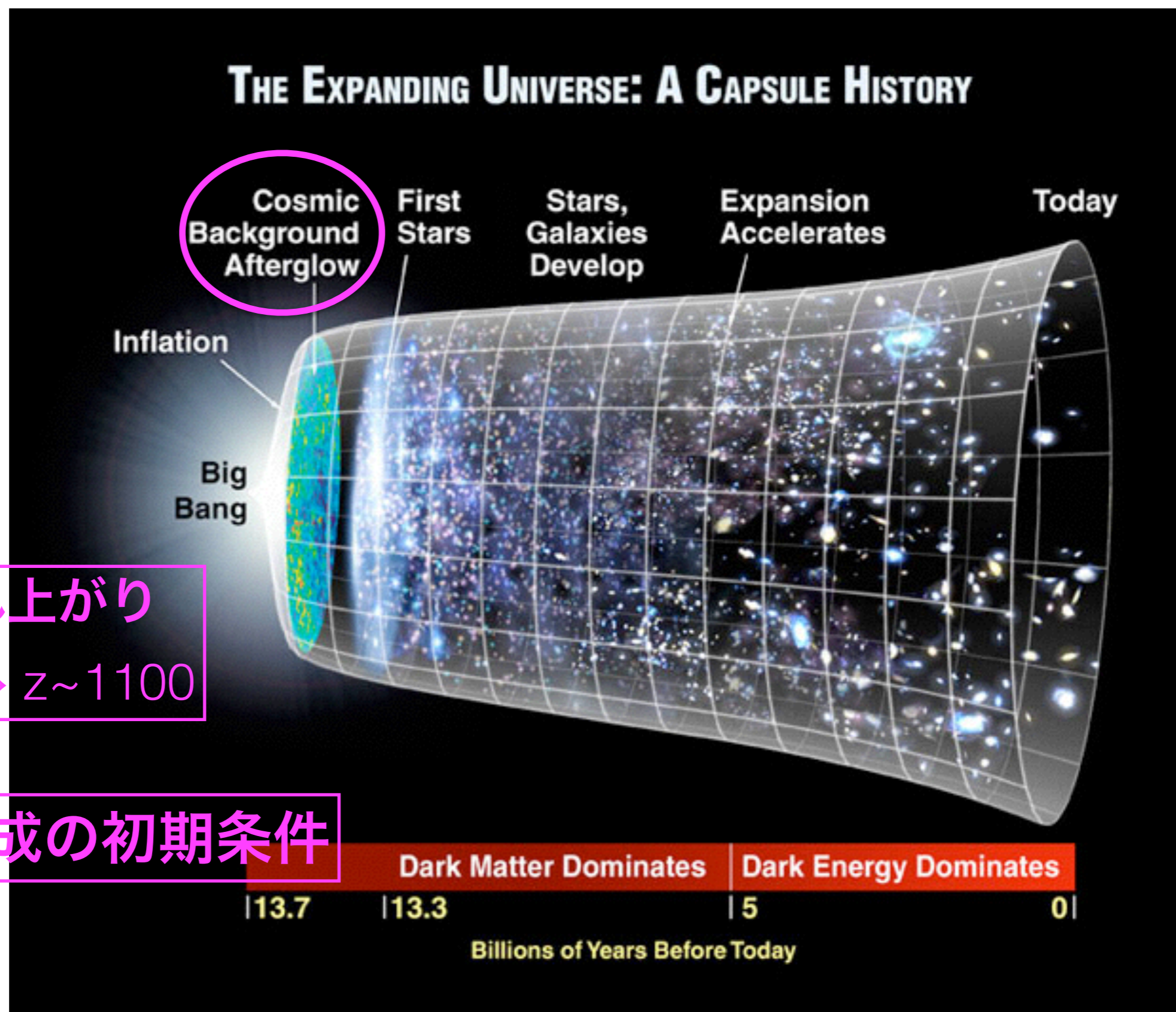


暗黒物質と構造形成(3/29)

冷たい暗黒物質の構造形成: 線形及び非線形重力成長

宇宙の暗黒時代



宇宙の晴れ上がり

$3.8 \times 10^5 \text{ yr} \leftrightarrow z \sim 1100$

構造形成の初期条件

Dark Matter Dominates

Dark Energy Dominates

13.7

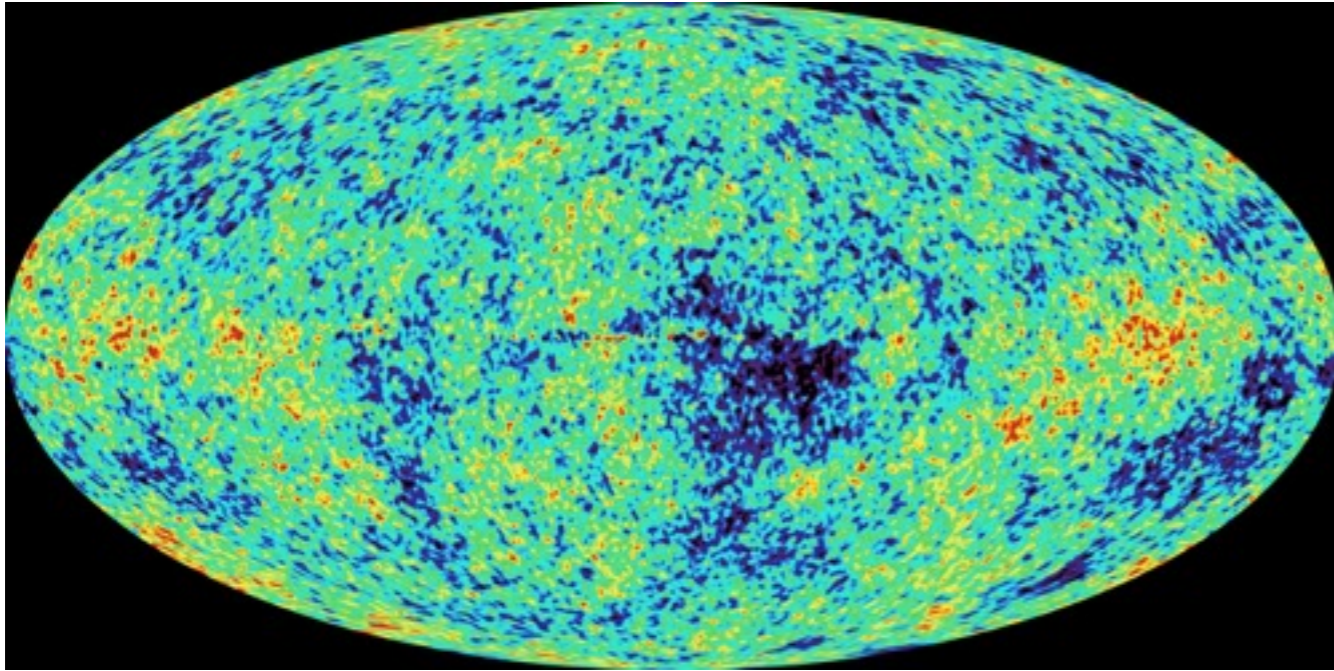
13.3

5

0

Billions of Years Before Today

(初期) ザックス・ウォルフ効果



宇宙マイクロ波背景放射

(Cosmic Microwave Background, CMB):

一様当方宇宙

+揺らぎ ($\sim 10^{-5}$)

温度が低い場所

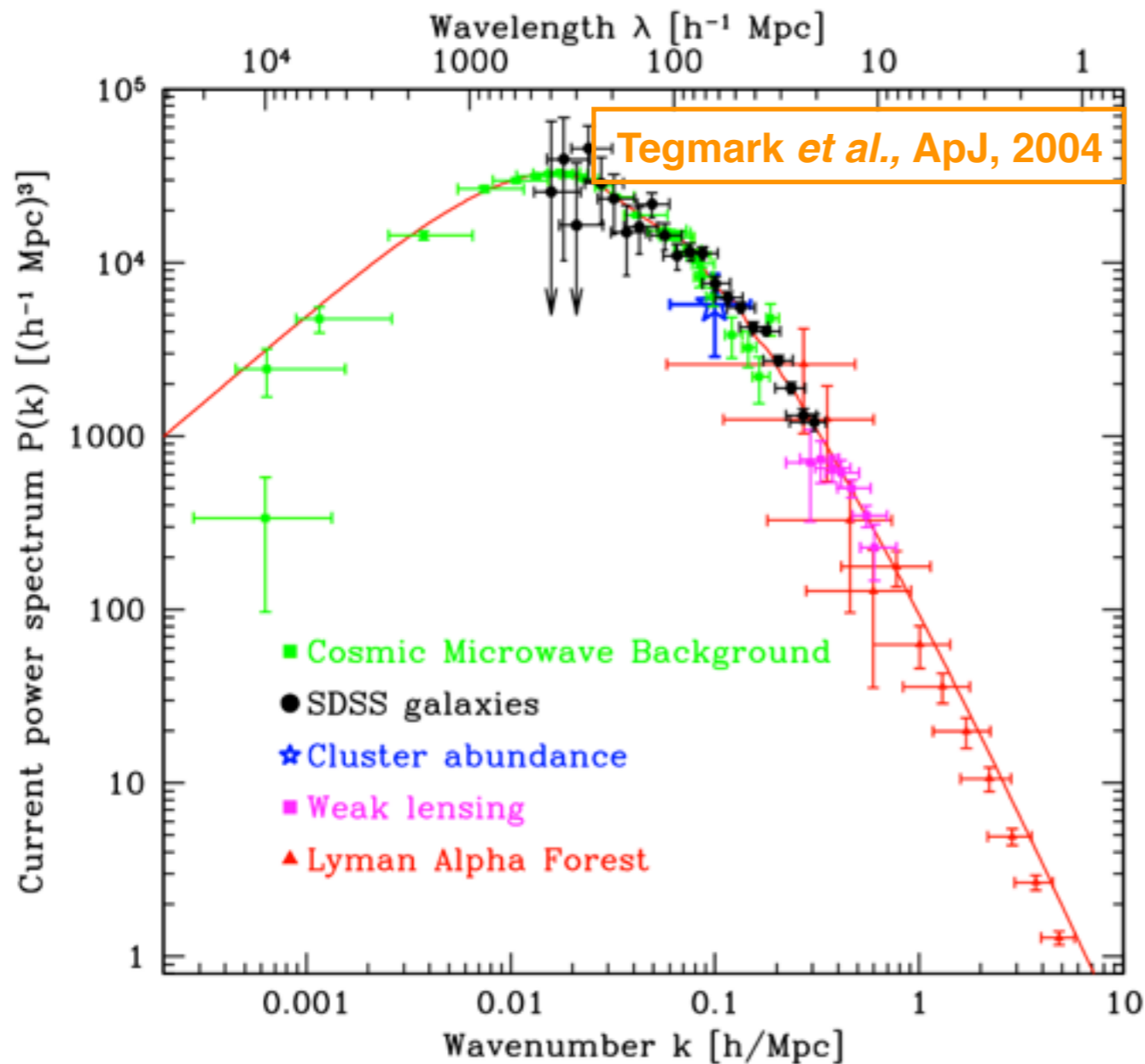
エネルギーを失う

↔ 温度低い



物質の密度が高い場所

物質密度揺らぎ (線形理論)



密度揺らぎ

$$\delta(\mathbf{x}) \equiv \frac{\delta\rho}{\rho}(\mathbf{x}) = \int \frac{d\mathbf{k}^3}{(2\pi)^3} \delta(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k}\mathbf{x}}$$

$$\langle \delta(\mathbf{k}) \delta^*(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{k} - \mathbf{k}') P(\mathbf{k})$$

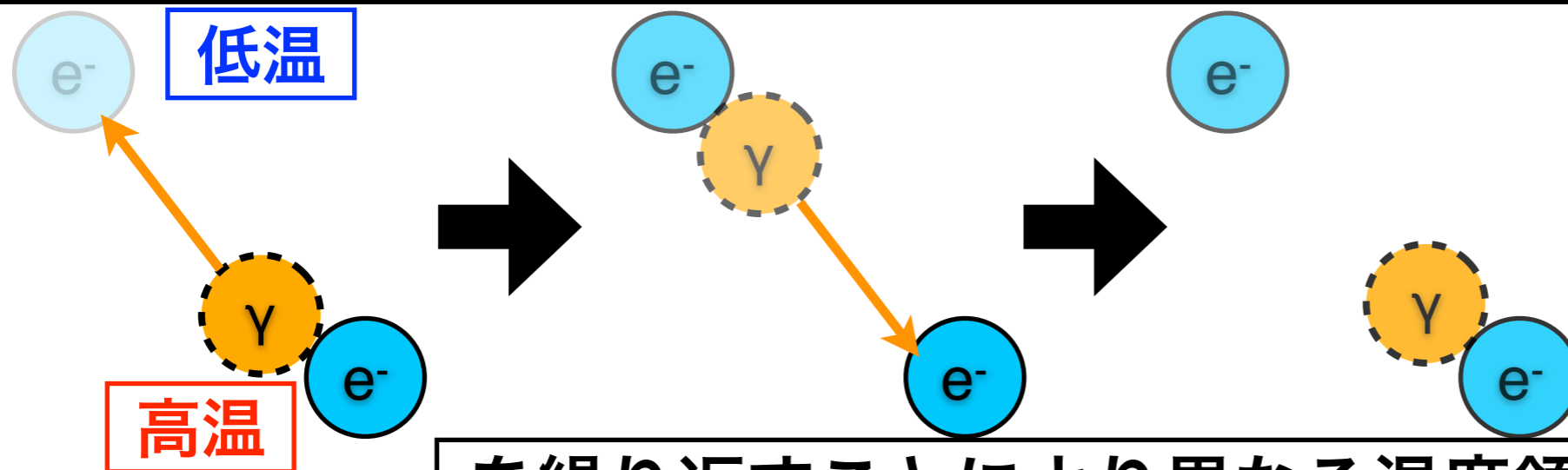
CMBの非当方性により 100 Mpc-10 Gpc (観測可能な宇宙)
の物質分布が (間接的に) 測られている

CMBの非当方性の限界: シルク減衰

光子 γ とバリオン e^- p^+ はトムソン散乱を通じて一緒に運動している

→ 光子の温度・密度が高い場所 ↔ バリオンの温度・密度が高い場所

→ トムソン散乱による光子の平均自由行程 $\lambda_{fs} \sim \frac{1}{\sigma_T n_e}$ は有限

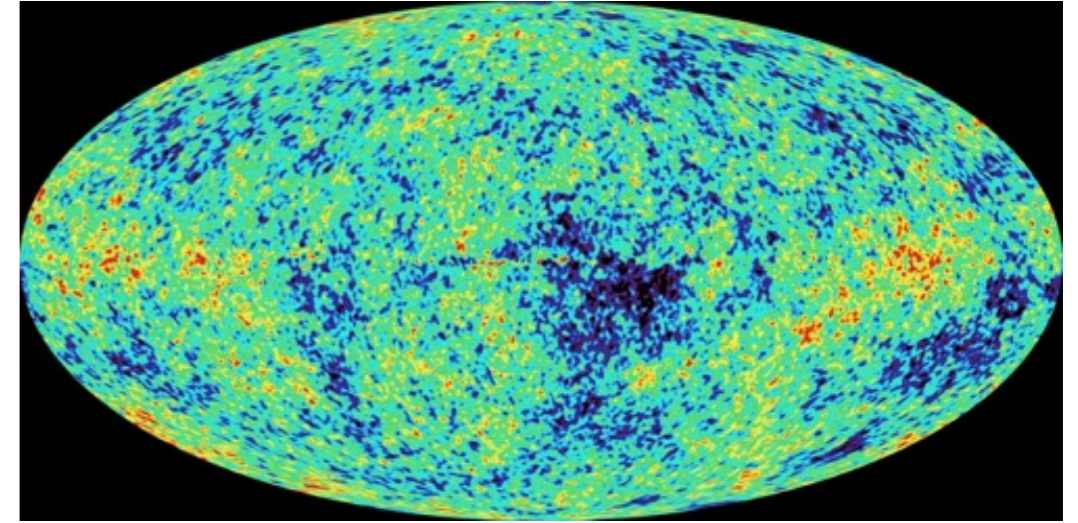
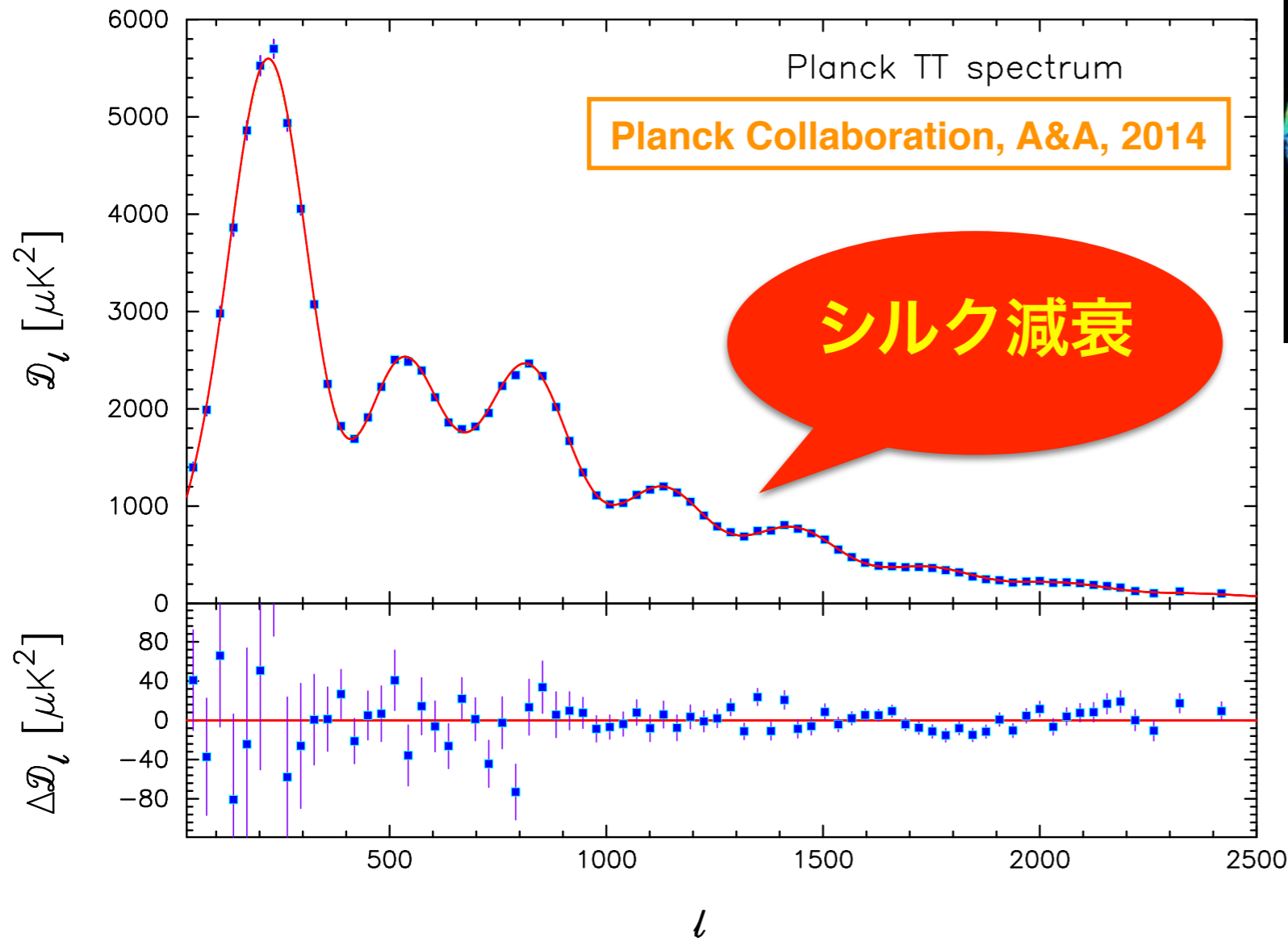


