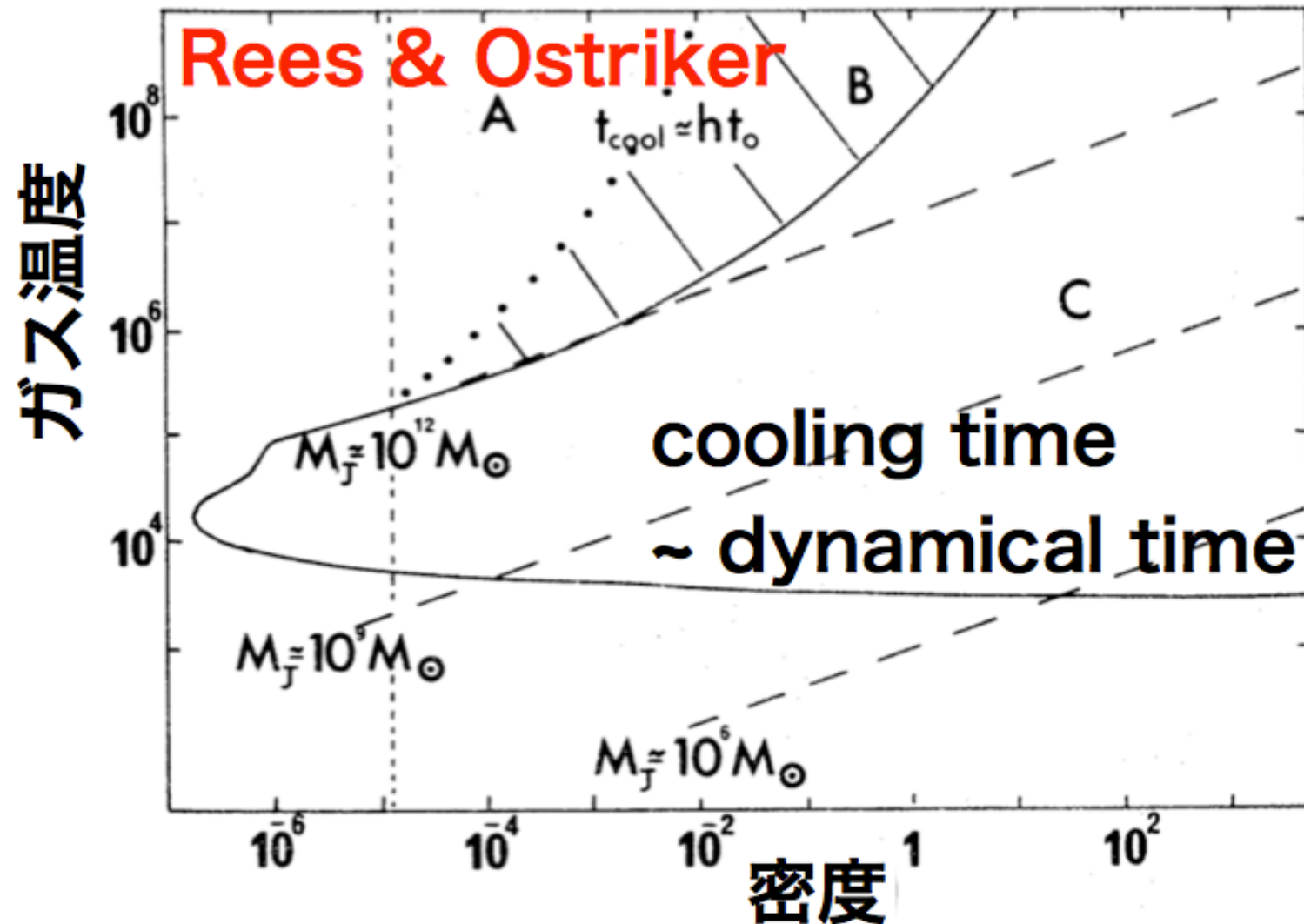


観測的宇宙論5

暗黒物質の性質

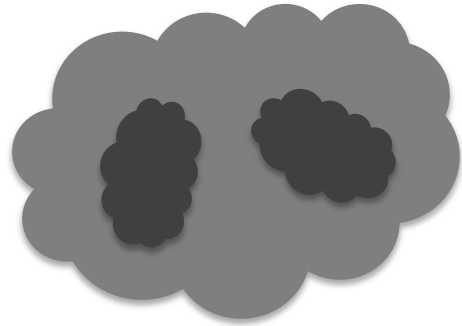
銀河形成の復習

銀河の大きさになぜ上限があるのか

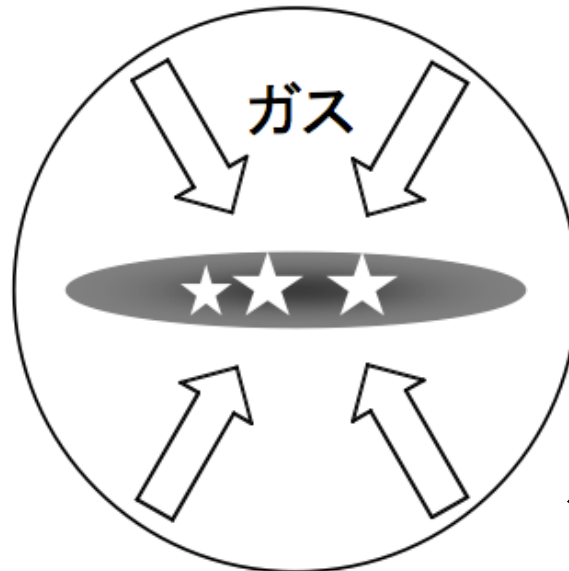


それがどうやって起こるのか

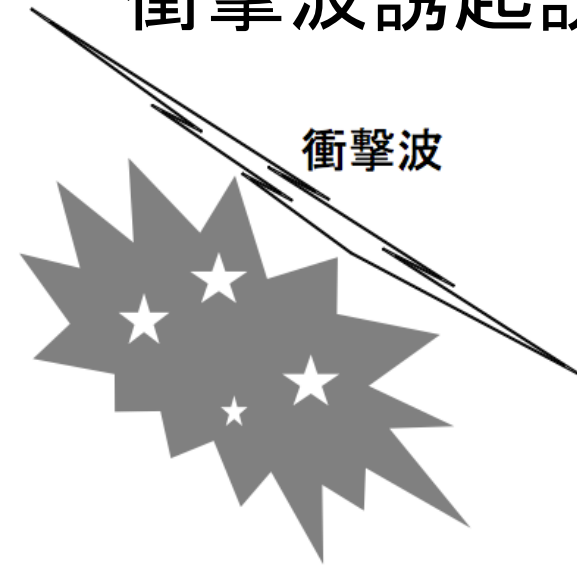
~1980まで



巨大なガス雲の
重力不安定性説



衝撃波誘起説

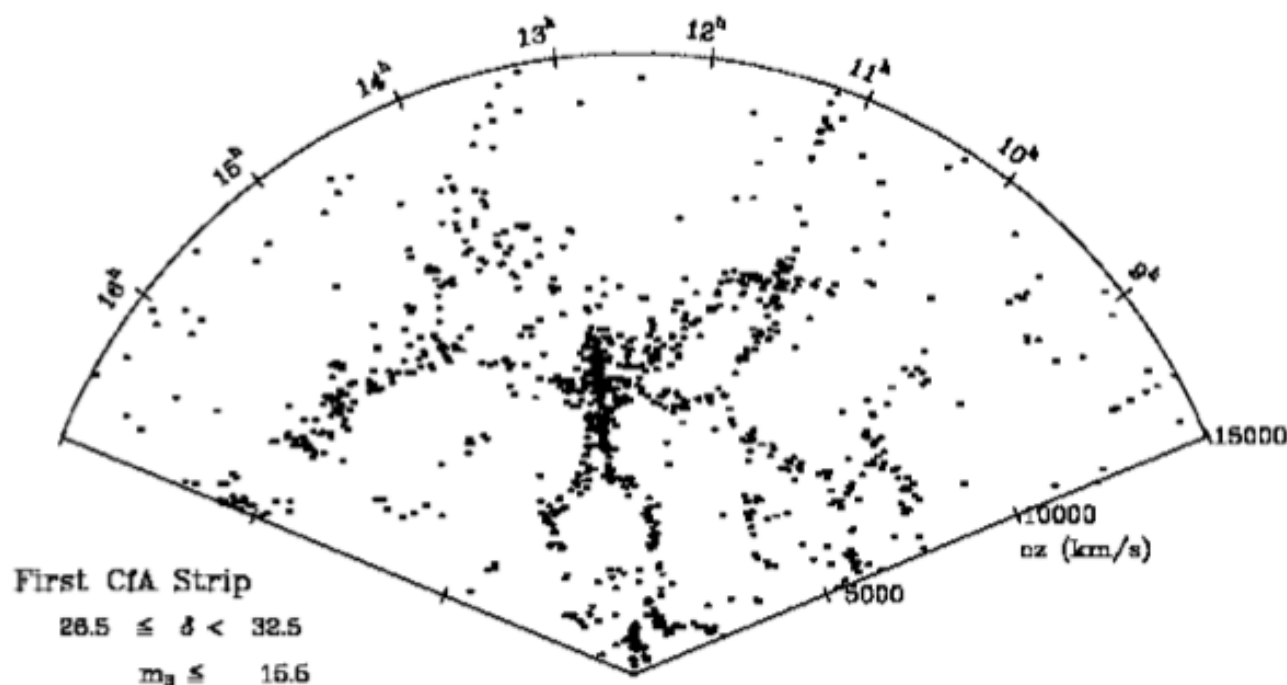


ダークハロー器説

決着は大規模構造で

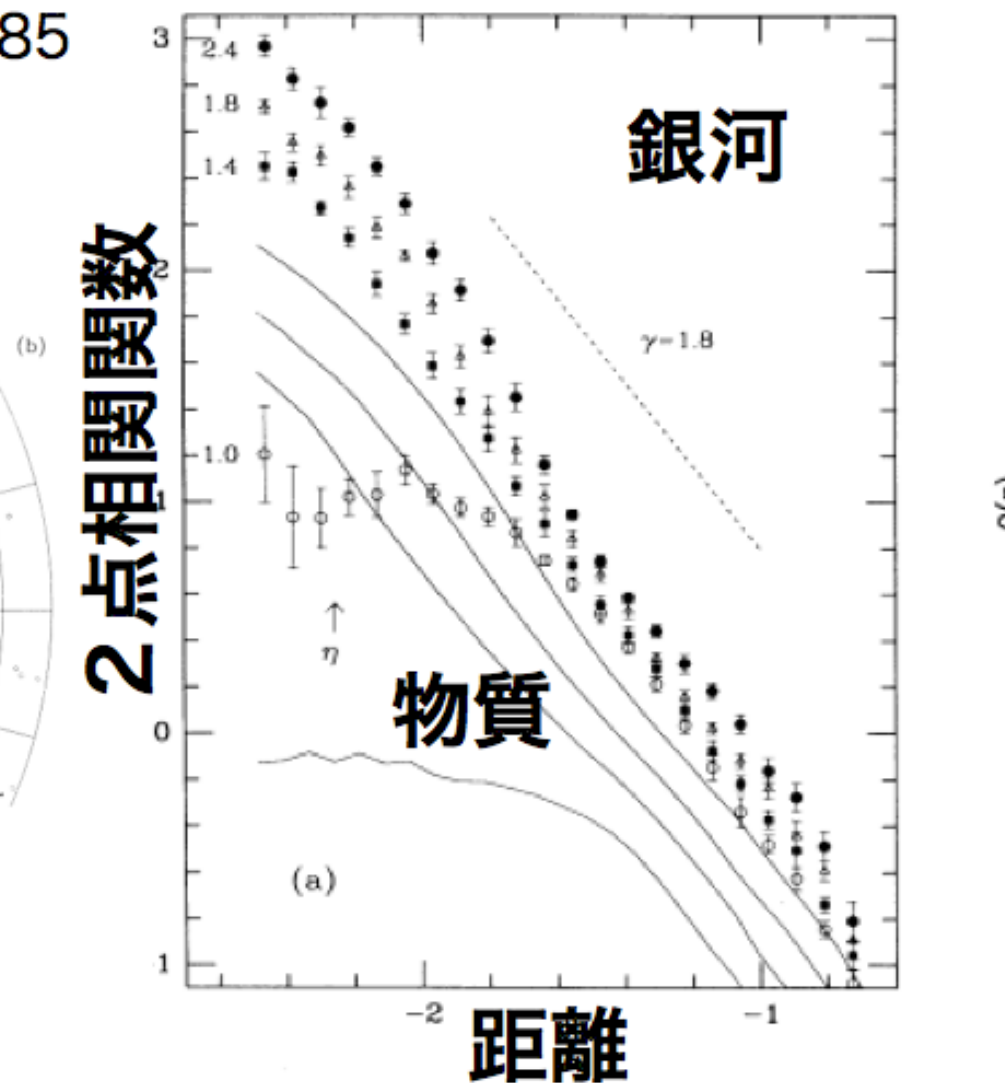
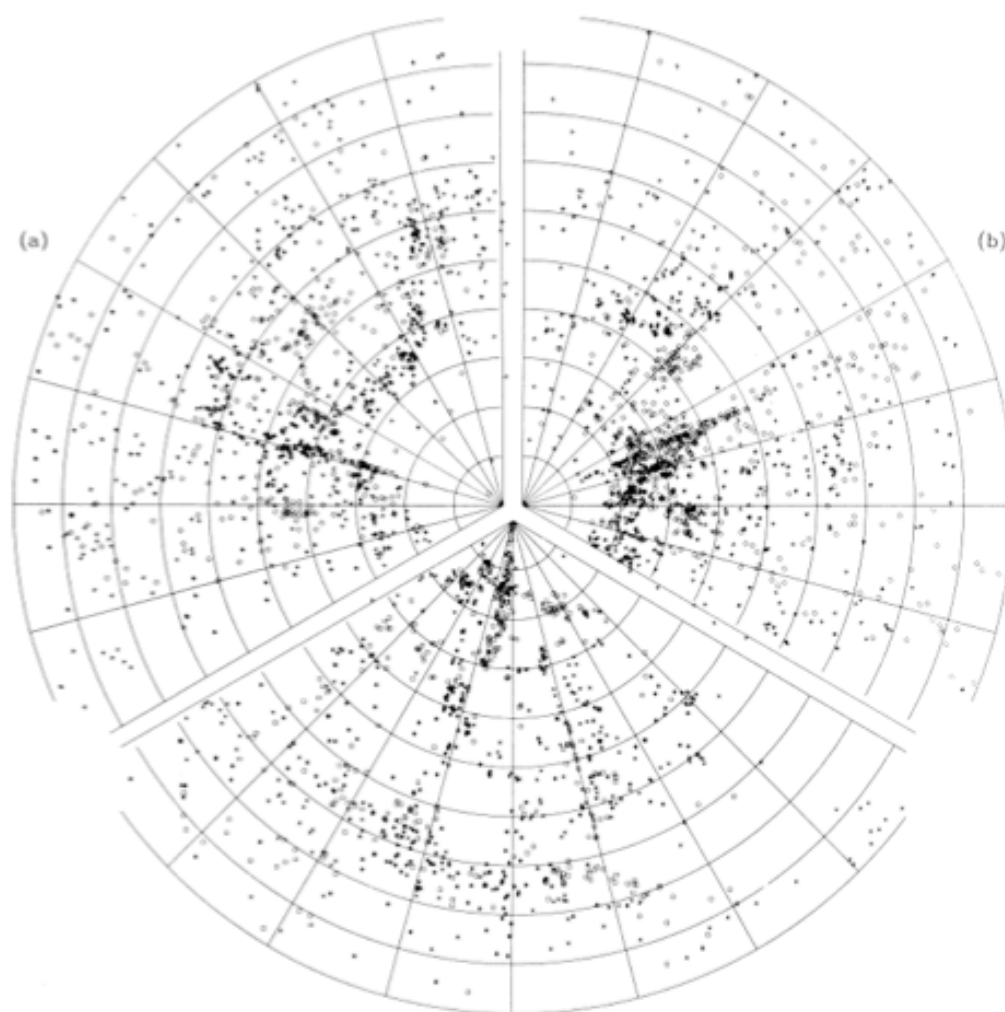
←形成現場を見たわけではない

CfA galaxy redshift survey in early 80's



Inflation + Cold Dark Matter

