeh & Spergel '20; Hayashi & Obata '20; Khelashvili et al. '23; ...)



高解像度シミュレーションと合わせて理論的な考察が必要

まとめ

極限非平衡現象としてみたダークマター優勢宇宙の構造形成

宇宙の大規模構造：ダークマターの重力が支配する巨大な**無衝突自己重力多体系**

- ▶ 宇宙年齢 \ll 緩和時間 \rightarrow 宇宙の構造形成は本質的に非平衡系
- ▶ 非線形領域（小スケール）で形成される **ダークマターハロー**
 (=自己重力で束縛された準平衡系)
- ▶ ダークマターの性質とハローの構造に見られる普遍性 **未解明**
 (2例：WIMP DMのカस्प構造とFuzzy DMのコア・ハロー関係)

非平衡現象の解明は天文観測によるダークマター探索や宇宙論の検証にとって重要
 ダークマター以外の影響（バリオンの効果）も含めた非平衡進化過程の理解へ