を繰り返すことにより異なる温度領域が熱化される
→ 揺らぎがならされてしまう

拡散長-平均自由行程: ランダムウォーク

$$\lambda_{\text{diff}} \sim \lambda_{\text{fs}} \sqrt{\#\text{scat}} \quad \#\text{scat} \sim \frac{ct}{\lambda_{\text{fs}}}$$

Λ CDM模型の成功



Parameter	Planck	
	Best fit	68% limits
$\Omega_b h^2$	0.022068	0.02207 ± 0.00033
$\Omega_c h^2$	0.12029	0.1196 ± 0.0031
$100\theta_{\text{MC}}$	1.04122	1.04132 ± 0.00068
τ	0.0925	0.097 ± 0.038
n_s	0.9624	0.9616 ± 0.0094
$\ln(10^{10} A_s)$	3.098	3.103 ± 0.072

シルク減衰のスケールよりも大スケールのCMB観測($\ell < 2500$)は暗黒エネルギー+冷たい暗黒物質を仮定する模型 (Λ CDM模型)の6つのパラメーターでよく説明される

CMBが強力な理由

観測

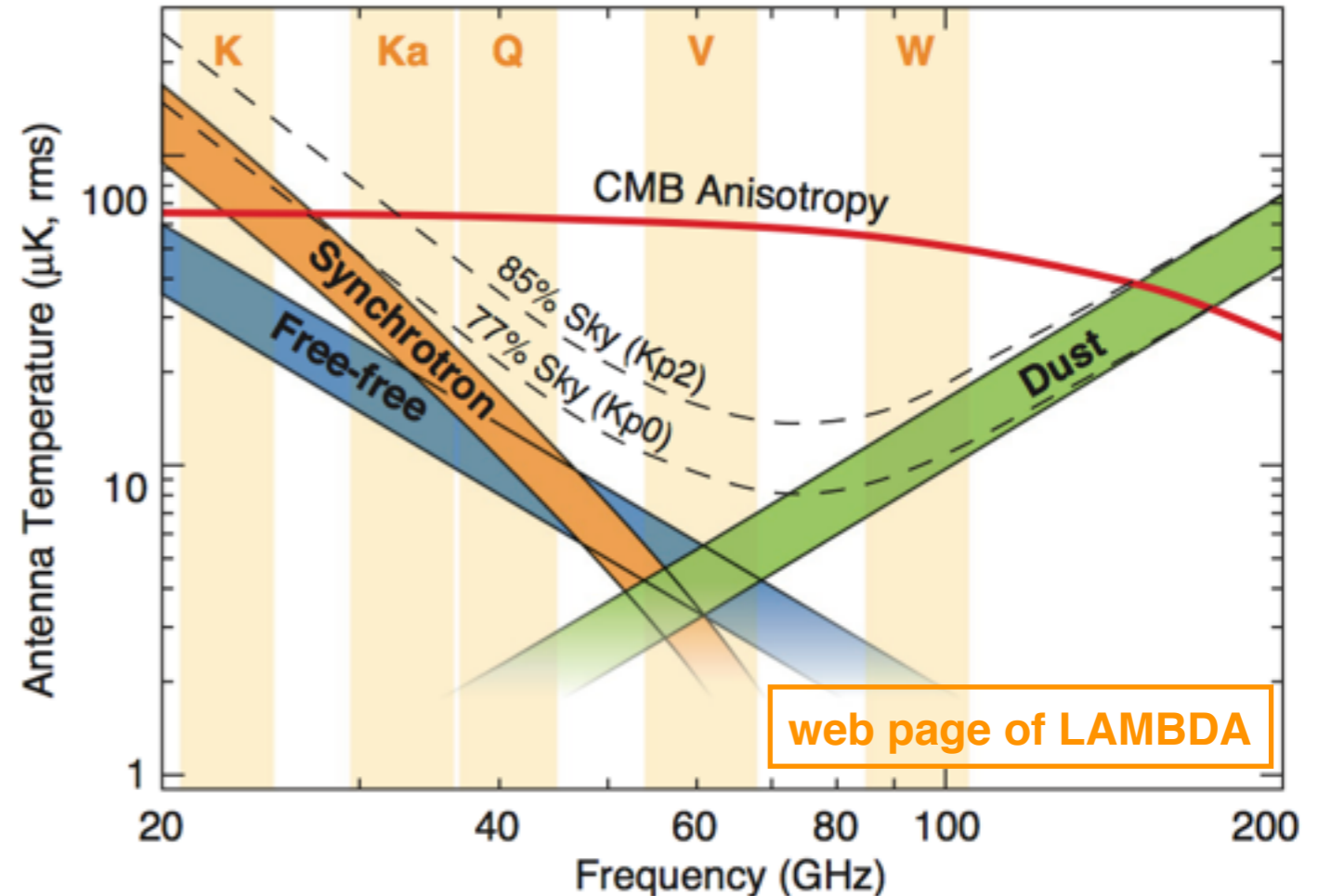
直接検出 - 前景放射 (天体物理起源) の影響が小さい

理論

第一原理計算 - 一般相対性理論の摂動論
(ゲージ自由度には注意が必要)

← CMBは宇宙の晴れ上がり ($z \sim 1100$) の時の揺らぎ ($\sim 10^{-5}$)

↔ 銀河や銀河団はその揺らぎが成長したもの (~ 100 , 非線形)



密度揺らぎの成長 (簡易版)

仮定

- 光速よりも遅い物質の運動を考える → ニュートン重力
- 物質は完全流体で近似でき, 圧力は無視できる

変数

- 流体の(質量)密度場 ρ_M
- 流体の速度場 \vec{V}
- 重力場 ϕ

時空間

- 時間 t
 - ユークリッド空間 \vec{X}
- $$\dot{\vec{\nabla}} = \frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial \vec{X}}$$

方程式

- 質量保存の式 $\dot{\rho}_M + \vec{\nabla} \cdot (\rho_M \vec{V}) = 0$
- 運動方程式 $\dot{\vec{V}} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\vec{\nabla} \phi$
- ポアソン方程式 $\Delta \phi = 4\pi G \rho_M$

定数

- ニュートン重力定数 G

密度揺らぎの成長 (簡易版')

ハッブルの法則 (0次近似)

物質が遠ざかる速さは (0次近似で) その距離に比例する $\vec{V} = H(t)\vec{X}$

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \quad \vec{X} \equiv a(t)\vec{x} \quad \rightarrow \quad \vec{V} = \dot{\vec{X}} \quad (\text{宇宙の膨張})$$

スケールファクター - 赤方偏移

$$\frac{a(t_{\text{now}})}{a(t)} \equiv 1 + z$$

時空間

- 時間 t $\cdot = \frac{\partial}{\partial t}$
- ユークリッド空間 \vec{x} $\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial \vec{x}}$

方程式

- 質量保存の式 $\dot{\rho}_M - H(\vec{x} \cdot \vec{\nabla})\rho_M + \frac{1}{a}\vec{\nabla} \cdot (\rho_M \vec{V}) = 0$

- 運動方程式 $\dot{\vec{V}} - H(\vec{x} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} + \frac{1}{a}(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{a}\vec{\nabla}\phi$

- ポアソン方程式 $\frac{1}{a^2}\Delta\phi = 4\pi G\rho_M$

密度揺らぎの成長 (一様当方解)

一様当方宇宙 (0次近似)

物質は (0次近似で) 一様当方に分布している $\bar{\rho}_M(t)$

→ 質量保存の式 → 物質は宇宙膨張と共に薄まる $\bar{\rho}_M(t) \propto \frac{1}{a^3}$

→ ポアソン方程式 →
$$\bar{\phi} = \frac{2\pi G}{3} \bar{\rho}_M \bar{X}^2$$

定数
(総エネルギー)

→ 運動方程式 →
$$\frac{1}{2} \dot{a}^2 - \frac{4\pi G}{3} \bar{\rho}_M a^2 = E$$

運動エネルギー

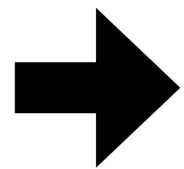
ポテンシャルエネルギー

密度揺らぎの成長 (宇宙の曲率)

総エネルギー - 宇宙の曲率

$$E \equiv -\frac{1}{2}K$$

aには定数倍の不定性がある $\rightarrow K = \begin{cases} -1 & \text{開いた宇宙} \\ 0 & \text{平坦な宇宙} \\ 1 & \text{閉じた宇宙} \end{cases}$



フリードマン方程式:
$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \bar{\rho}$$

宇宙論パラメター

$$\Omega \equiv \frac{8\pi G \bar{\rho}_0}{3H_0^2} \quad (\Omega_M, \Omega_{\text{rad}}, \Omega_\Lambda) \quad \Omega_K \equiv -\frac{K}{a_0^2 H_0^2}$$

現在の値

\leftrightarrow 観測的に宇宙は極めて平坦 $|\Omega_K| \ll 1$ であることが知られている

密度揺らぎの成長 (揺らぎ)

一様当方宇宙の揺らぎ (1次近似)

- 流体の(質量)密度場 $\rho = \bar{\rho}_M(1 + \delta)$
- 流体の速度場 $\vec{V} = \vec{V} + \vec{V}_1$
- 重力場 $\phi = \bar{\phi} + \phi_1$

線形方程式

- 質量保存の式 $\dot{\delta} + \frac{1}{a} \vec{\nabla} \cdot \vec{V}_1 = 0$
- 運動方程式 $\dot{\vec{V}}_1 + H\vec{V}_1 = -\frac{1}{a} \vec{\nabla} \cdot \phi_1$
- ポアソン方程式 $\frac{1}{a^2} \Delta \phi_1 = 4\pi G \rho_{M0} \delta$

ベクトル成分は減衰

ヘルムホルツの定理

速度場はベクトル場 \rightarrow
 スカラー成分 ($\vec{\nabla} \times \vec{V} = 0$)
 と渦成分 (ベクトル成分,
 $\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$) に分解される
 $\vec{V} (\propto \vec{\nabla} X^2)$ はスカラー成分

密度場及び重力場と共進化するのはスカラー成分

ベクトル成分

$$\dot{\vec{V}}_1 + H\vec{V}_1 = 0$$

$$\rightarrow \vec{V}_1 \propto \frac{1}{a}$$

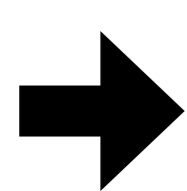
密度揺らぎの成長 (進化方程式)

密度揺らぎの進化方程式

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} - 4\pi G\rho_{M0}\delta = 0$$

暗黒エネルギーと暗黒物質からなる宇宙

$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}(\bar{\rho}_M + \rho_\Lambda) \quad \bar{\rho}_M \propto \frac{1}{a^3} \quad \rho_\Lambda = \text{const.}$$



$$\delta = D(a)\delta_0 \quad D(a) = \frac{5\Omega_M H_0^2}{2} H(a) \int_0^a \frac{da'}{(a' H(a'))^3}$$

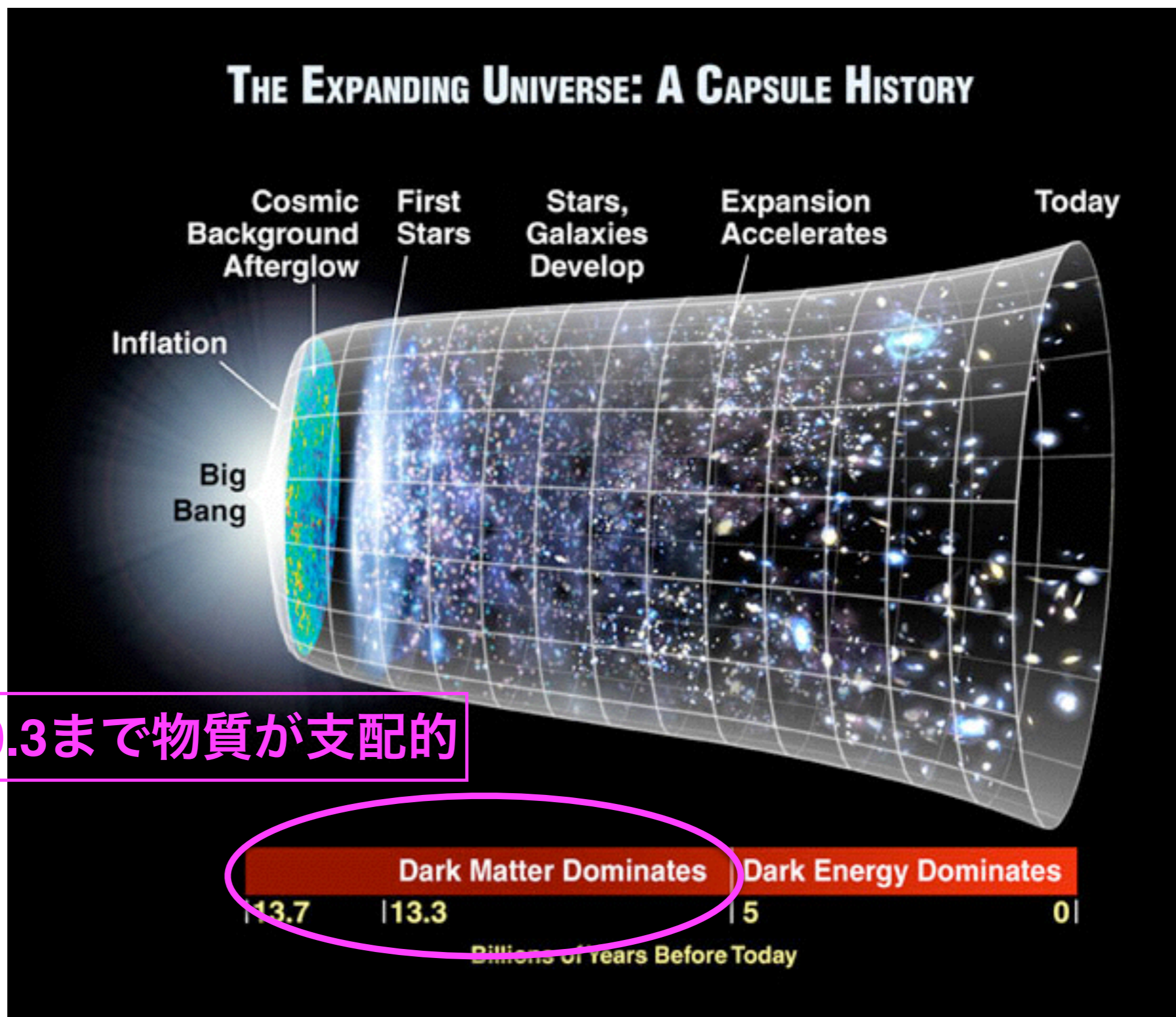
線形成長因子

物質が支配的 $\rightarrow D(a) \propto a$

暗黒エネルギー/曲率が支配的 $\rightarrow D(a) = \text{const.}$

宇宙膨張が
速すぎて
揺らぎが
成長できない

宇宙の暗黒時代 (再掲)



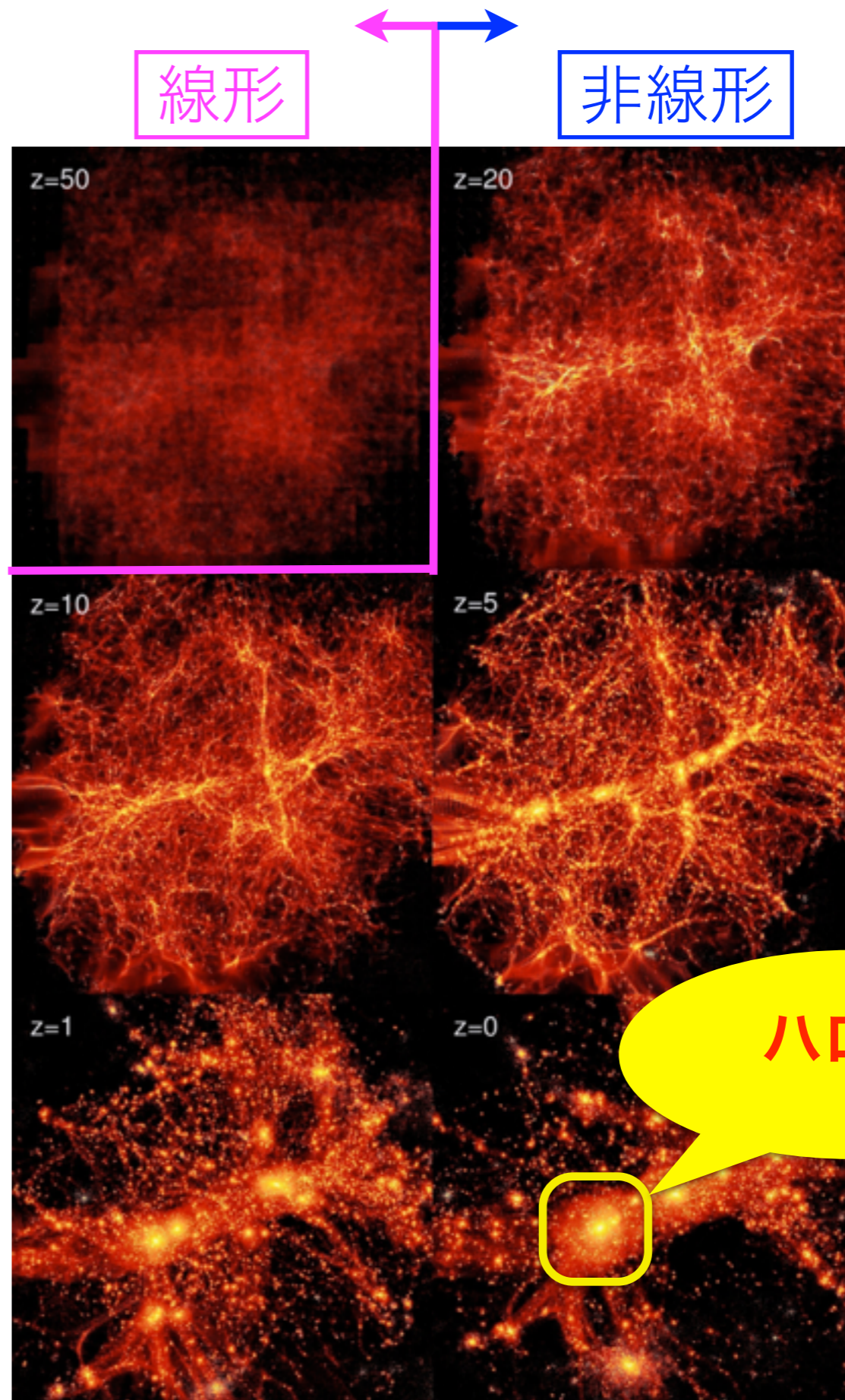
宇宙は $z \sim 0.3$ まで物質が支配的

密度揺らぎの非線形成長

物質優勢期には密度揺らぎはスケールファクターに比例して大きくなる $\delta \propto a$



密度揺らぎが十分大きくなる ($\delta > 1$) と非線形成長を始め、銀河や銀河団のハローを形成する



非線形成長 (球対称崩壊)

球対称崩壊

物質密度が背景宇宙 (平坦な宇宙, $K = 0$) よりも高い領域を**閉じた宇宙 ($K = 1$)**だと考える

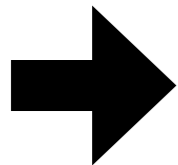
$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \bar{\rho}_M \quad \bar{\rho}_M = \bar{\rho}_{M0} \left(\frac{a_0}{a} \right)^3$$

平坦な宇宙 ($K = 0$)

$$a_{K=0} = \left(\frac{9}{2} A t^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad \bar{\rho}_{M,K=0} = \frac{1}{6\pi G t^2}$$

定数

$$A = \frac{4\pi G}{3} \bar{\rho}_{M0} a_0^3$$



閉じた宇宙 ($K = 1$)

$$a_{K=1} = A(1 - \cos \theta) \quad t = A(\theta - \sin \theta)$$

$$\bar{\rho}_{M,K=1} = \frac{3}{4\pi G t^2} \frac{(\theta - \sin \theta)^2}{(1 - \cos \theta)^3}$$