Davis, Efstathiou, Frenk, White 85



ちなみに

Inflation + Hot Dark Matter does not work...

CLUSTERING IN A NEUTRINO-DOMINATED UNIVERSE

SIMON D. M. WHITE,^{1, 2} CARLOS S. FRENK,¹ AND MARC DAVIS^{1, 3}

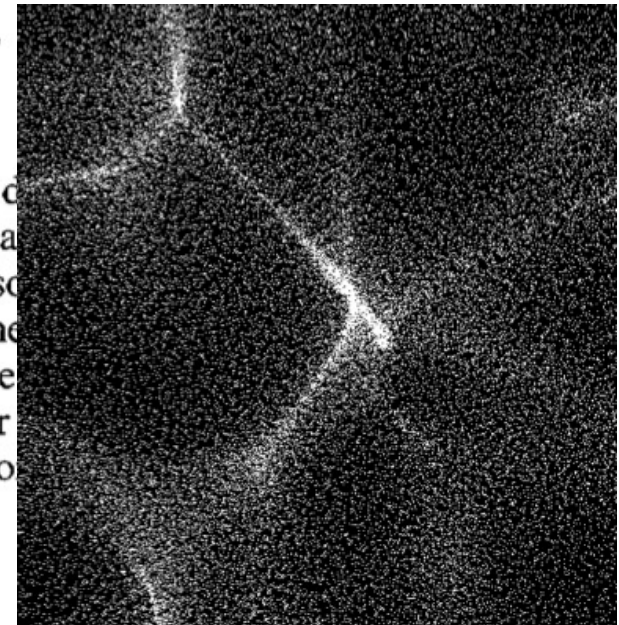
University of California, Berkeley

Received 1983 June 17; accepted 1983 July 1

ABSTRACT

We have simulated the nonlinear growth of structure in a universe dominated by neutrinos, using initial conditions derived from detailed linear calculations of each component. We used a direct N -body integrator and on a fast Fourier transform Poisson solver. The results show that the coherence length of the neutrino distribution at early times is much larger than that of the matter distribution, and thence to the present density of the universe. We find that the model is inconsistent with the observed clustering scale of galaxies if other parameters remain within their accepted ranges. The conventional neutrino-dominated model is ruled out.