転回点と崩壊点

$$t_{\text{turn}} (\theta = \pi)$$

$$t_{\text{coll}} (\theta = 2\pi)$$

$$t_{\text{coll}} = 2t_{\text{turn}}$$

非線形成長 (球対称崩壊)

密度揺らぎ

$$\delta = \frac{\bar{\rho}_{M,K=1}}{\bar{\rho}_{M,K=0}} - 1 = \frac{9 (\theta - \sin \theta)^2}{2 (1 - \cos \theta)^3} \rightarrow \frac{3}{20} \theta^2 (t \rightarrow 0)$$

$\delta \propto a_{K=1} (= a_{K=0})$ を再現する

ビリアル化 - ハロー形成

球対称崩壊が起きた瞬間にビリアル化すると考える $t_{\text{coll}} = 2t_{\text{turn}}$
 $\bar{\rho}_{M,K=0}(t_{\text{vir}}) = \bar{\rho}_{M,K=0}(t_{\text{coll}}) = \frac{1}{4} \bar{\rho}_{M,K=0}(t_{\text{turn}}) \bar{\rho}_{M,K=0} \propto \frac{1}{t^2}$

エネルギー保存

$$T_{K=1}(t_{\text{vir}}) + V_{K=1}(t_{\text{vir}}) = T_{K=1}(t_{\text{turn}}) + V_{K=1}(t_{\text{turn}}) = E_{K=1}$$

$$T_{K=1} = \frac{1}{2} \dot{a}_{K=1}^2 \quad V_{K=1} = -\frac{4\pi G}{3} \bar{\rho}_{M,K=1} a_{K=1}^2$$

$$2T_{K=1}(t_{\text{vir}}) + V_{K=1}(t_{\text{vir}}) = 0 \quad T_{K=1}(t_{\text{turn}}) = 0$$

非線形成長 (球対称崩壊”)

エネルギー保存’

$$V_{K=1}(t_{\text{vir}}) = 2V_{K=1}(t_{\text{turn}}) \quad V_{K=1} \propto \frac{1}{a_{K=1}}$$

$$a_{K=1}(t_{\text{vir}}) = \frac{1}{2}a_{K=1}(t_{\text{turn}}) \quad \bar{\rho}_{M,K=1} \propto \frac{1}{a_{K=1}^3}$$

$$\bar{\rho}_{M,K=1}(t_{\text{vir}}) = 8\bar{\rho}_{M,K=1}(t_{\text{turn}})$$

ビリアル化したハローは宇宙の平均密度に比べて

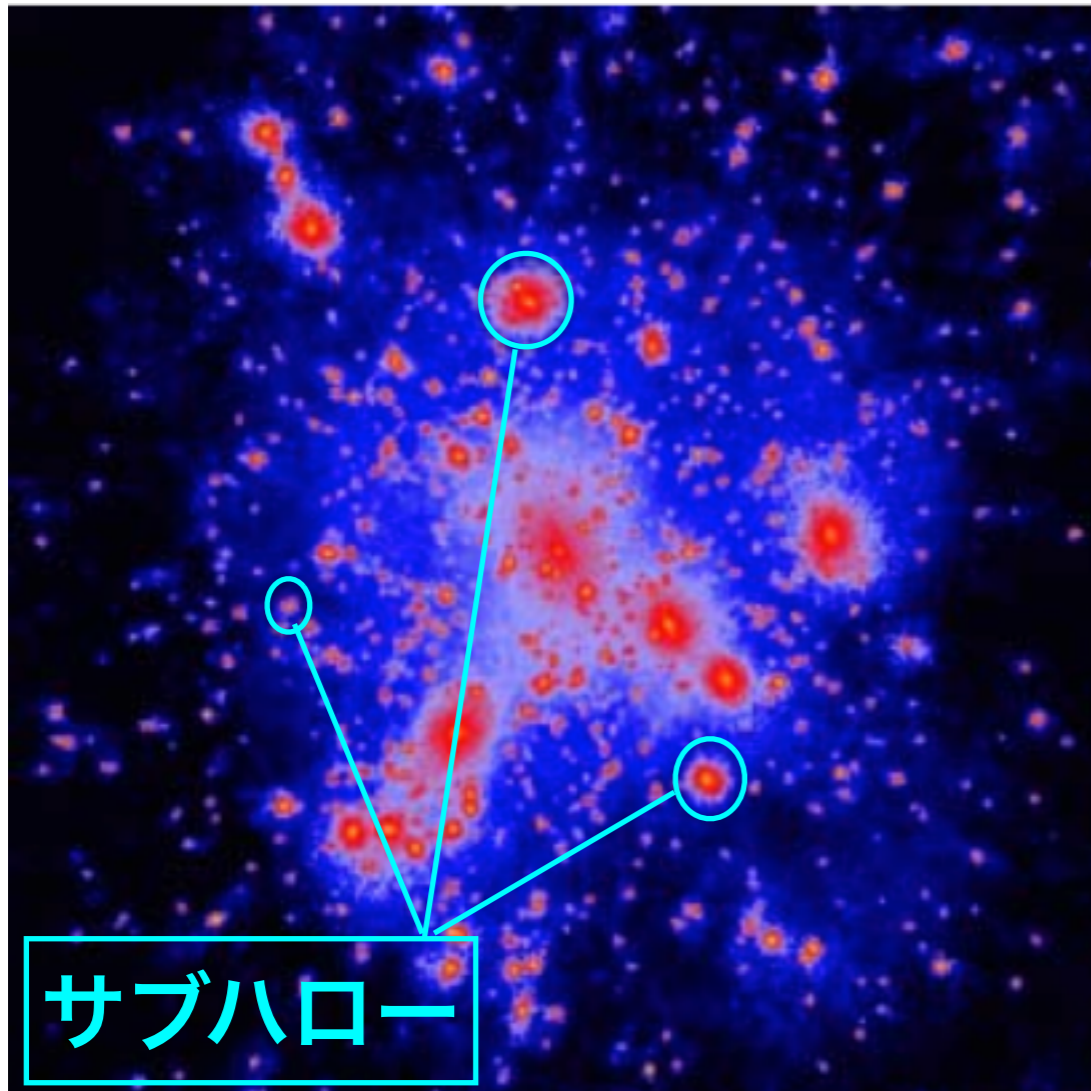
$$\frac{\bar{\rho}_{M,K=1}(t_{\text{vir}})}{\bar{\rho}_{M,K=0}(t_{\text{vir}})} = 32 \frac{\bar{\rho}_{M,K=1}(t_{\text{turn}})}{\bar{\rho}_{M,K=0}(t_{\text{turn}})} = 18\pi^2 \simeq 178$$

倍密度が高い

ここではある高密度領域を一様当方化して (スムージングして) 閉じた時空と考えたが, 実際には高密度領域の中にも高・低密度領域がある **階層的な構造** をしている

ハローとその階層性

N 体計算したハロー

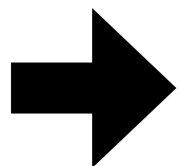


観測された銀河団

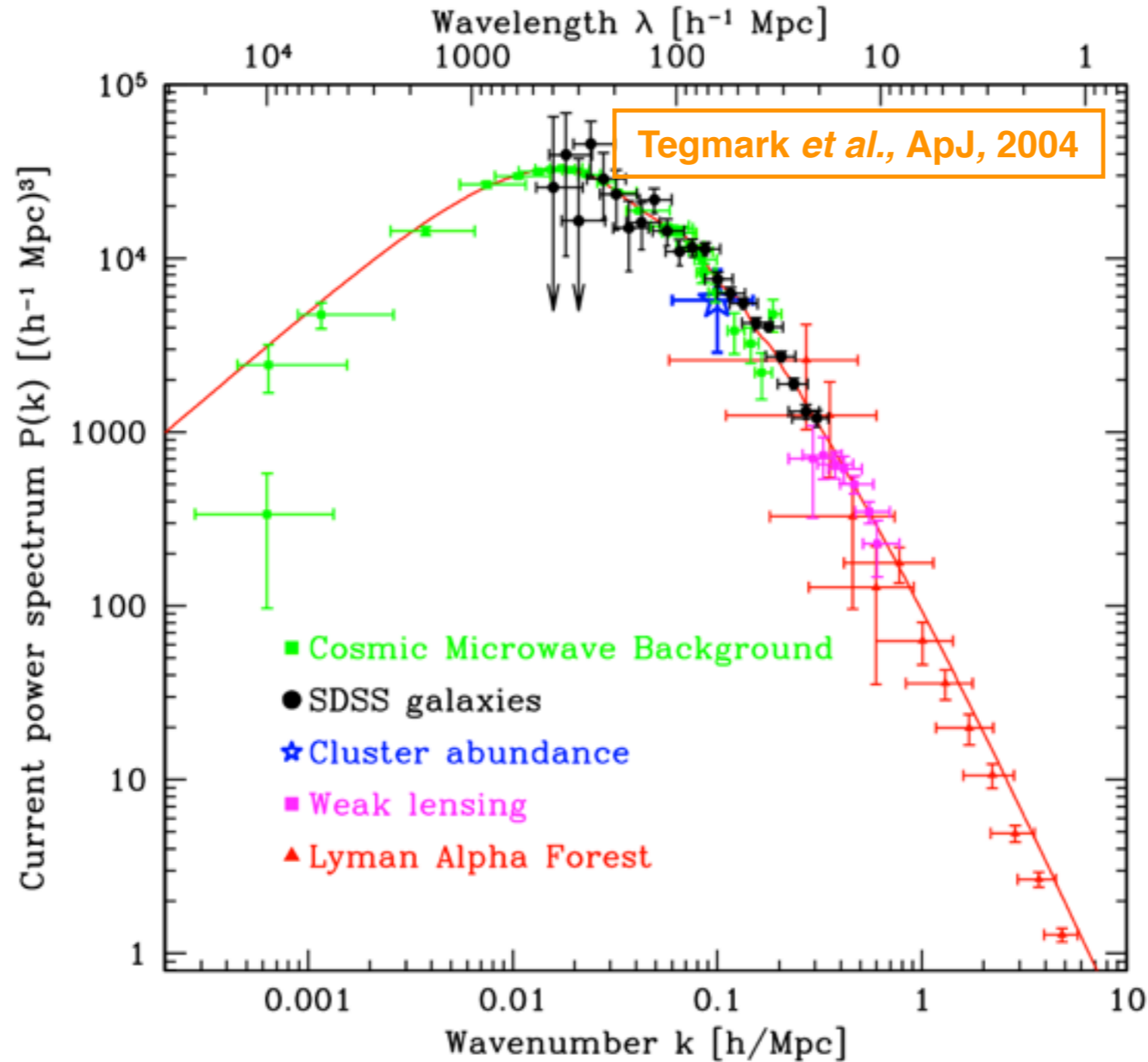


銀河団に見られる階層構造は Λ CDM模型の予言 (N 体計算) とよく一致する

銀河団や銀河 (宇宙大規模構造) の観測から Λ CDM模型を検証できる



物質密度揺らぎ (線形理論, 再掲)



宇宙大規模構造の観測 (銀河の分布・銀河団の数密度・弱重力レンズ効果・ライマン α の森) により Λ CDM模型 (パラメーターはCMBで決定) の成功が再確認されている

宇宙大規模構造を用いた Λ CDM模型の検証の難しさ

観測

間接検出 - 基本的に光源 (バリオン) のみ観測可能

→ 構造形成 (非線形成長) 後には (冷却・加熱プロセスを持つ)

バリオンの分布は暗黒物質の分布と異なる

→ 十分に明るい光源を持たないハローを検出するのは困難

理論

- 非線形成長 - 低赤方偏移では揺らぎが成長して摂動論では扱えない → 時間・計算機資源的にコストの高い大規模 N 体計算と解析的なアプローチによる裏付けが必要

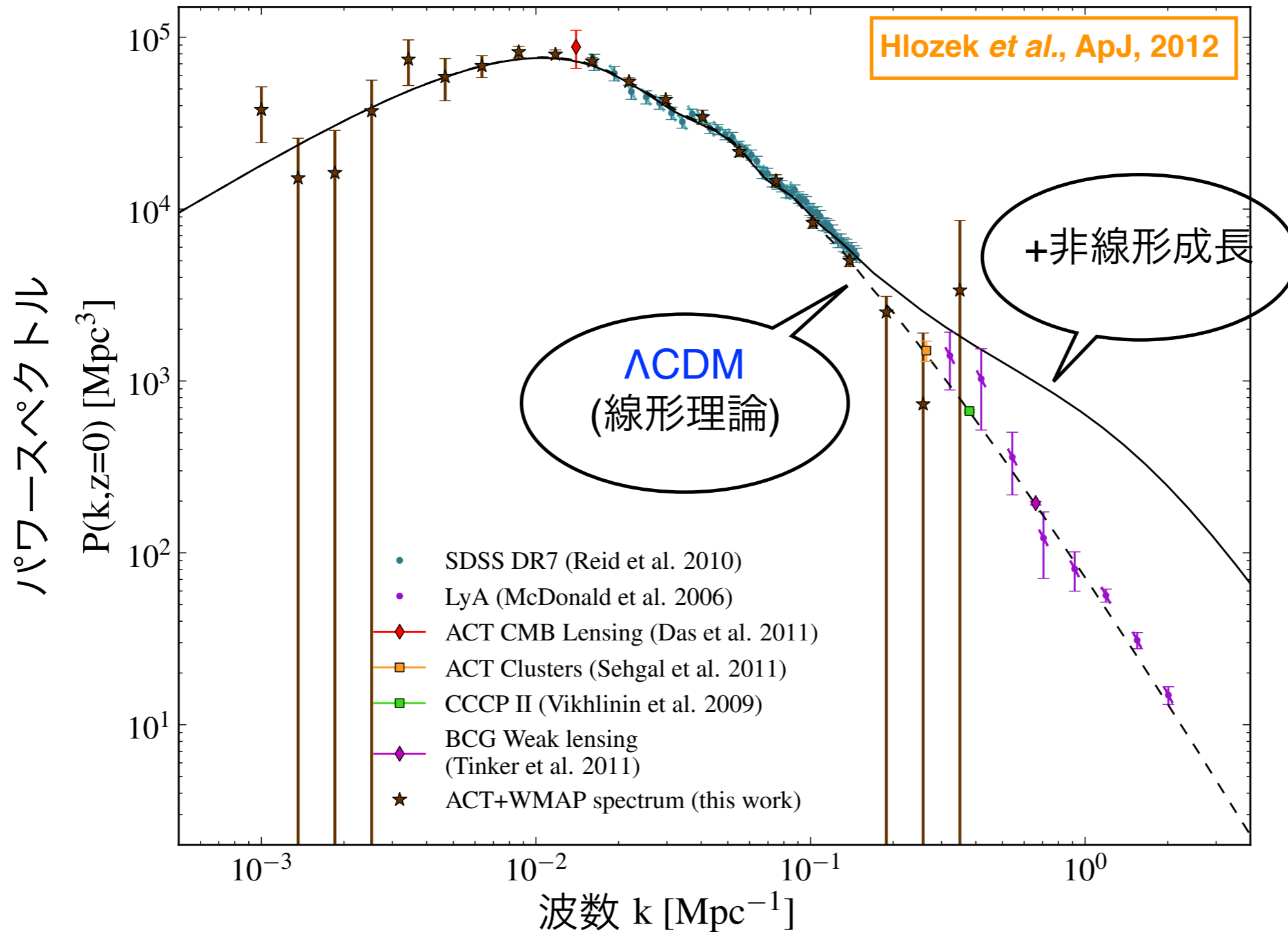
- 超新星爆発・銀河形成と暗黒物質ハローの共進化

→ バリオンプロセスをモデル化した上で**最高技術水準 (state-of-art) の流体シミュレーション**が必要

暗黒物質と構造形成(3/29)

冷たい暗黒物質の構造形成の抱える諸問題: 銀河スケール

暗黒エネルギー + 冷たい暗黒物質 (Λ CDM)

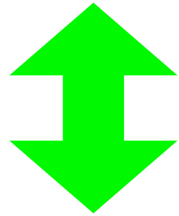


Λ CDM模型は宇宙大規模構造 ($k < 1/\text{Mpc}$) をよく説明する

冷たい暗黒物質？

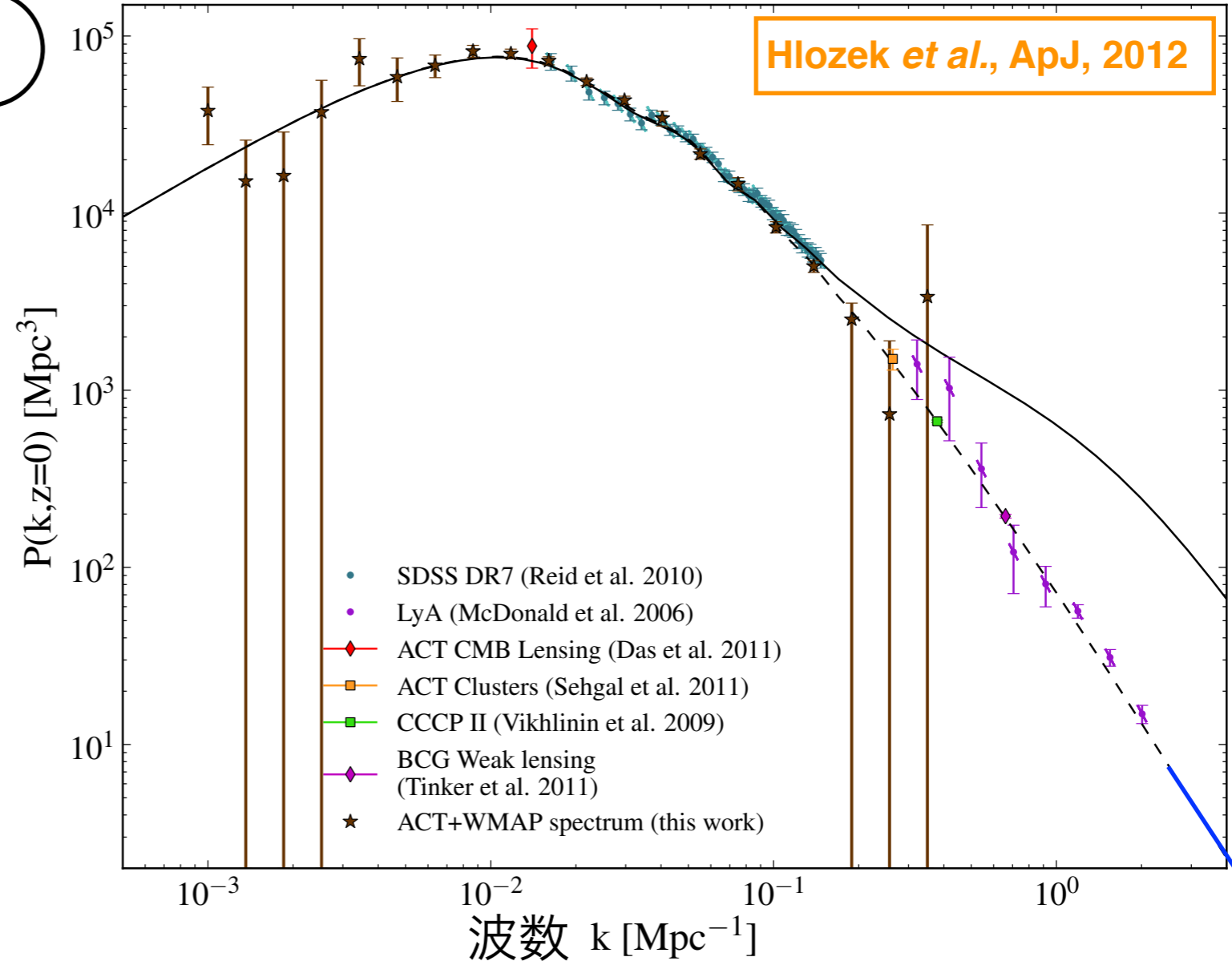
仮想粒子

冷たい暗黒物質:
熱速度なし
重力相互作用のみ



素粒子物理学における
候補粒子:
熱速度あり
重力以外の相互作用あり

パワースペクトル



小スケールの物質密度揺らぎの**ΛCDMからのズレ**に
暗黒物質の素粒子的性質の情報が入っている

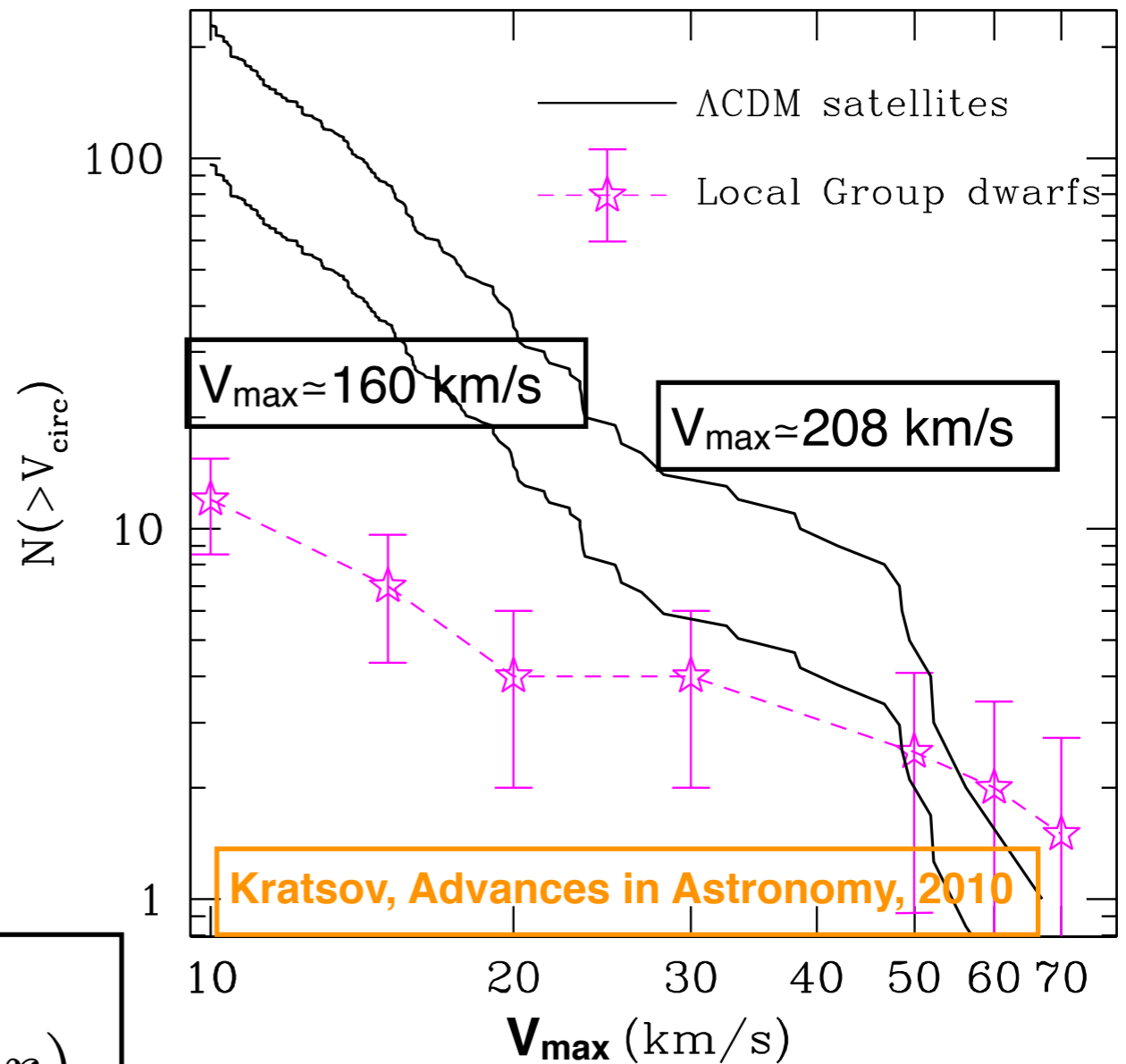
小スケール問題 (I)

実際に冷たい暗黒物質による構造形成は**銀河スケール**で種々の問題 (**小スケール問題**) を抱えていることが知られている

矮小銀河問題

Λ CDMモデルを用いた N 体計算 (暗黒物質のみ) \rightarrow 天の川銀河サイズのハローに含まれるサブハローの数が観測されている矮小楕円体銀河の数よりも**10倍**程度多い

サブハローの累積個数



回転速度

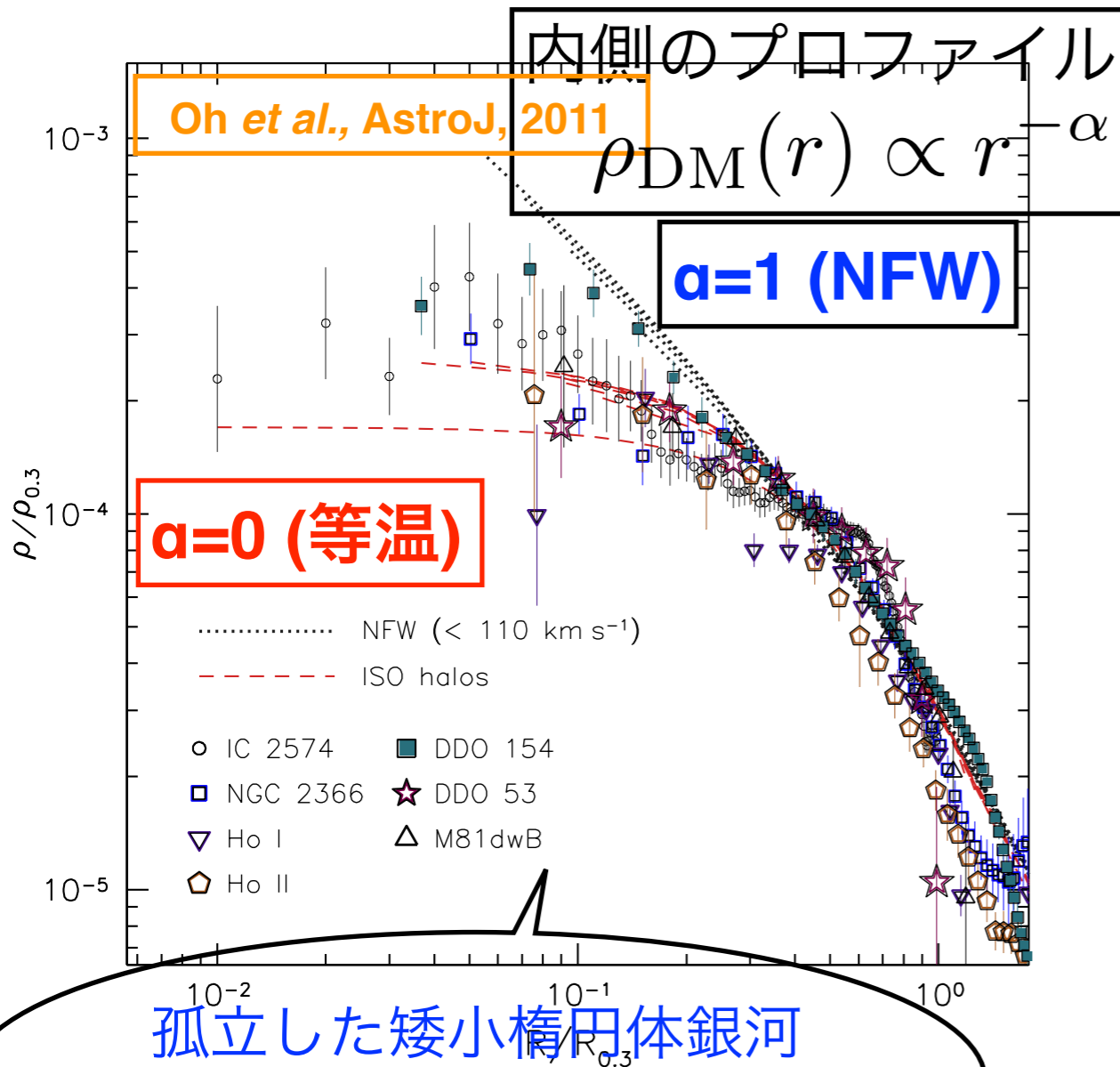
$$V_{\text{circ}}^2(r) = \frac{GM(<r)}{r}$$

サブハローの回転速度の最大値

小スケール問題 (II)

カस्प-コア問題

Λ CDMモデルを用いた N 体計算 (暗黒物質のみ) \rightarrow 暗黒物質の質量分布はハローの大きさによらず **普遍的: NFWプロファイル**



観測は内側で**カस्प**なNFWプロファイルよりも内側で**コア**な等温プロファイルを示唆する

NFWプロファイル

$$\rho_{\text{DM}}(r) = \frac{\rho_s}{r/r_s(1+r/r_s)^2}$$

等温分布

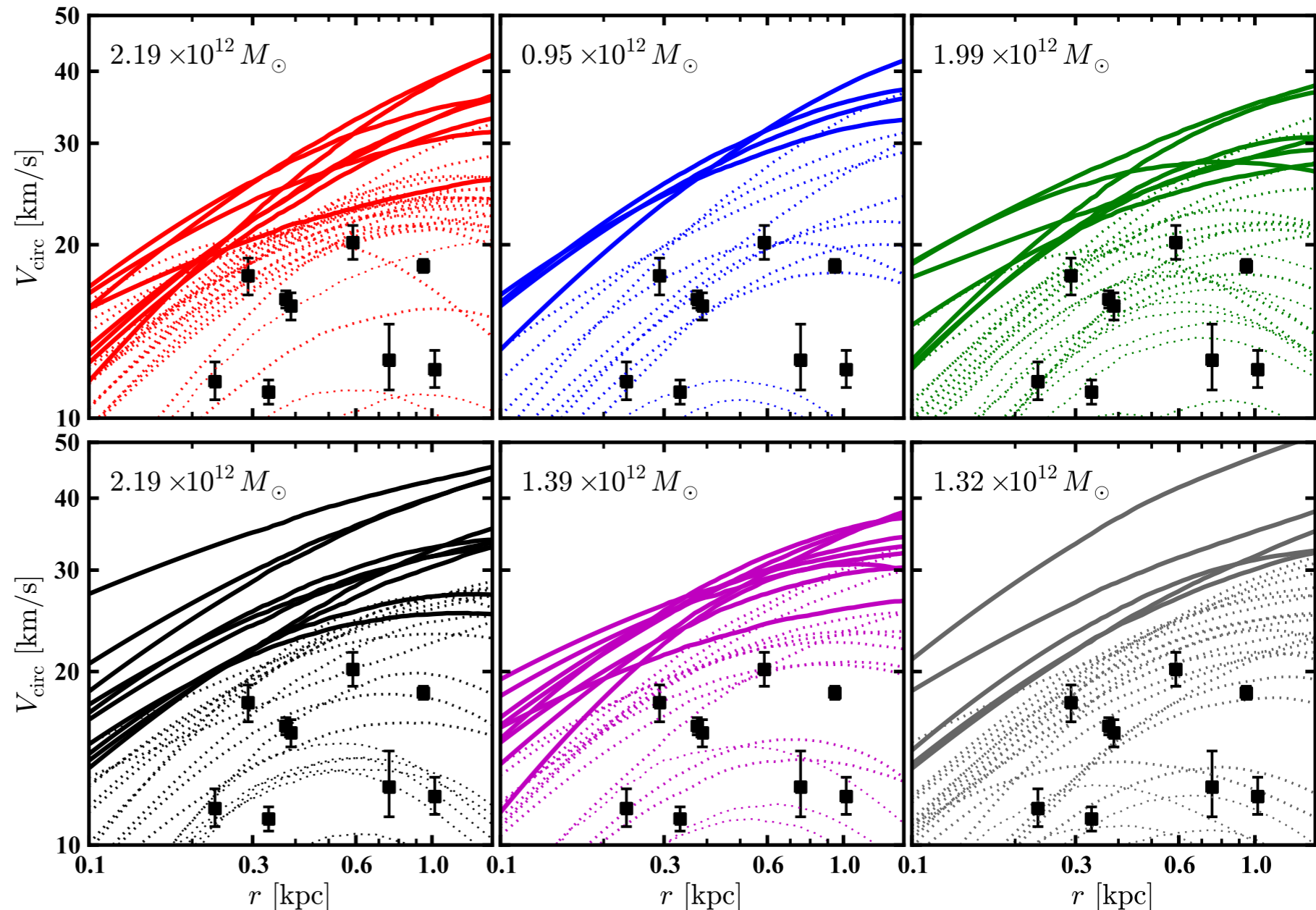
$$\rho_{\text{DM}}(r) = \rho_{\text{DM}}^0 \begin{cases} 1 & (r \ll r_0) \\ (r_0/r)^2 & (r \gg r_0) \end{cases}$$

小スケール問題 (III)

Too Big To Fail問題

Boylan-Kolchin *et al.*, MNRAS, 2011

Λ CDMモデルを用いた
 N 体計算 (暗黒物質のみ) \rightarrow 天の川銀河サイ
 ズのハローに含まれる
 サブハローのうちポテ
 ンシャルの深さで**上位
 5つ**かそれ以上のサブ
 ハローが**観測されてい
 る矮小楕円体銀河を伴っ
 っていない**

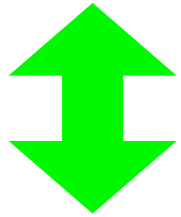


暗黒物質と構造形成(3/29)

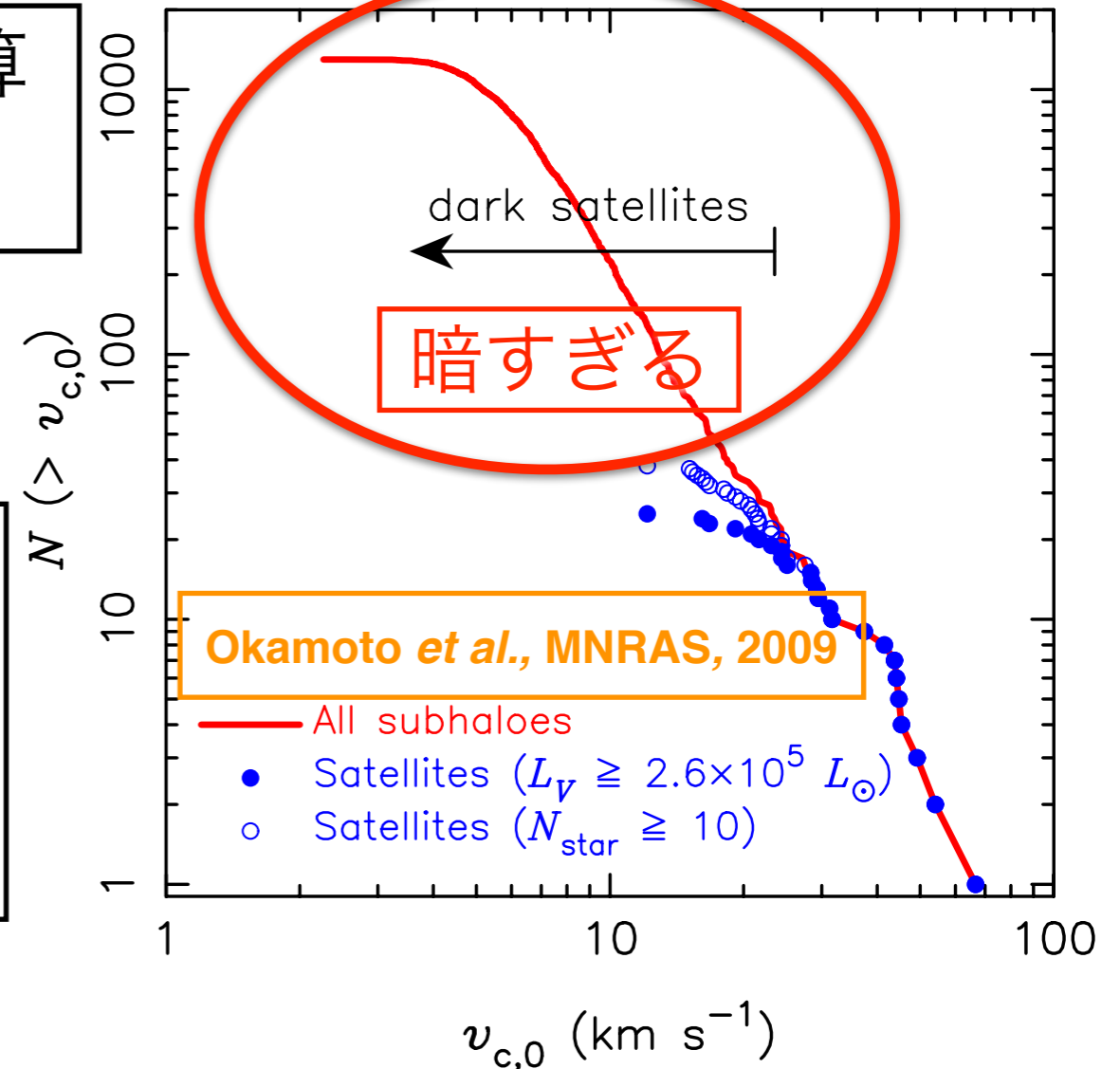
冷たい暗黒物質を超えて - 最新の研究から: 暗黒物質の熱さ, 標準模型粒子との相互作用, 暗黒物質同士の相互作用

小スケール問題はどう解決されうるか (I)

議論は全て Λ CDMモデルを用いた N 体計算
(**暗黒物質のみ**)の結果と観測との比較



銀河スケール以下ではハローの重力ポテンシャルが浅いので**冷却・加熱等のバリオン**の動的プロセスの影響を受けやすい

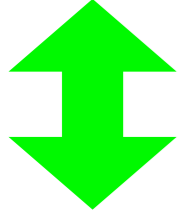


バリオンの動的プロセス

- **電離光子によるバリオンの加熱** - 宇宙再電離の際に電離されたガスが十分冷却されず観測されうる矮小楕円体銀河を形成しない
- **超新星爆発による質量欠損** - 超新星爆発で中心からガスが吹き飛ばされることで重力ポテンシャルが浅くなり, 暗黒物質を止めておけなくなる

小スケール問題はどう解決されうるか (II)