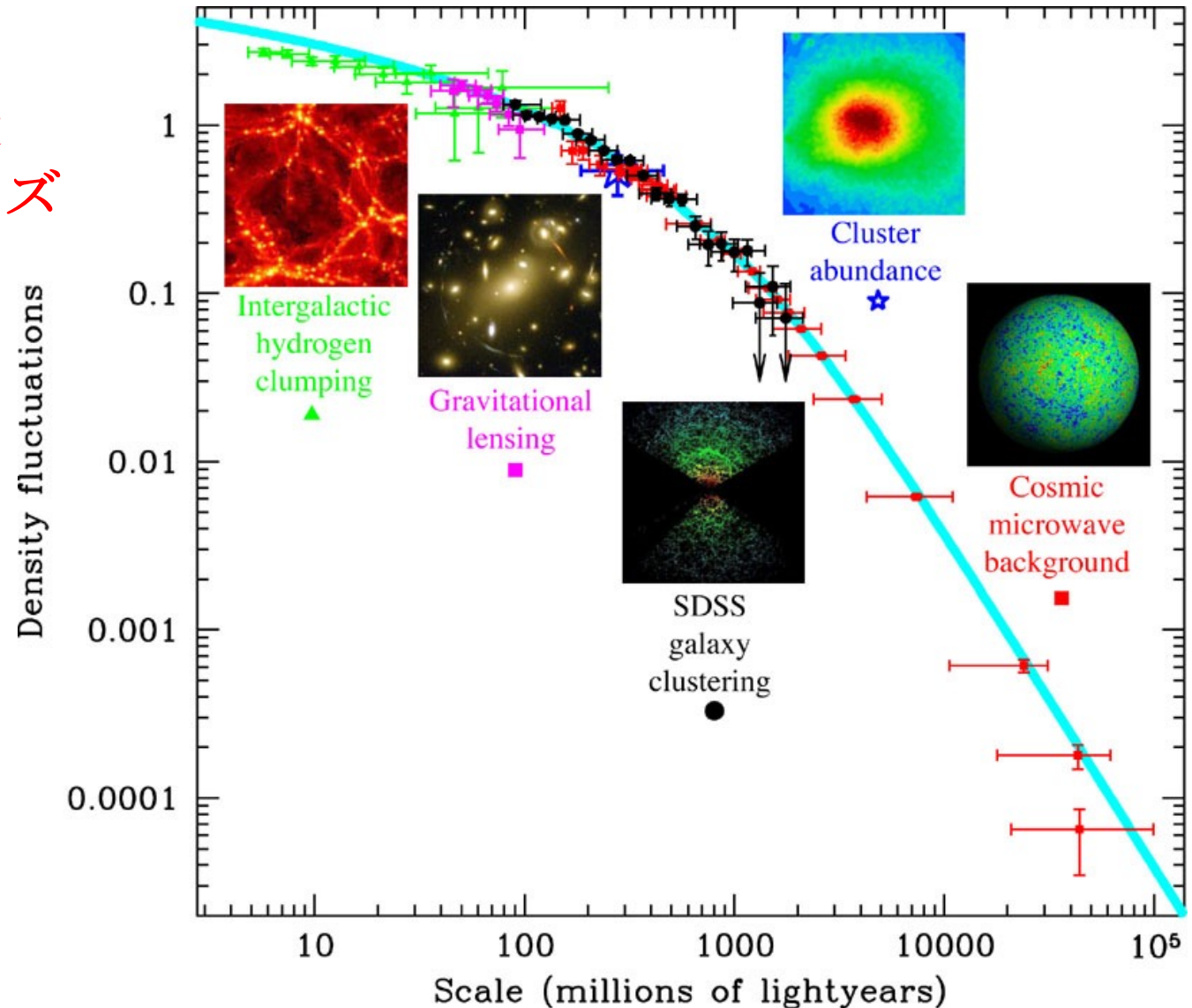
Subject headings: cosmology — galaxies: clustering — neutrinos



ニュートリノを暗黒物質とすると銀河の2点相関関数が大きなスケールで大きすぎる

Λ + Cold Dark Matter model

標準宇宙モデルは
宇宙の大規模構造
(およそ銀河サイズ
以上) を非常
によく再現する



ダークマターの性質

熱い

宇宙初期に他の物質との相互作用
がなくなった時点で相対論的であったもの

粒子の動きが猛烈に速かったもの

初期の物質分布

冷たい

、、、非相対論的であったもの

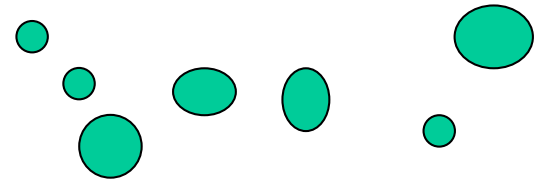
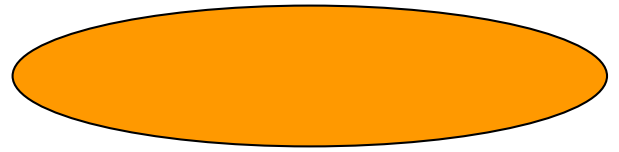
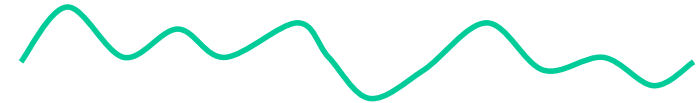
粒子の乱雑な動きがほとんど
なかったもの

多くの小さい塊

熱い

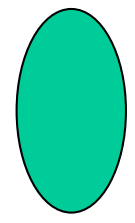
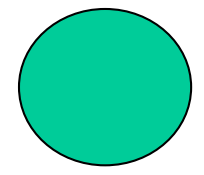
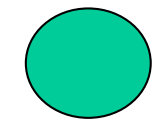
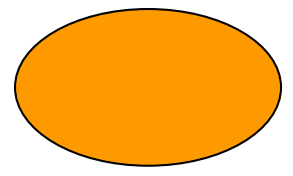
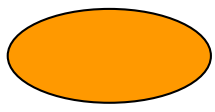
冷たい