議論は全て Λ CDMモデルを用いた N 体計算
(暗黒物質のみ) の結果と観測との比較

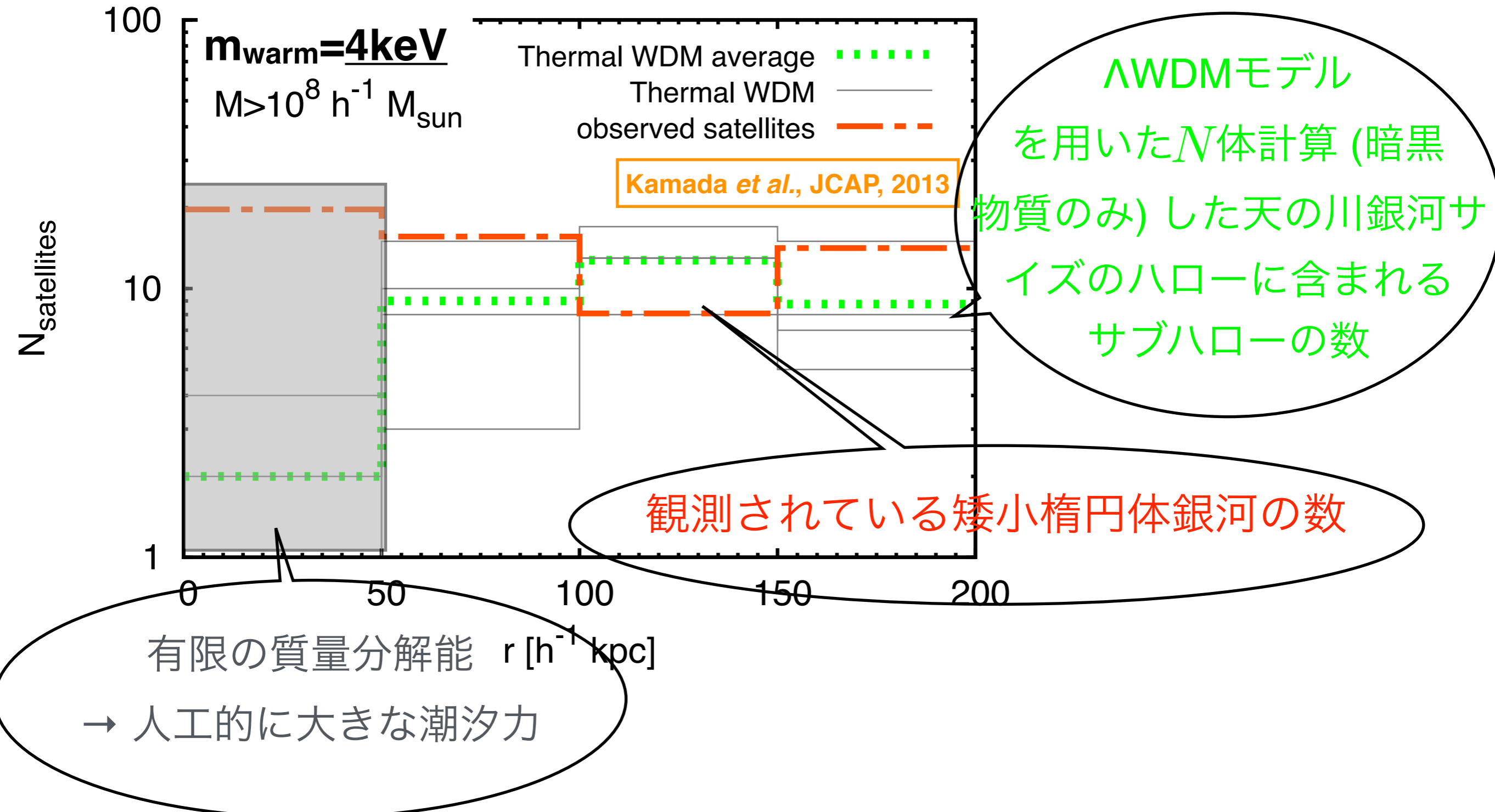


暗黒物質の素粒子的性質

- **暗黒物質の熱さ** - 暗黒物質の熱速度が圧力のように働き, 重力成長を妨げる
- **標準模型粒子との相互作用** - 暗黒物質が光子・ニュートリノ (熱速度が大きい) と直接・間接的に結合し, その圧力で重力成長が妨げられる
- **暗黒物質同士の相互作用** - 暗黒物質同士の相互作用により暗黒物質がハローの中心に集まることを阻害する

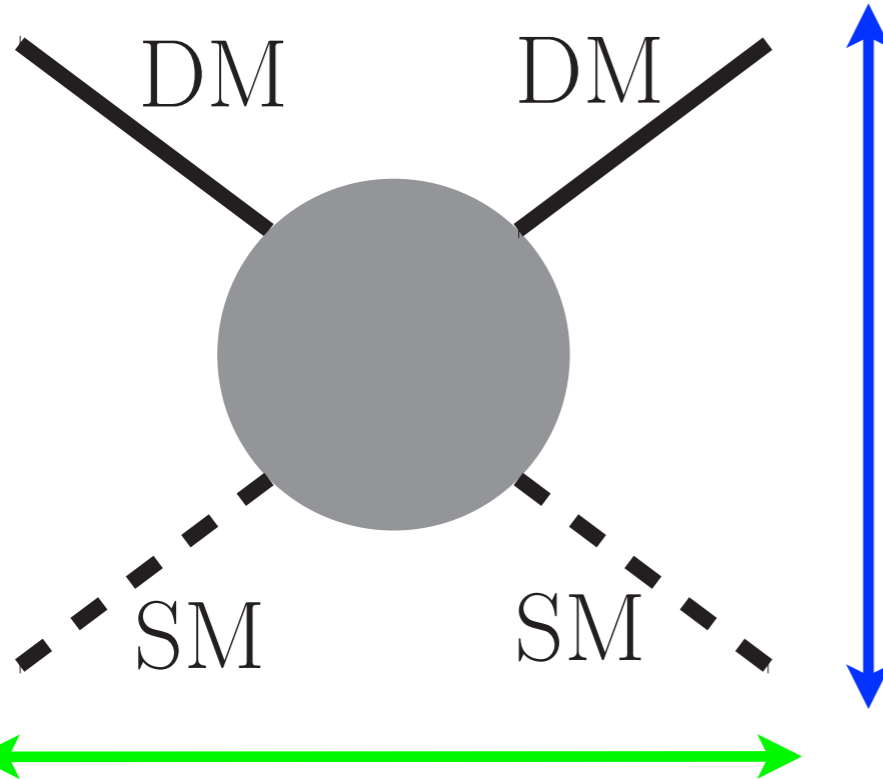
温かい暗黒物質

温かい暗黒物質 (WDM) : ジーンズ長が銀河スケール $\lambda \sim 1$ Mpc



$m_{\text{warm}}=2-4 \text{ keV}$ の WDM が矮小銀河問題の解決になりうる

標準模型粒子との相互作用



: 化学的反応

暗黒物質の数 - 変わる

暗黒物質のエネルギー・運動量 - 再分配

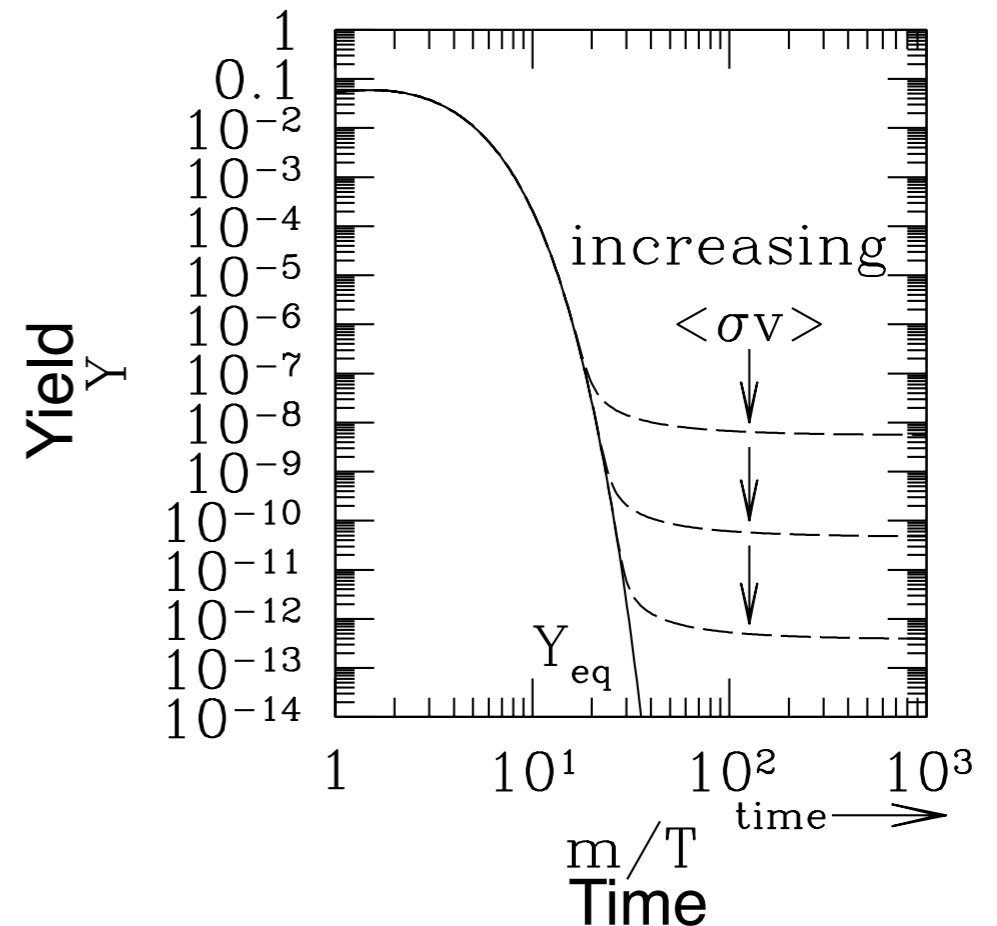
化学的脱結合 - 暗黒物質の数密度が凍結する → 暗黒物質の現在のエネルギー密度