昔



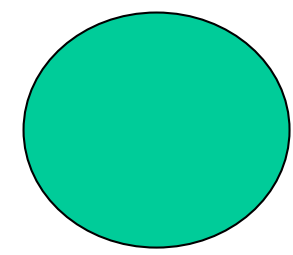
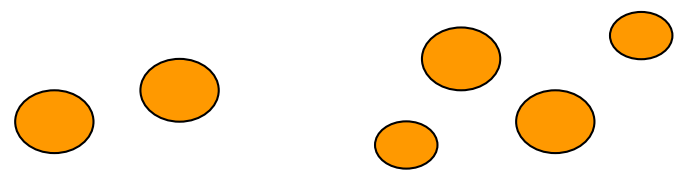
分裂

合体



さらに分裂

さらに合体



今

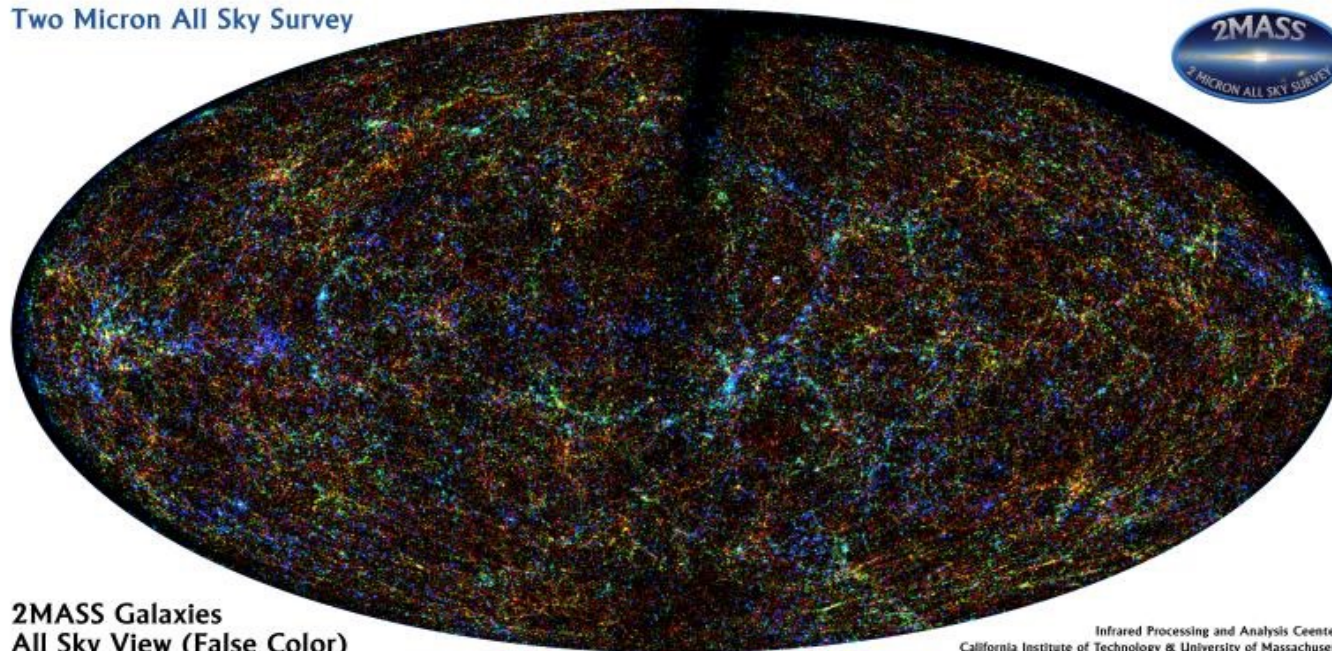
階層的構造形成

ダークマターの性質と構造の進化

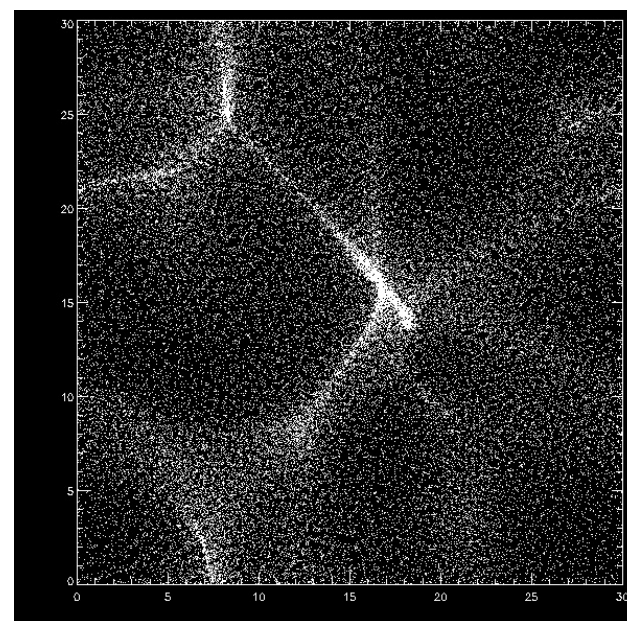
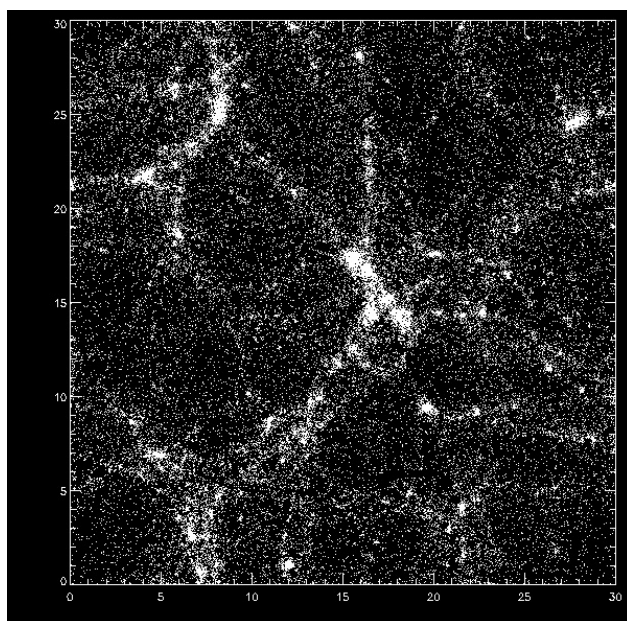
Two Micron All Sky Survey