: 運動学的反応

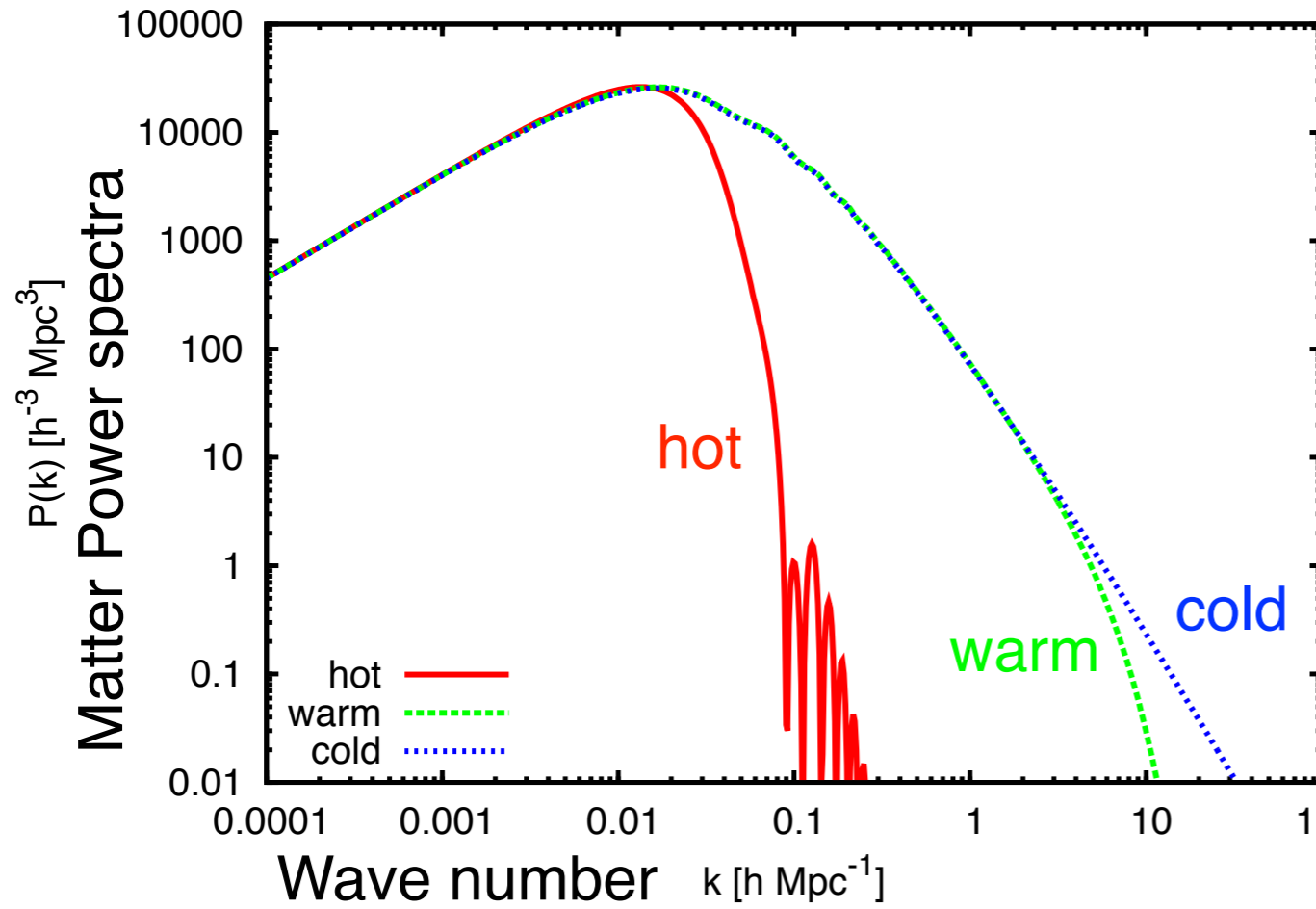
暗黒物質の数 - 変わらない

暗黒物質のエネルギー・運動量 - 再分配

運動学的脱結合 - 暗黒物質が自由流を始める → 最小ハローの大きさ

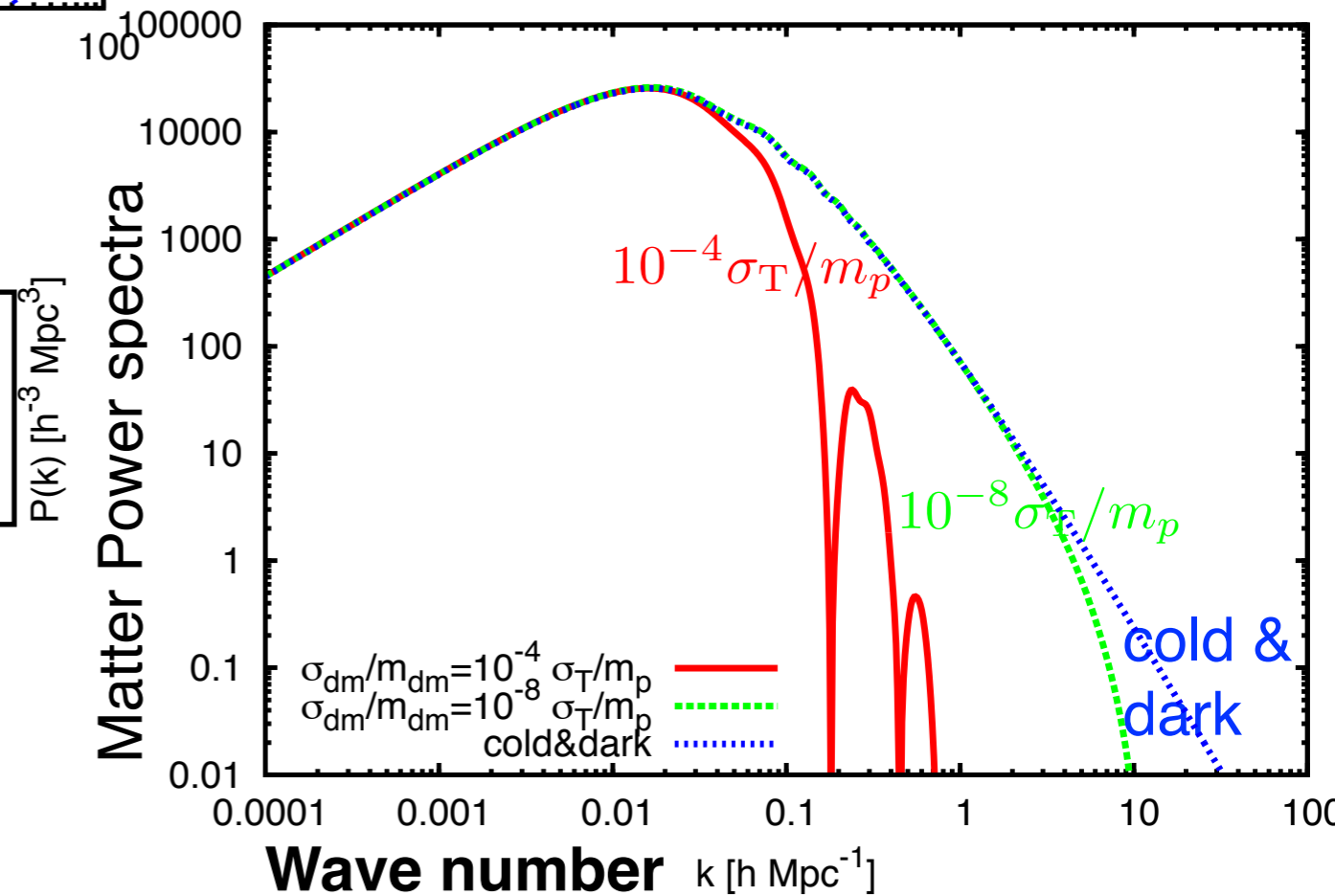


標準模型粒子との相互作用 vs 暗黒物質の熱さ

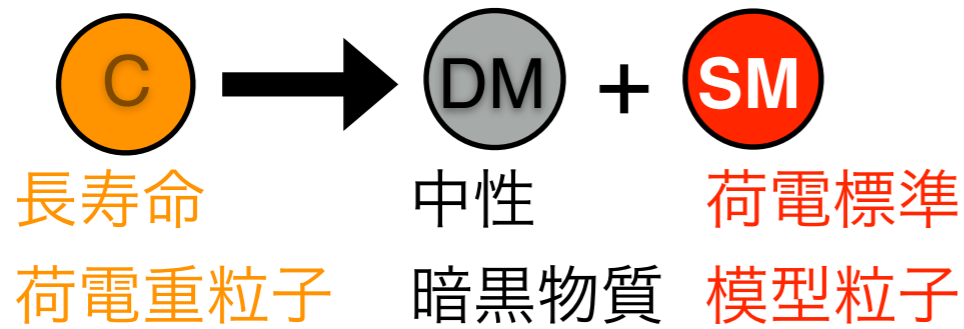


暗黒物質の熱さ (熱速度)
 → **有効圧力**が重力成長を妨げる

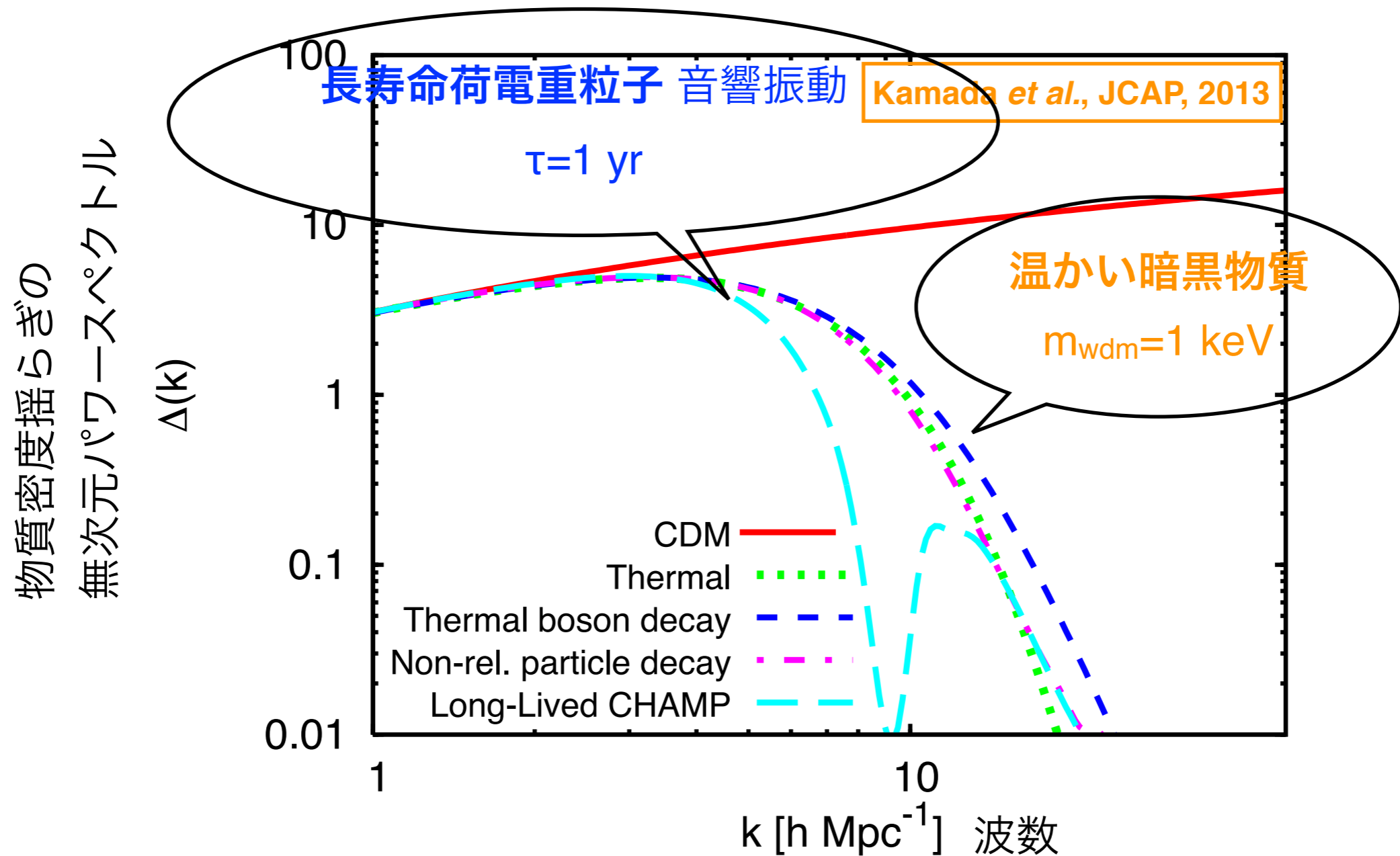
標準模型粒子との相互作用
 → **プラズマ圧力**が重力成長を妨げる



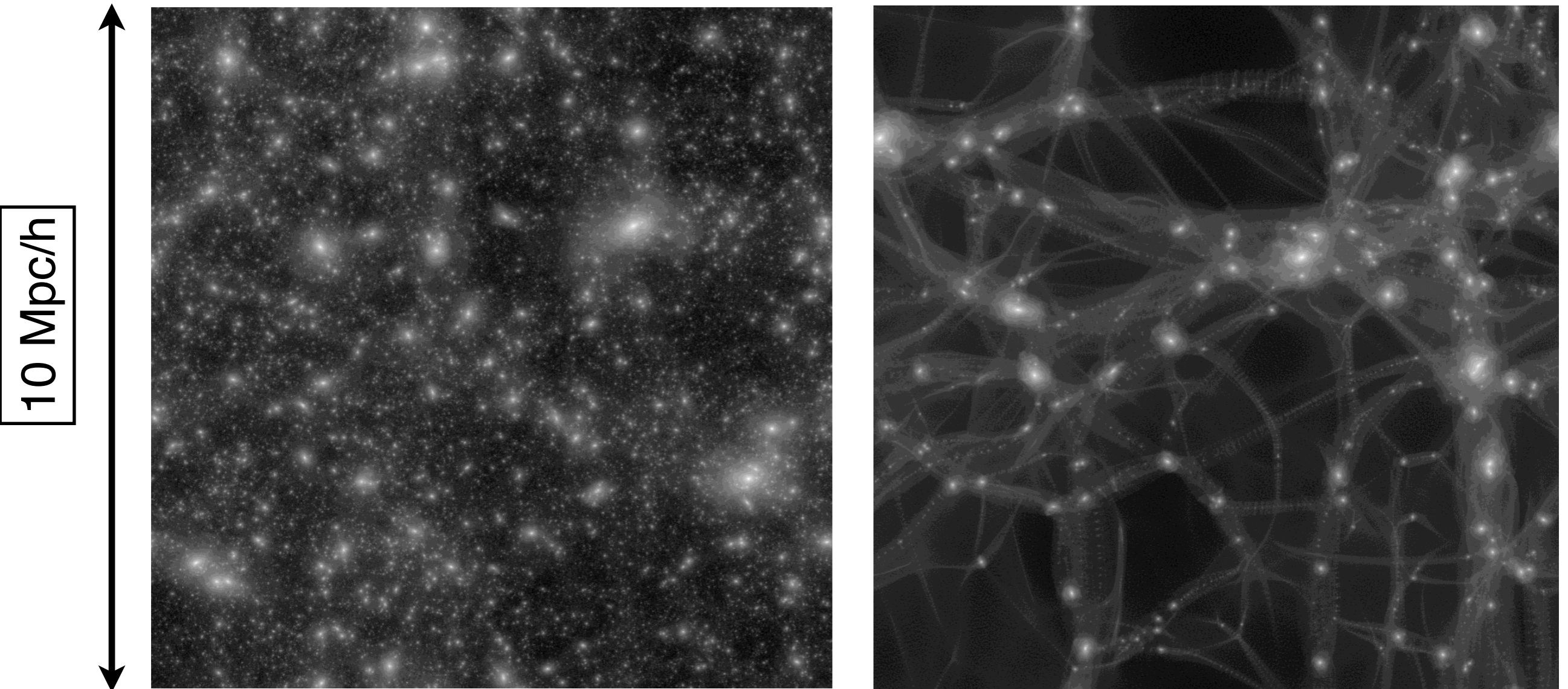
暗黒物質の相互作用: 長寿命荷電重粒子



高温プラズマ (γ , e^- , p^+) の圧力によって長寿命荷電重粒子の密度揺らぎの重力成長が妨げられる



N 体計算 (シミュレーション)



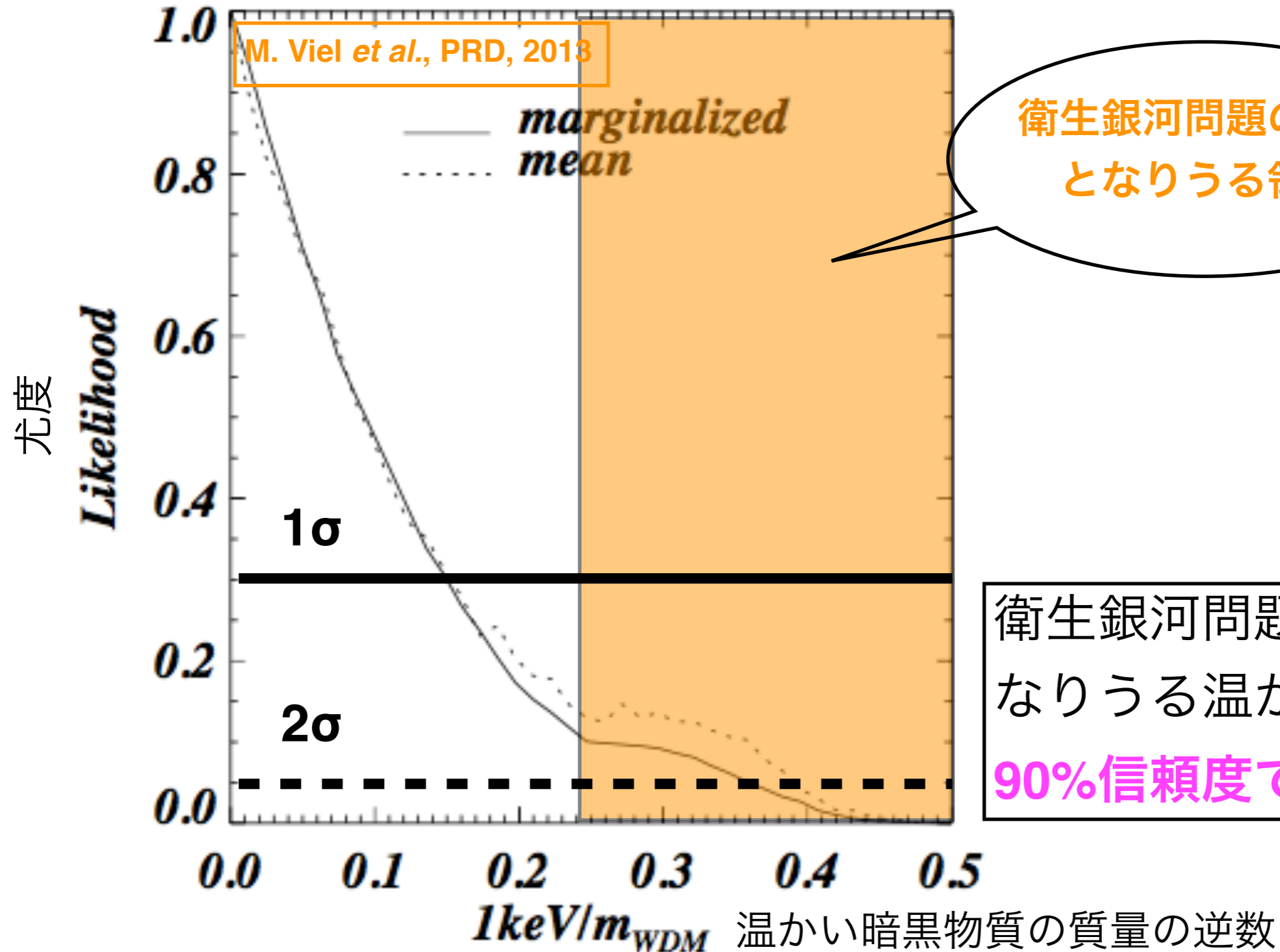
冷たい暗黒物質

長寿命荷電重粒子
/ 温かい暗黒物質

冷たい暗黒物質の予言する無数の小さな構造は
長寿命荷電重粒子/温かい暗黒物質模型では抑制されている

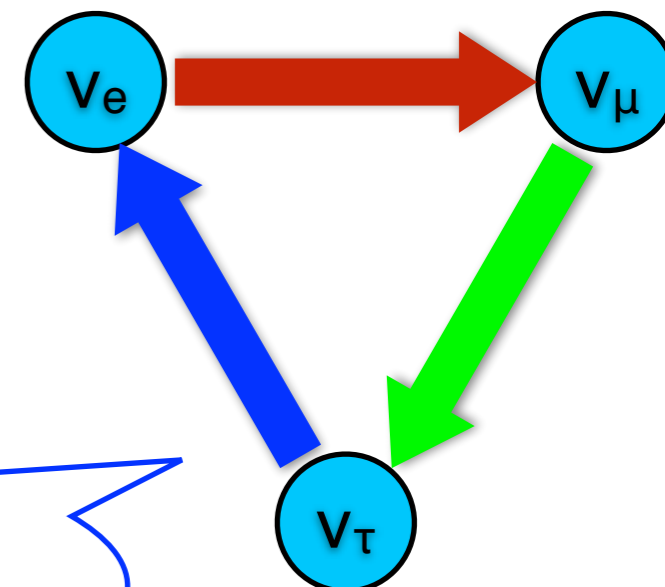
ライマン α の森による制限 (温かい暗黒物質)

HIRES+MIKEのクエーサー ($z > 4$) スペクトル
 吸収線の強度/頻度 \leftrightarrow HI gasの分布

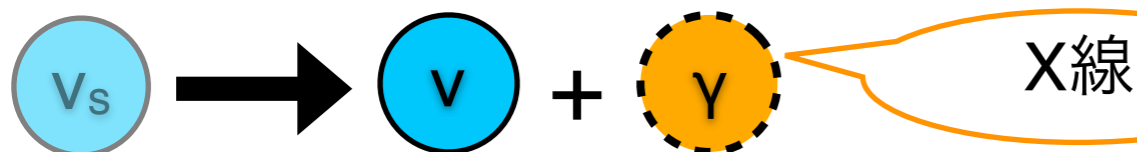


暗黒物質の速度分散: ステライルニュートリノ

ニュートリノ振動を説明するために導入された
電弱相互作用や強い相互作用をしない (ステライル)
右巻きニュートリノ



放射崩壊 $\tau=10^{27}$ s



素粒子標準模型
を超えた物理

異常X線輝線@3.5 keV ?

E. Bulbul, ApJ, 2014

A. Boyarsky, PRL, 2014

XMM-Newton, Chandra

追試では検出できず

T. Tamura, PASJ, 2015

N. Sekiya, PASJ, 2015

Suzaku

矮小銀河問題と異常X線輝線を同時に解決できるか?

混合暗黒物質 (Mixed Dark Matter, MDM)

ステライルニュートリノの放射崩壊で**異常X線輝線**を説明できるか

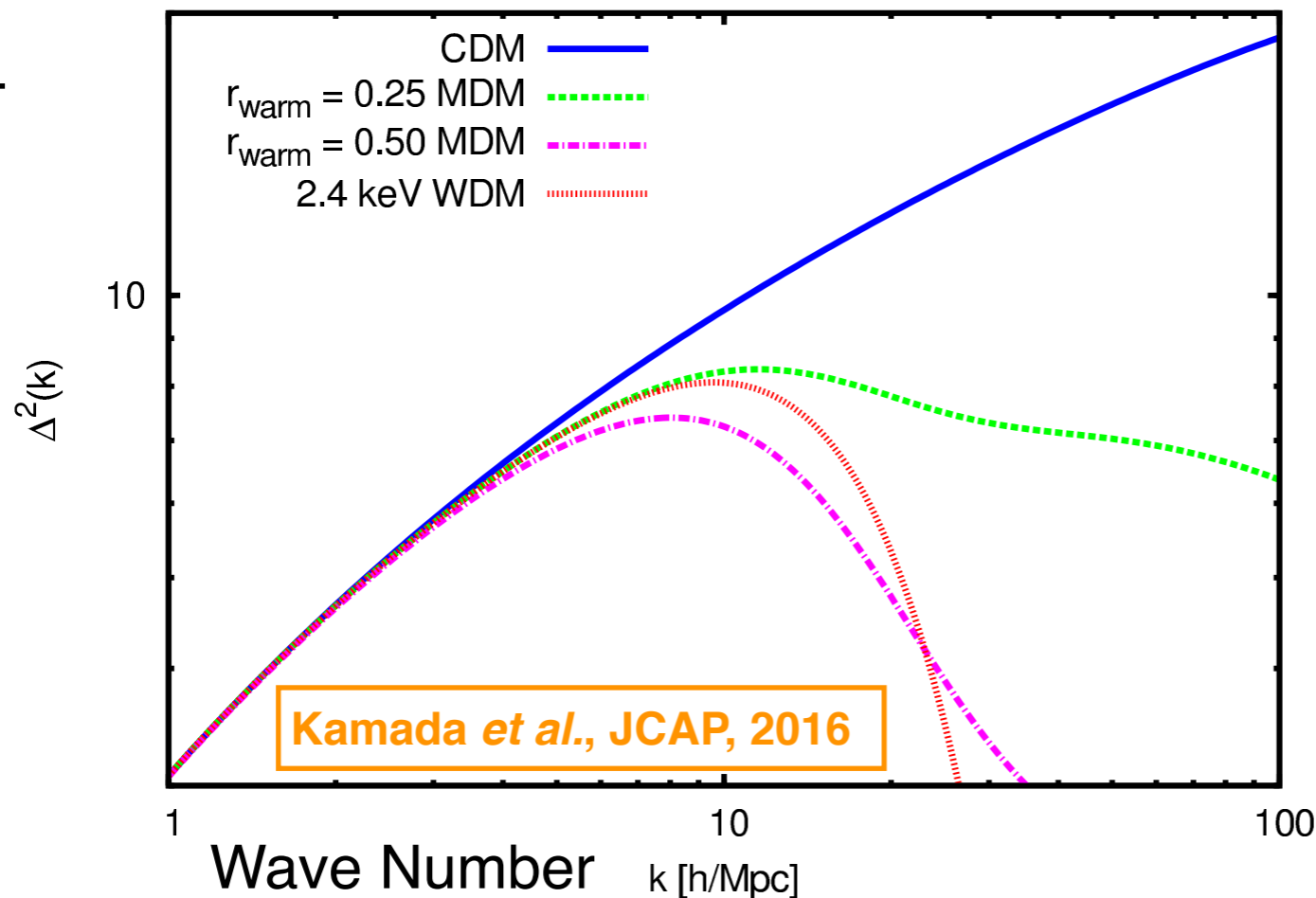
Abazajian, PRL, 2014

大きなレプトン数密度を仮定 $n_L/n_\gamma \sim 10^{-4}$ (c.f. $n_B/n_\gamma \sim 10^{-10}$)

Kamada *et al.*, JCAP, 2016

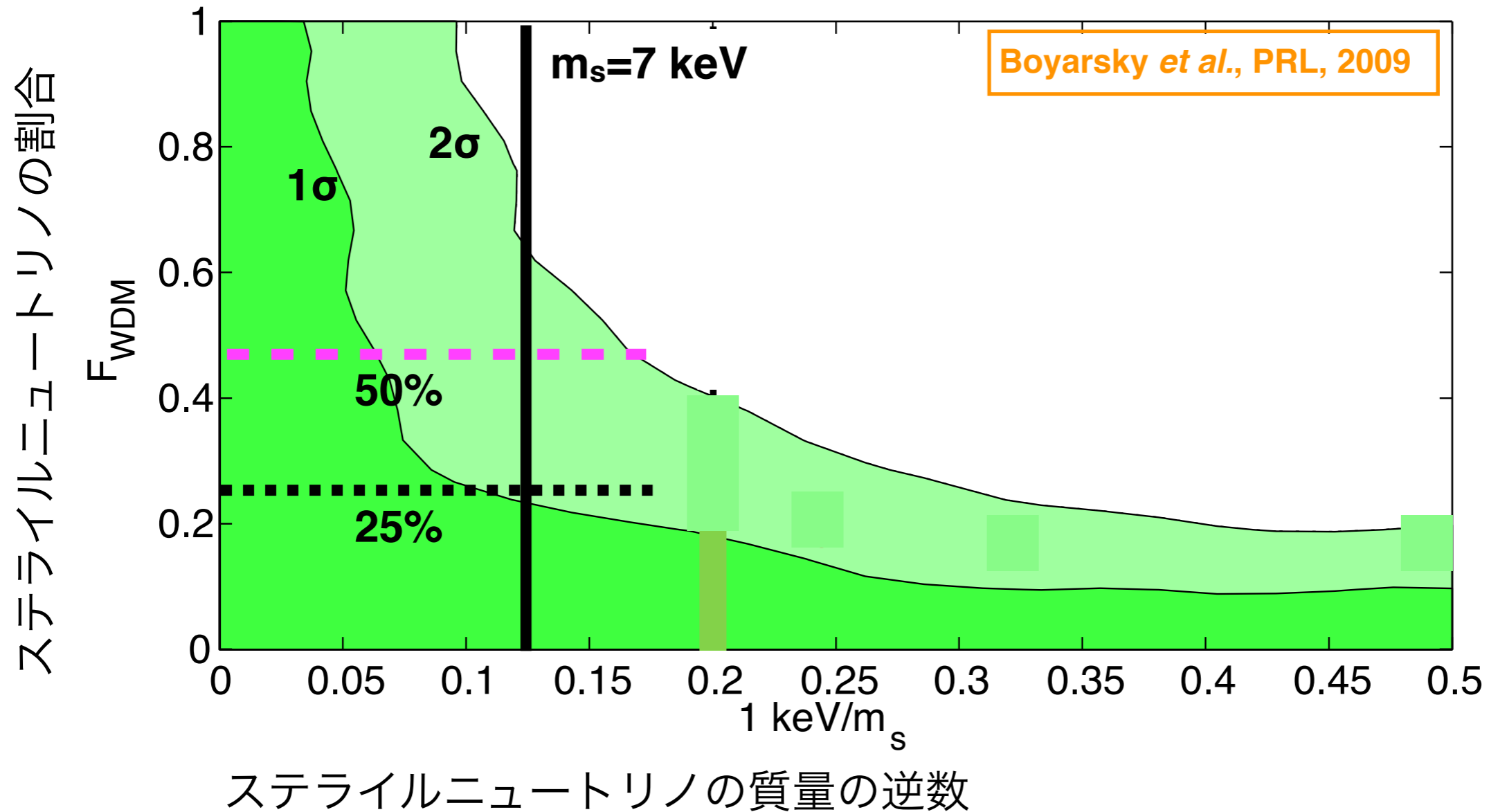
ステライルニュートリノ (**WDM**) がDMの質量密度の**20-60%**を占めている (残りは**CDM**) と仮定 (**CDM+WDM=MDM**)

Dimensionless Matter Power spectra



物質密度揺らぎは**CDM**に比べて抑制されるが、その程度は純粋な**WDM**に比べると**弱い**

ライマン α の森による制限 (混合暗黒物質)



7 keVステライルニュートリノのみから成る温かい暗黒物質は 2σ で棄却
 混合暗黒物質 (割合50%/25%) は $2\sigma/1\sigma$ で許されている