初期



現在



ダークマター発見の歴史

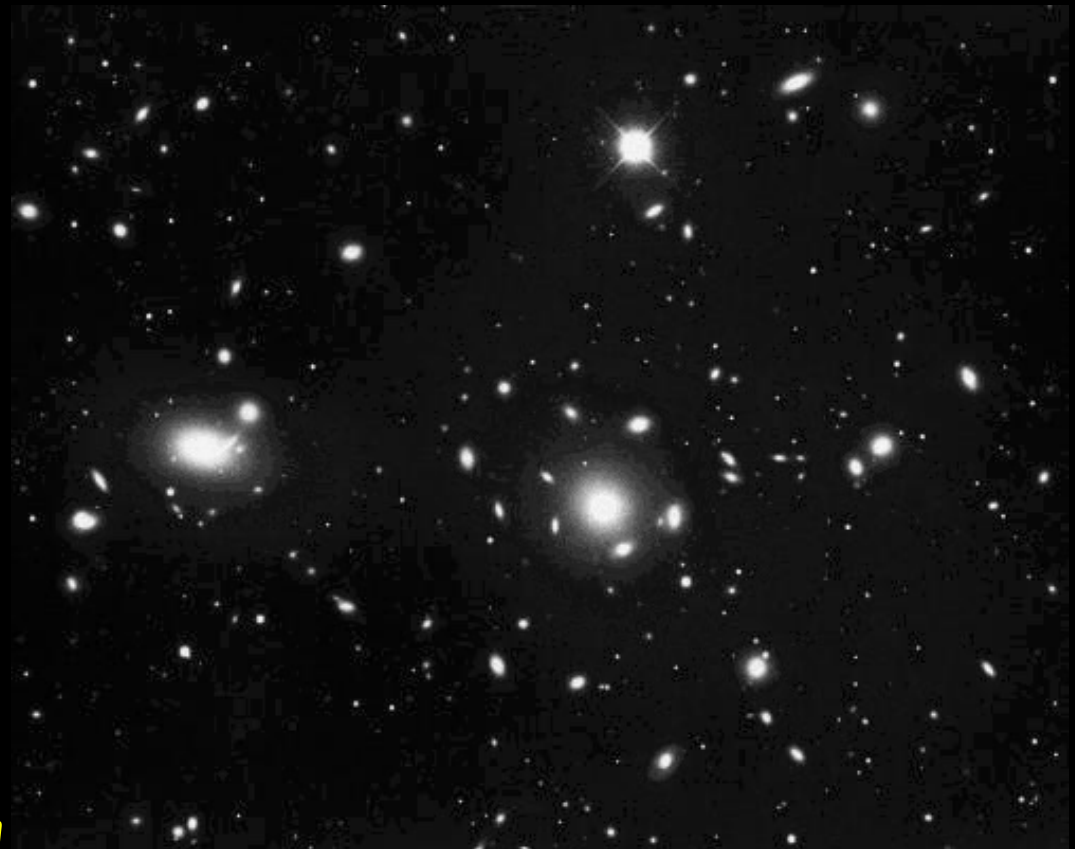


スイス人天文学者 フリッツ ツビッキー

髪の毛座銀河団の「重さ」を測った



秒速1000キロメートル!