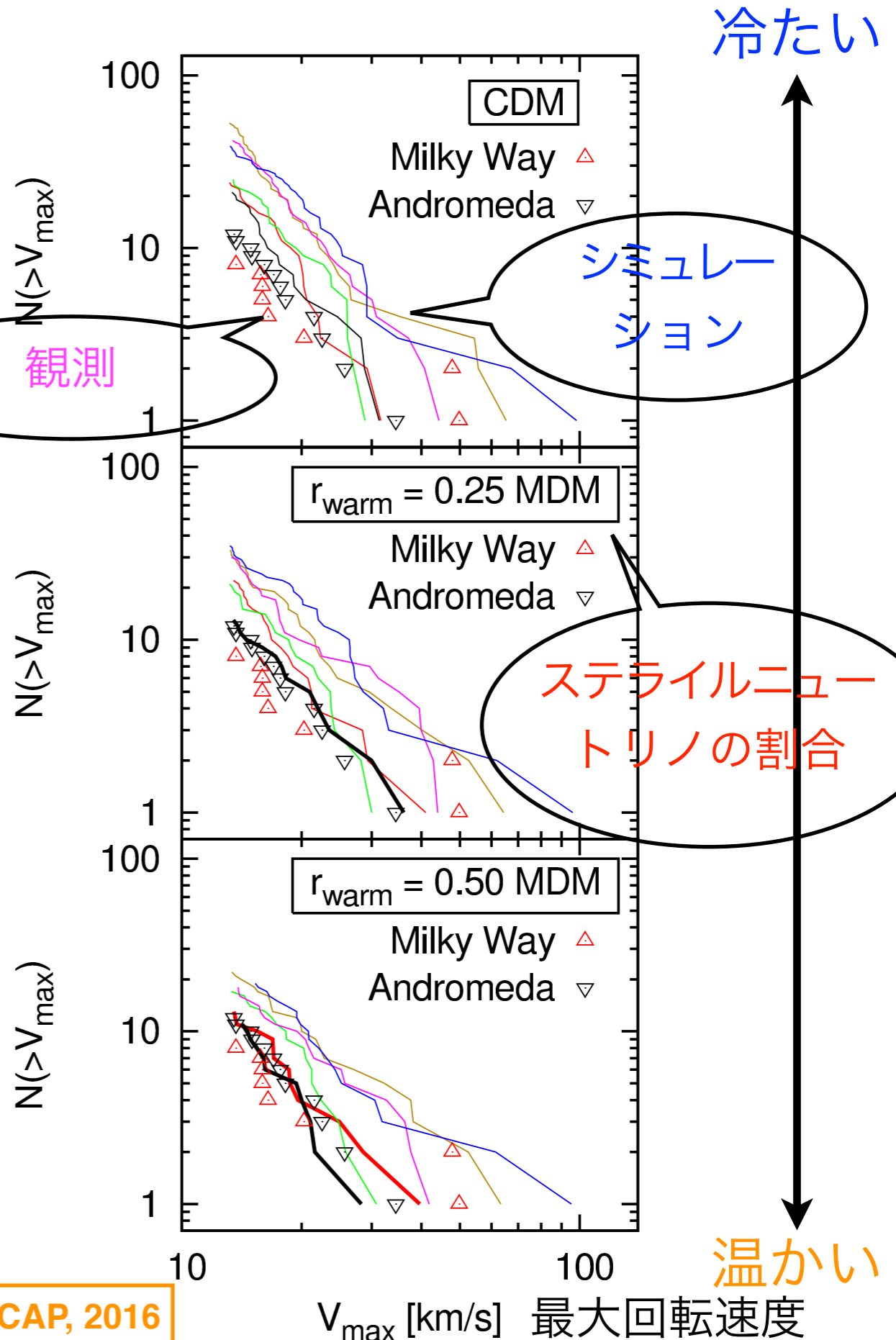
累積速度関数: 矮小銀河問題

冷たい暗黒物質の予言する
矮小銀河の数は観測に比べて多すぎる

天の川銀河/アンドロメダ
の候補ハロー6つのうち1つ
が観測されている
矮小銀河の数を再現する

6つのうち2つが観測されている
矮小銀河の数を再現する

サブハローの累積個数



等温分布 (I)

仮定

相空間における分布関数 - Maxwell-Boltzmann分布

$$f_{\text{DM}}(\vec{x}, \vec{v}) = \frac{\rho_{\text{DM}}^0}{(2\pi\sigma^2)^{3/2}} \exp(-E(\vec{x}, \vec{v})/\sigma^2)$$

$$E(\vec{x}, \vec{v}) = \vec{v}^2/2 + \phi(\vec{x}) \quad \phi(0) = 0$$

熱分布は
Boltzmann方程式の
自明な解

変数

- 流体の(質量)密度場

$$\rho_{\text{DM}}(\vec{x}) = \int d^3\vec{v} f_{\text{DM}}(\vec{x}, \vec{v}) = \rho_{\text{DM}}^0 \exp(-\phi(\vec{x})/\sigma^2)$$

- 流体の速度場

$$\vec{V}(\vec{x}) = \int d^3\vec{v} \vec{v} f_{\text{DM}}(\vec{x}, \vec{v}) = 0$$

- 流体の圧力

$$P_{\text{DM}}(\vec{x}) = \int d^3\vec{v} \frac{\vec{v}^2}{3} f_{\text{DM}}(\vec{x}, \vec{v}) = \sigma^2 \rho_{\text{DM}}(\vec{x})$$

- 重力場 $\phi(\vec{x})$

等温分布 (II)

方程式

- 質量保存の式 $\dot{\rho}_{\text{DM}} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_{\text{DM}} \vec{V}) = 0$

- 運動方程式 $\dot{\vec{V}} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{1}{\rho_{\text{DM}}} \vec{\nabla} P_{\text{DM}} - \vec{\nabla} \phi$

- ポアソン方程式 $\Delta \phi = 4\pi G \rho_{\text{DM}}$

質量保存の式
と運動方程式は自明に
満たす

方程式'

- ポアソン方程式 $\Delta \phi = 4\pi G \rho_{\text{DM}}^0 \exp(-\phi/\sigma^2)$

境界条件

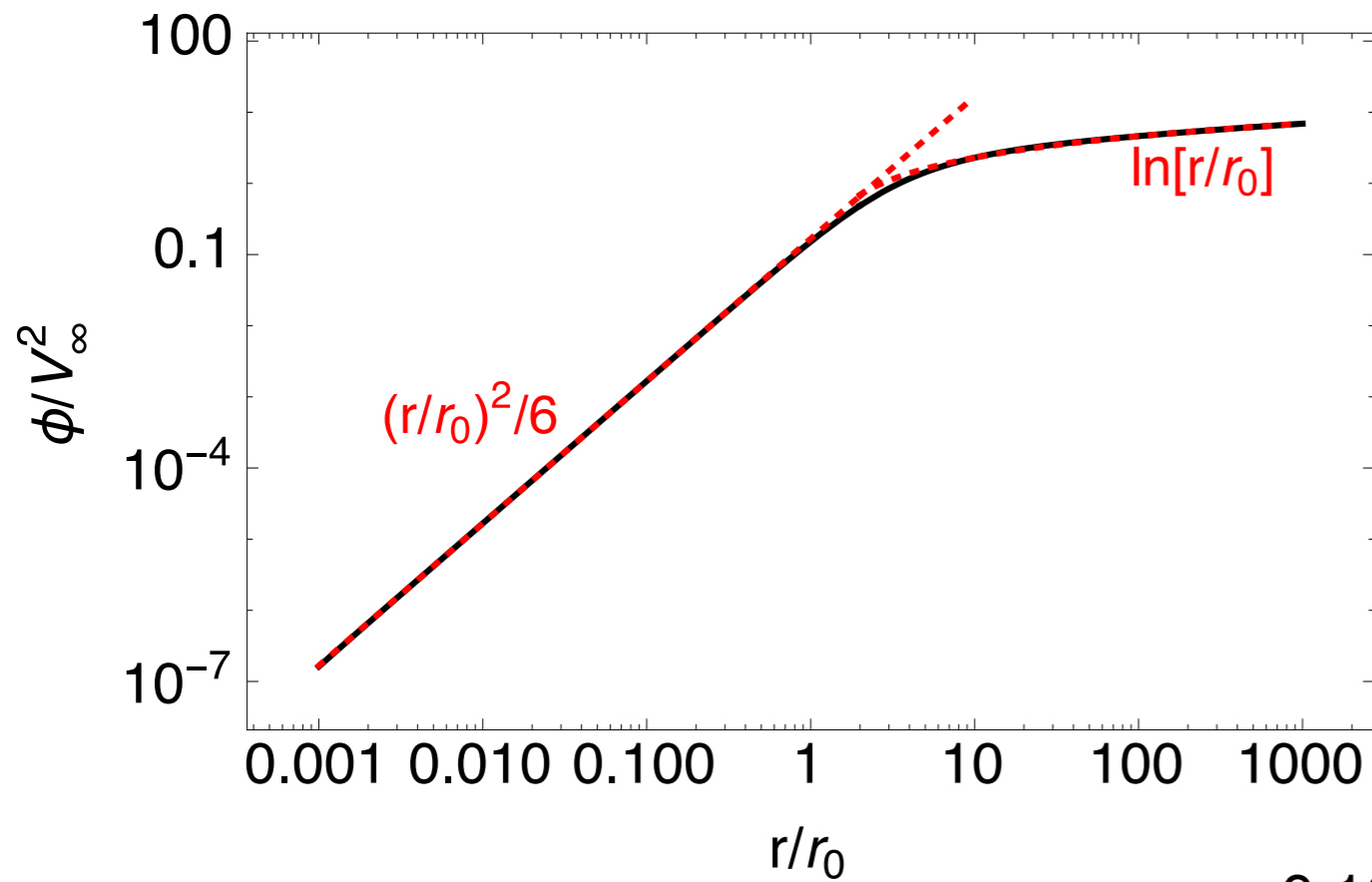
$\phi(0) = 0$ $\phi(\vec{x}) \rightarrow V_\infty^2 \ln(r/r_0)$ ($r = |\vec{x}| \rightarrow \infty$)

$\longrightarrow V_\infty^2 = 2\sigma^2 = 4\pi G \rho_{\text{DM}}^0 r_0^2$

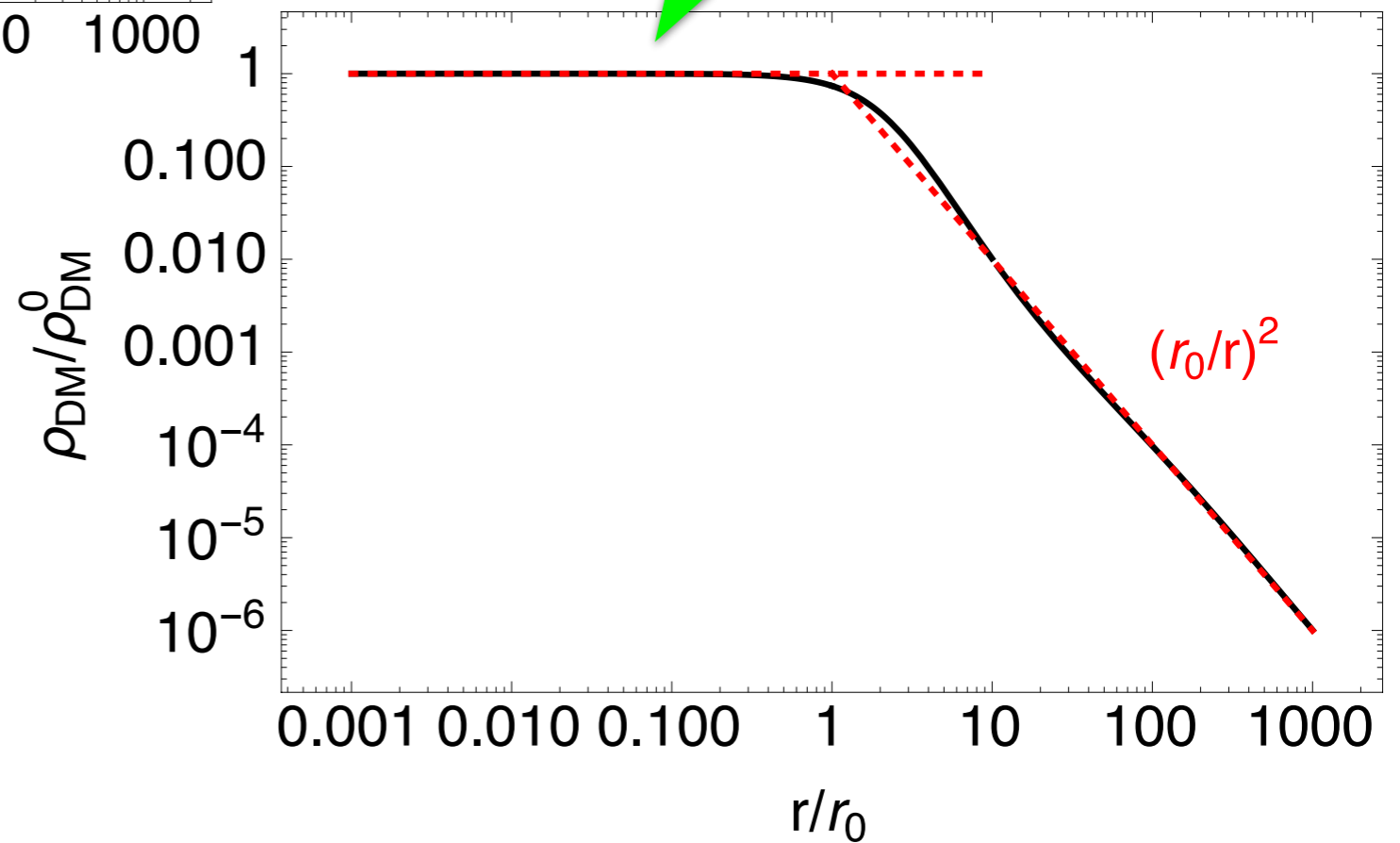
$V_{\text{circ}}^2 = r \frac{d\phi}{dr}$
 $= V_\infty^2$

等温分布 (III)

数値解

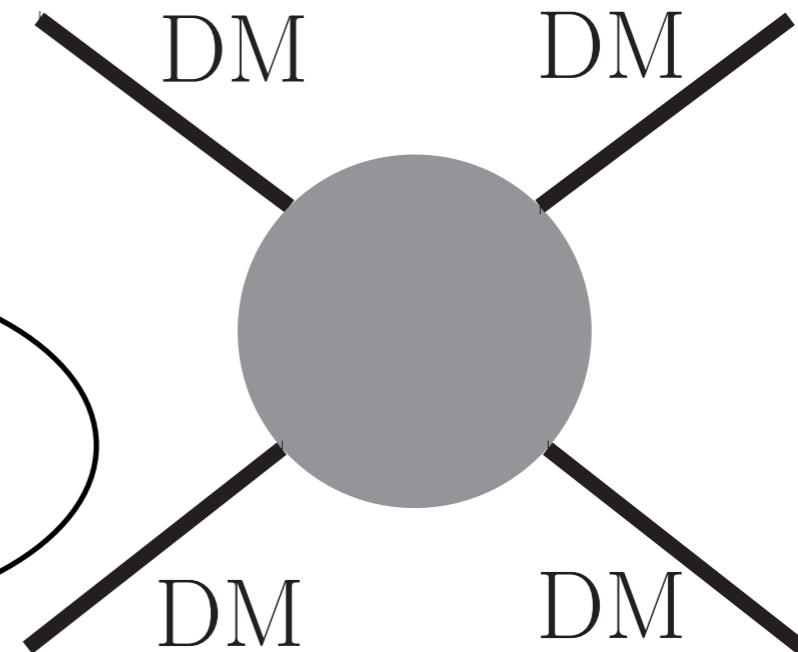


中心でコアなプロファイル



暗黒物質の自己相互作用

Self-Interacting Dark Matter: **SIDM**



反応率 $\Gamma = \sigma v \rho / m$

σ : 散乱断面積

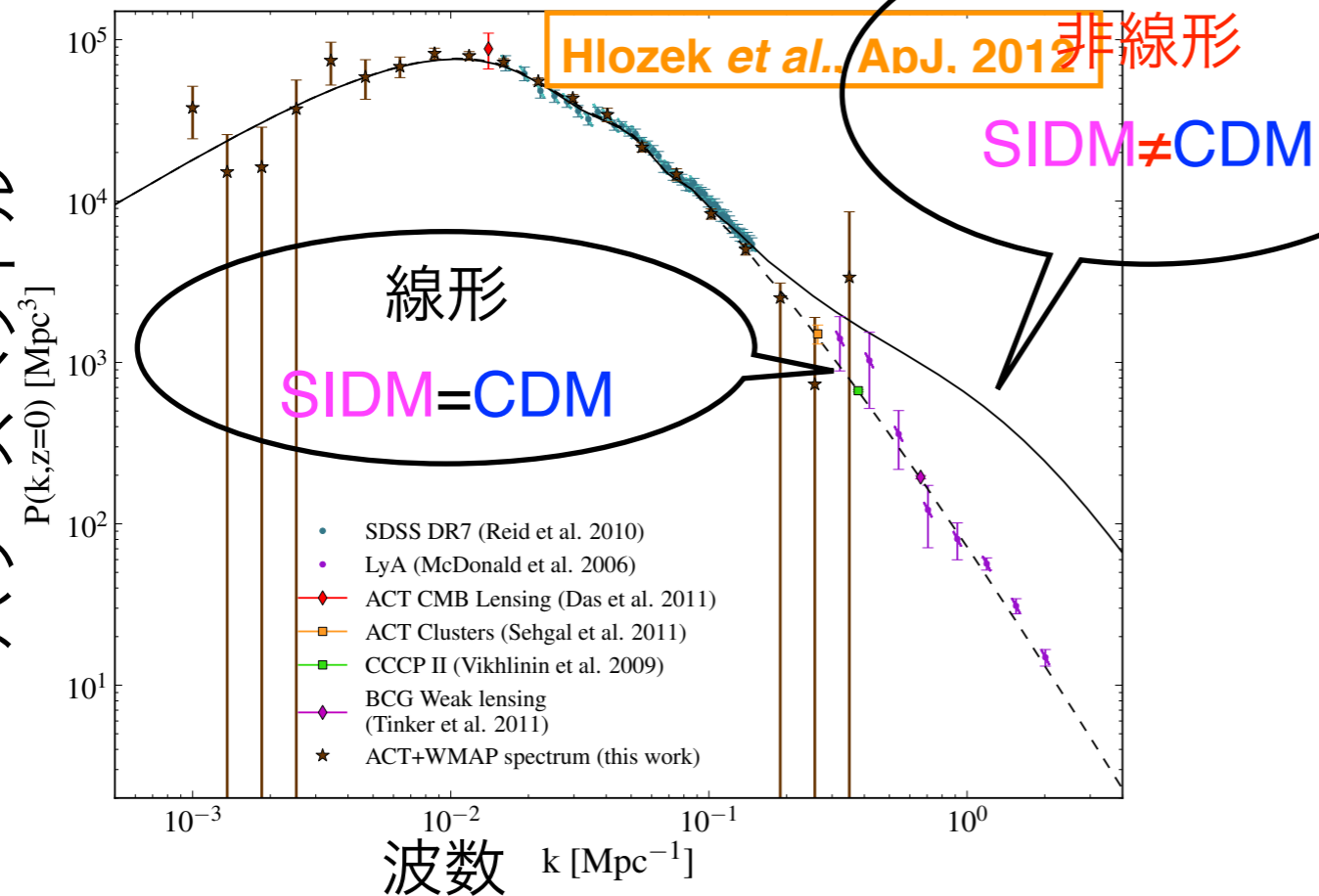
v : 相対速度

ρ : 暗黒物質の質量密度

m : 暗黒物質の質量

物質密度揺らぎの

パワースペクトル



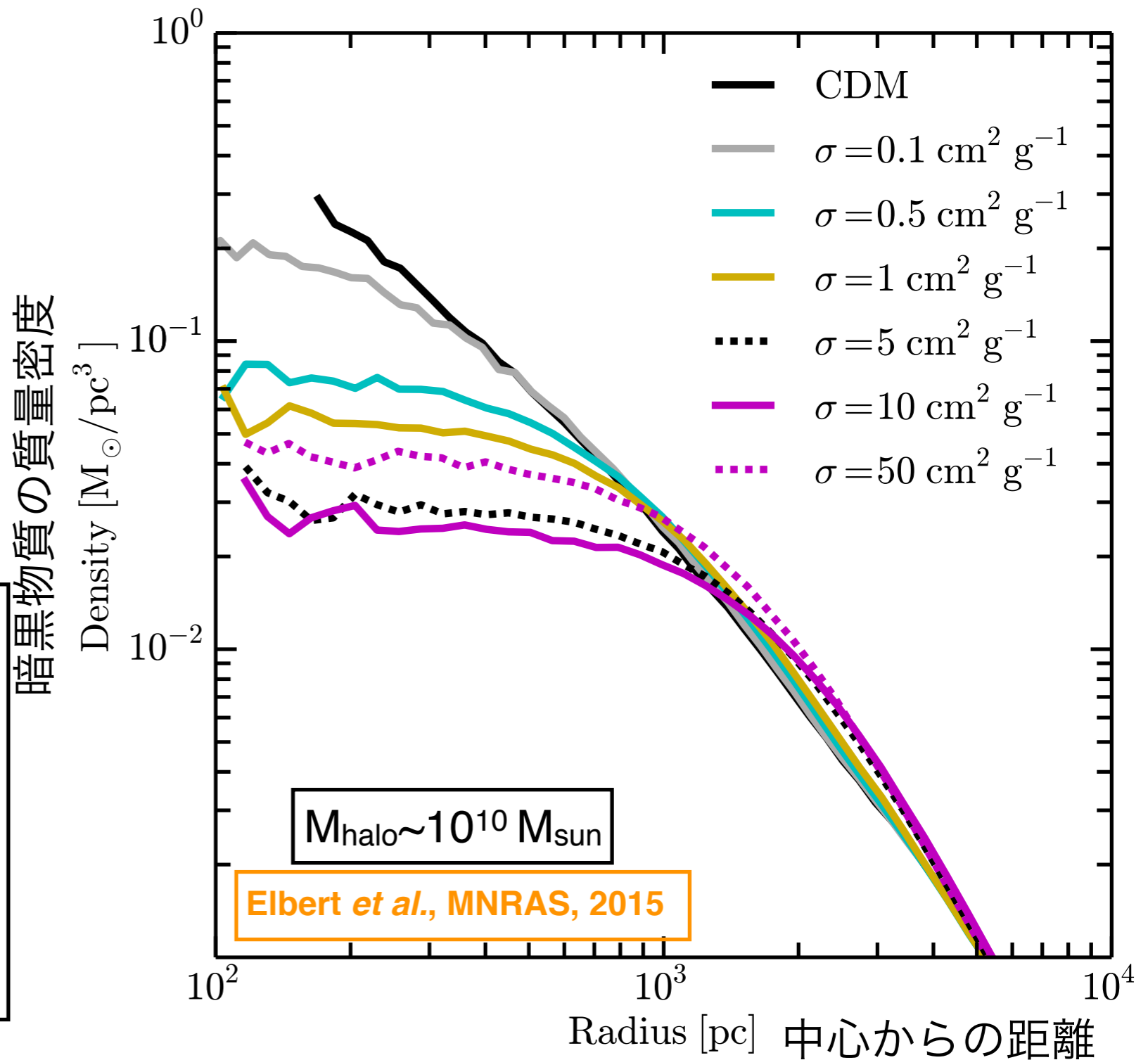
物質密度揺らぎの線形パワースペクトル (構造形成の種) はCDMと同じ
構造形成が進む ($\leftrightarrow \rho$ 大) につれて自己相互作用が効いてくる

自己相互作用と暗黒物質の密度分布

σ/m が大きくなるにつれて
中心密度が低くなる

臨界値を超えると, σ/m が大
きくなるにつれて中心密度が
高くなる ← 局所平衡に達す
ると熱重力不安定性が起き
る

$\sigma/m \sim 0.1-10 \text{ cm}^2/\text{g}$ が好ましい



自己相互作用に対する制限と素粒子模型

ハローの形態: 楕円率

相互作用が強いと球対称に近づく

銀河団 MS 2137-23

$\sigma/m < 0.02 \text{ cm}^2/\text{g}$ (解析的な評価)

Miralda-Escude, ApJ, 2002

↔ $\sigma/m < 1 \text{ cm}^2/\text{g}$ (SIDMのシミュレーション)

Peter et al., MNRAS, 2013

速度依存性のない散乱断面積

Hochberg et al., PRL, 2015

Self-Interacting Massive Particle: **SIMP**の奇跡

3体→2体反応 ↔ DMの数密度, 2体→2体反応 ↔ 自己相互作用

速度依存性のある散乱断面積

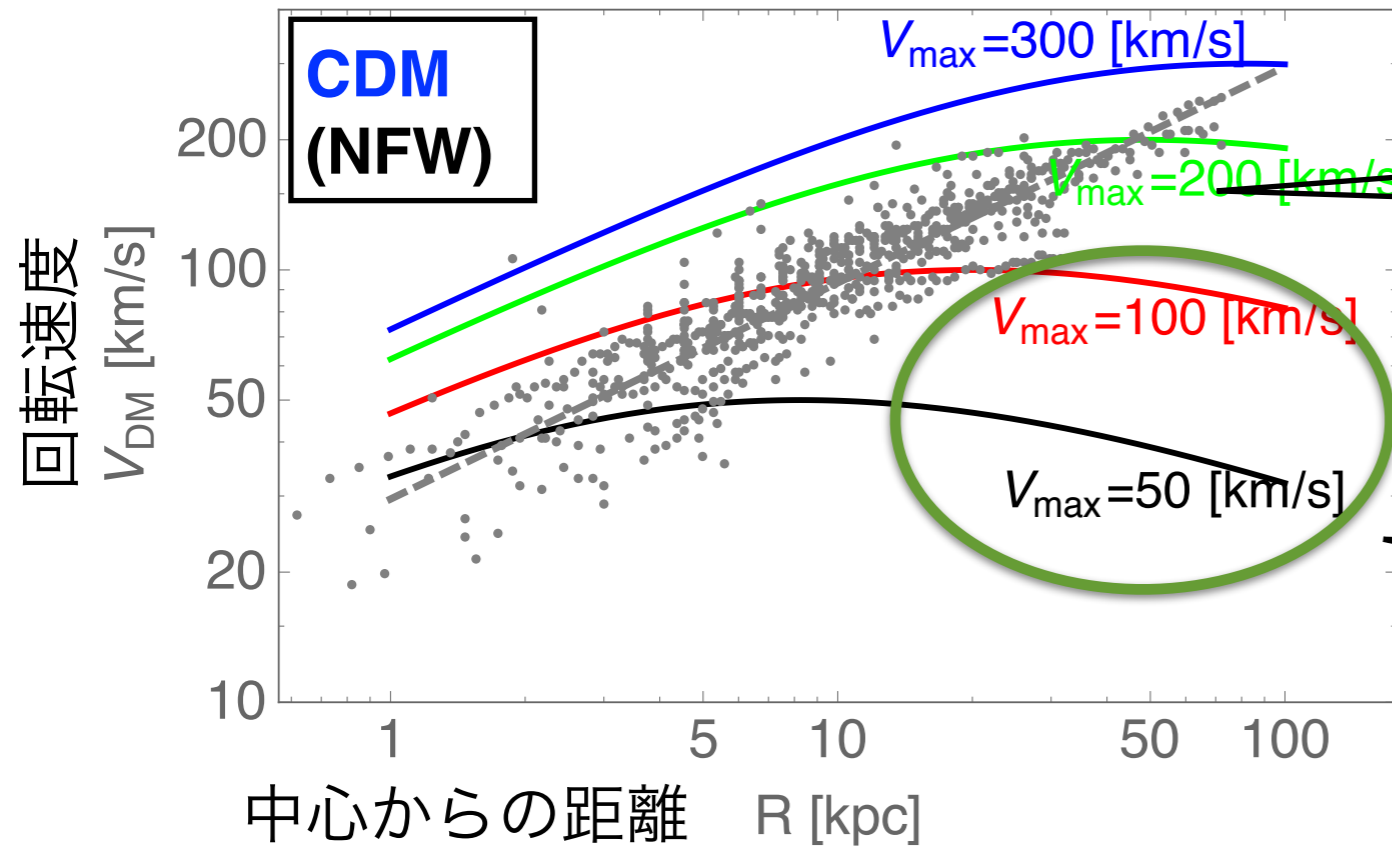
Tulin et al., PRL, 2013

10-1000 MeV 媒介粒子 ($m_{\text{med}} \sim m_{\text{DM}} v/c$) を導入

$v \sim 1000 \text{ km/s}$ @ 銀河団 → $\sigma \sim 1/v^4$ で抑制される

$v \sim 10-100 \text{ km/s}$ @ (矮小)銀河 → $\sigma \sim 1/m_{\text{med}}^2$ (定数)

円盤銀河の回転曲線

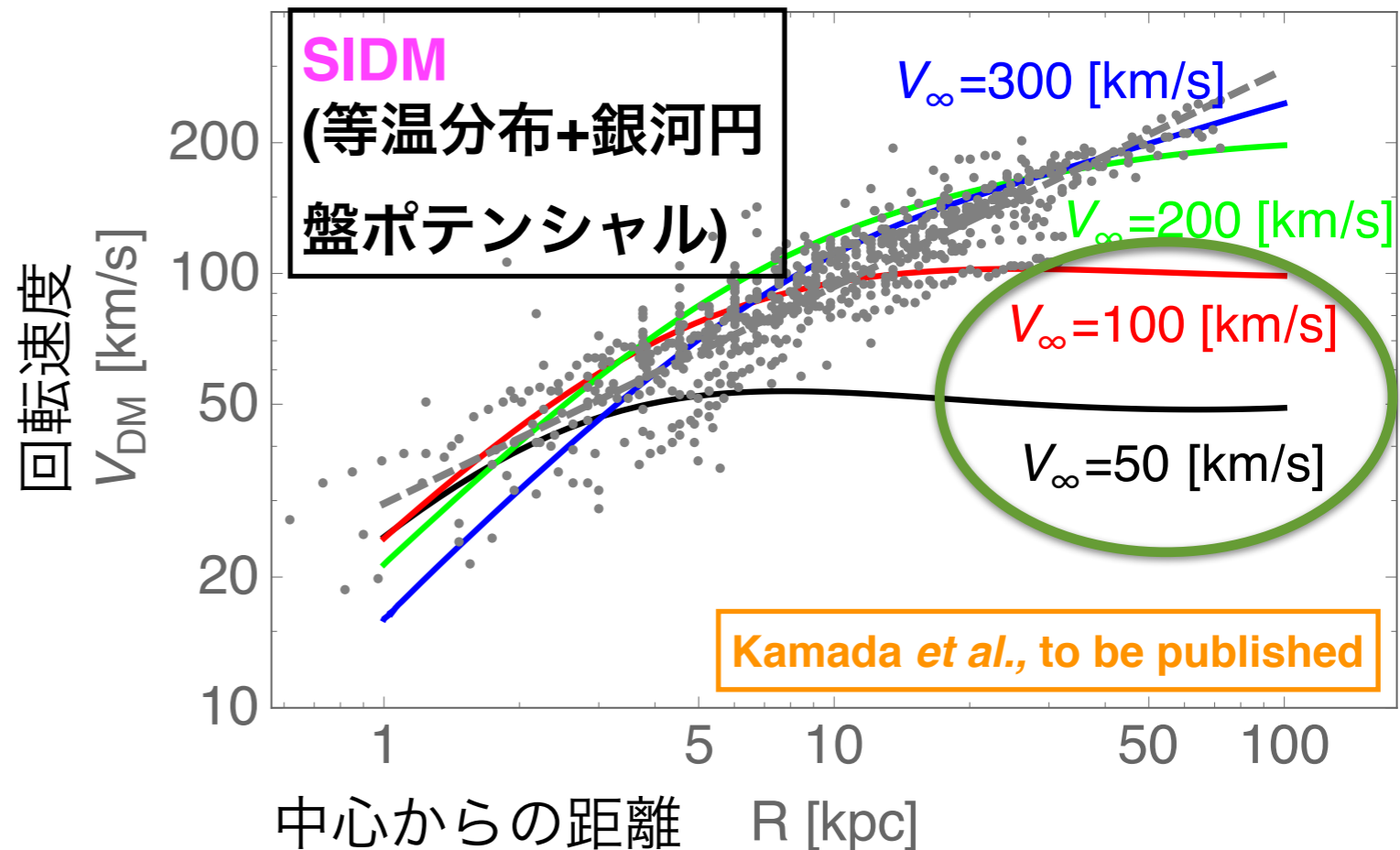


観測された回転曲線 (61 銀河)

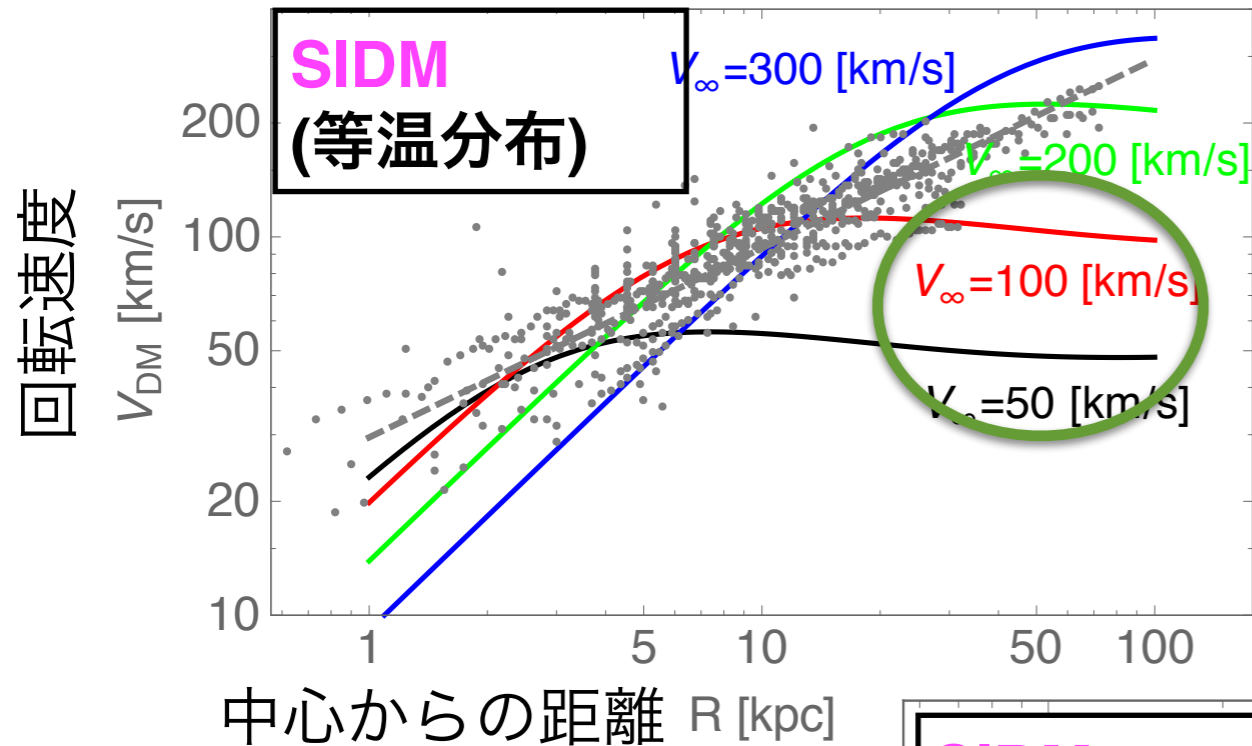
観測バイアス: 小さい
ハローは銀河円盤も小さく、データがない

冷たい暗黒物質は観測に比べて回転速度を大きく予言する \leftrightarrow 質量が中心に集まりすぎている

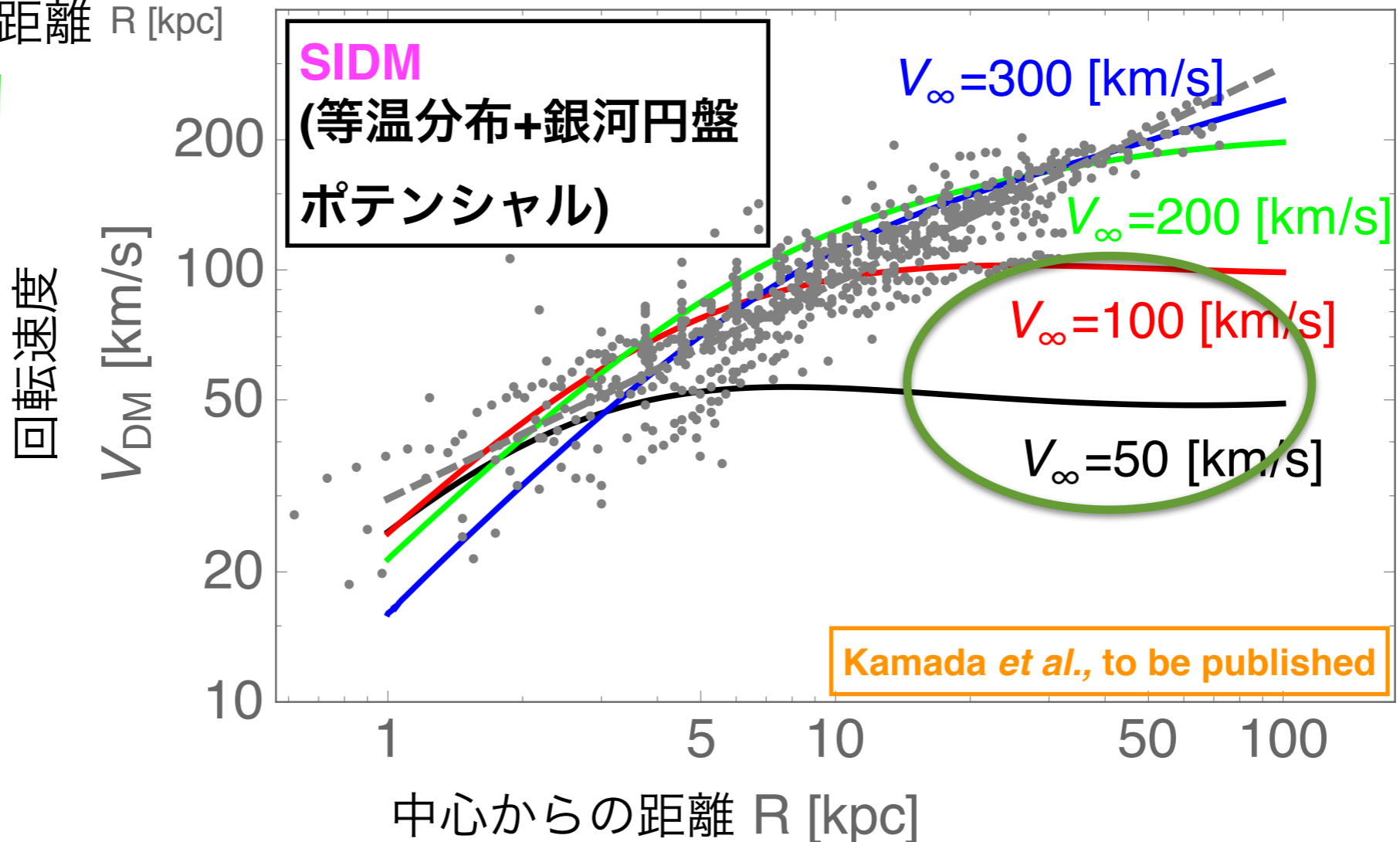
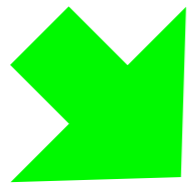
自己相互作用はDMを中心から弾き出す役割を果たし、観測をよく説明する



銀河円盤の影響



自己相互作用はDMを中心から弾き出しすぎる → **銀河円盤が出来た後** DMが中心に引き込まれ, 観測をよく再現する



ありがとうございました