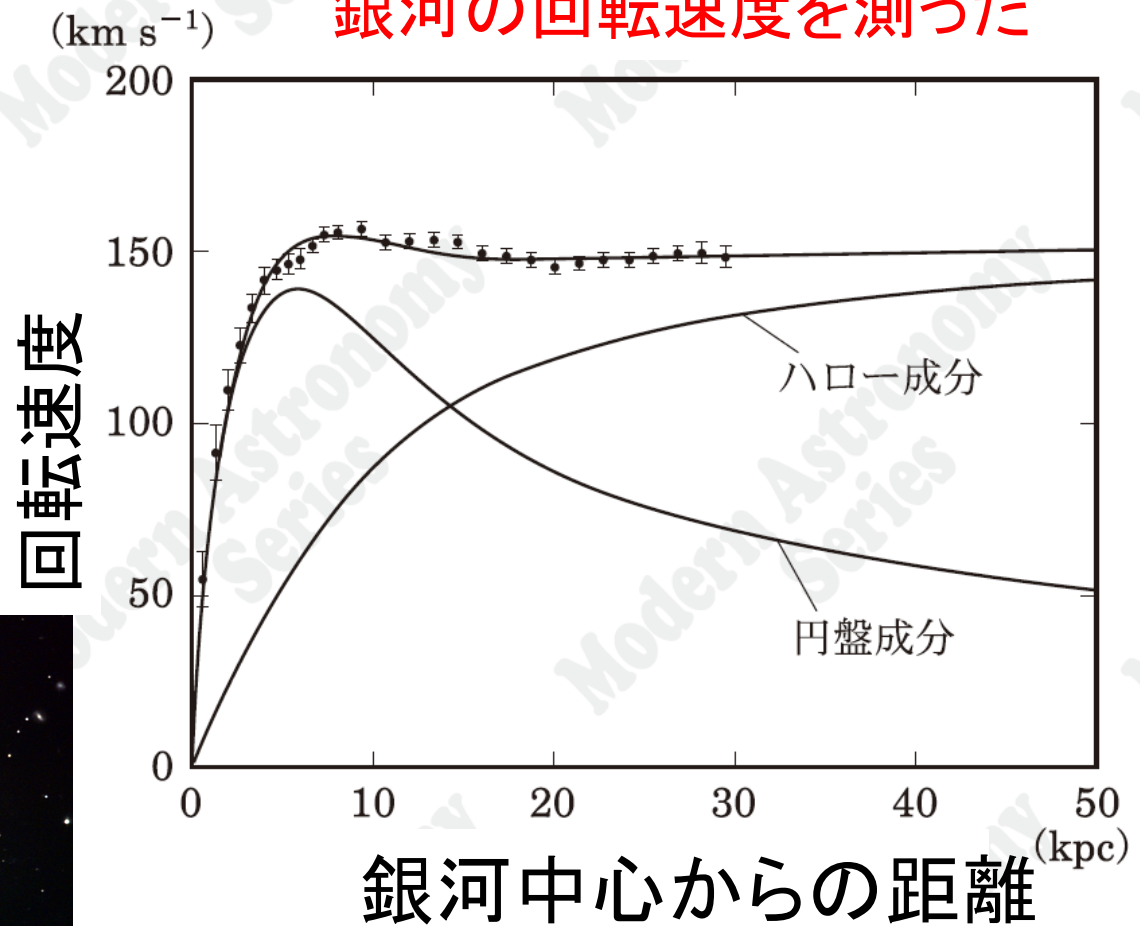


銀河の回転：見えない重力源



アメリカの女性天文学者
ベラ ルービン博士

銀河の回転速度を測った



中心から十分遠くにいても速く回転している！



MILKY WAY



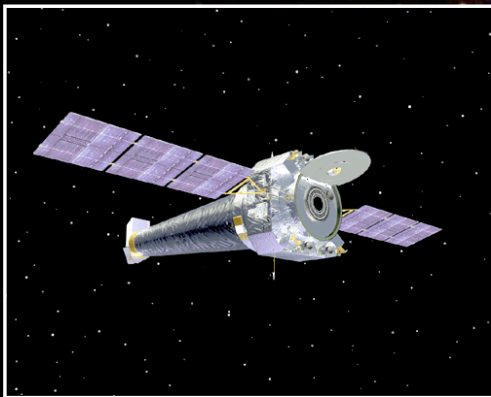
LMC



SMC

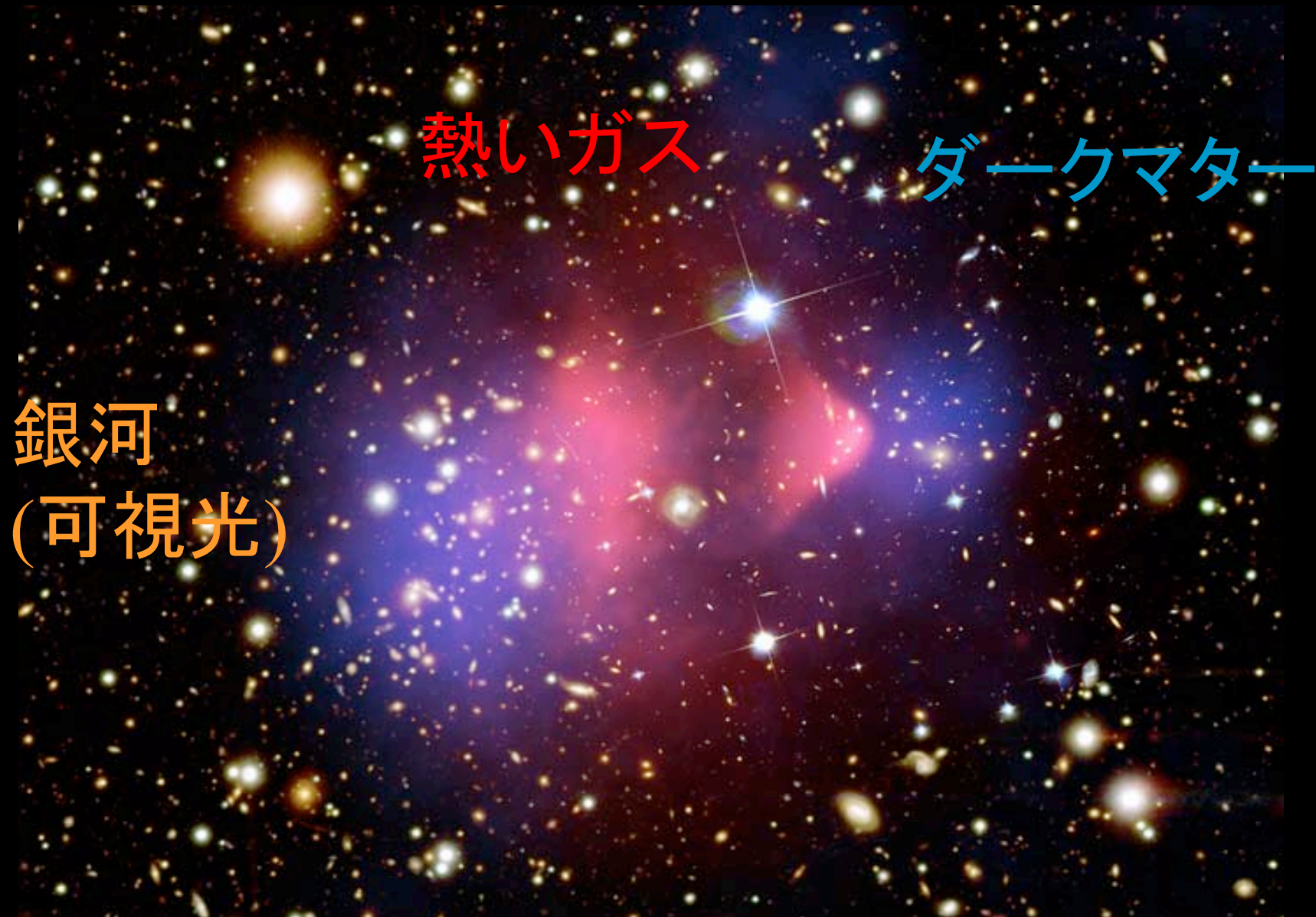
銀河を取り囲む
ハロー

銀河団を取り巻くダークマター



チャンドラX線望遠鏡

衝突銀河団

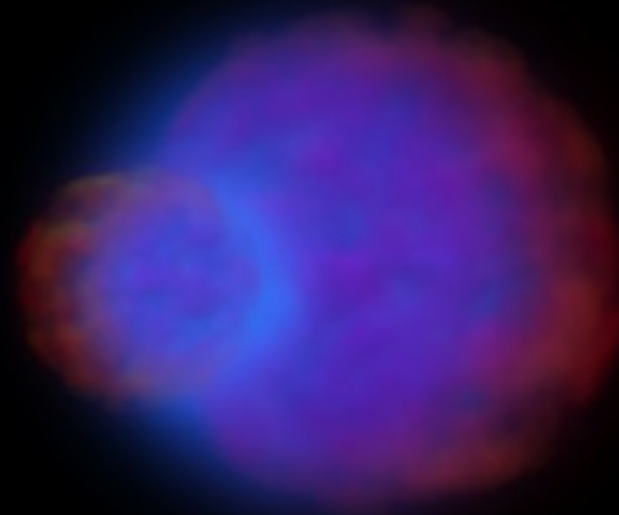


1

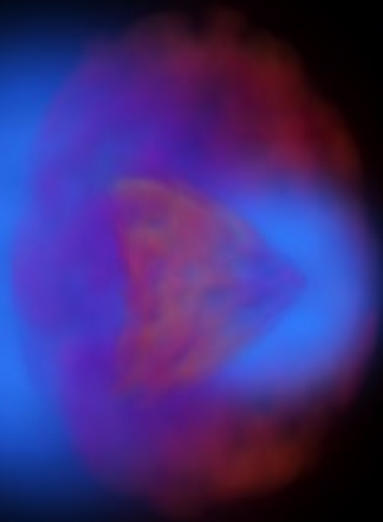


秒速4500km(!) で衝突

2

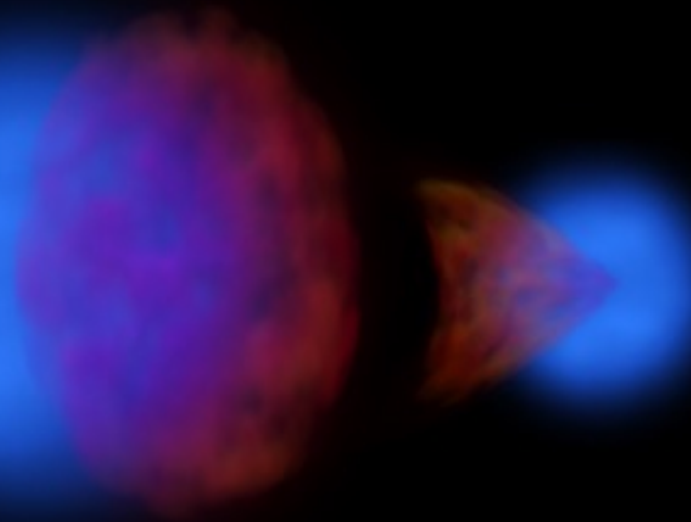


3



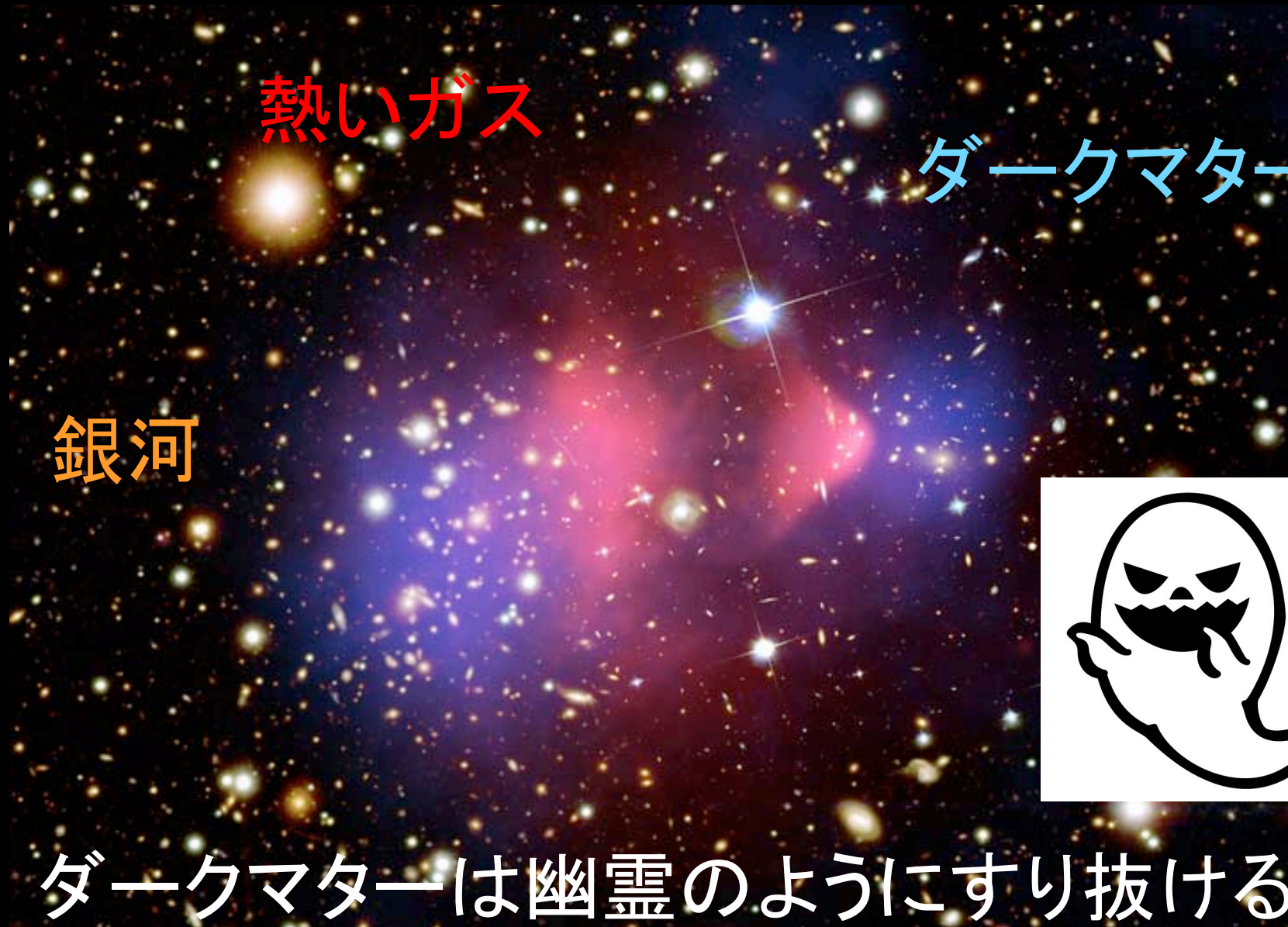
4

互いをすりぬけるダークマター





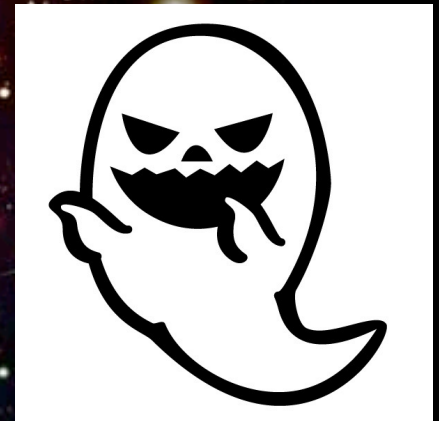
ガスの分布と物質の分布



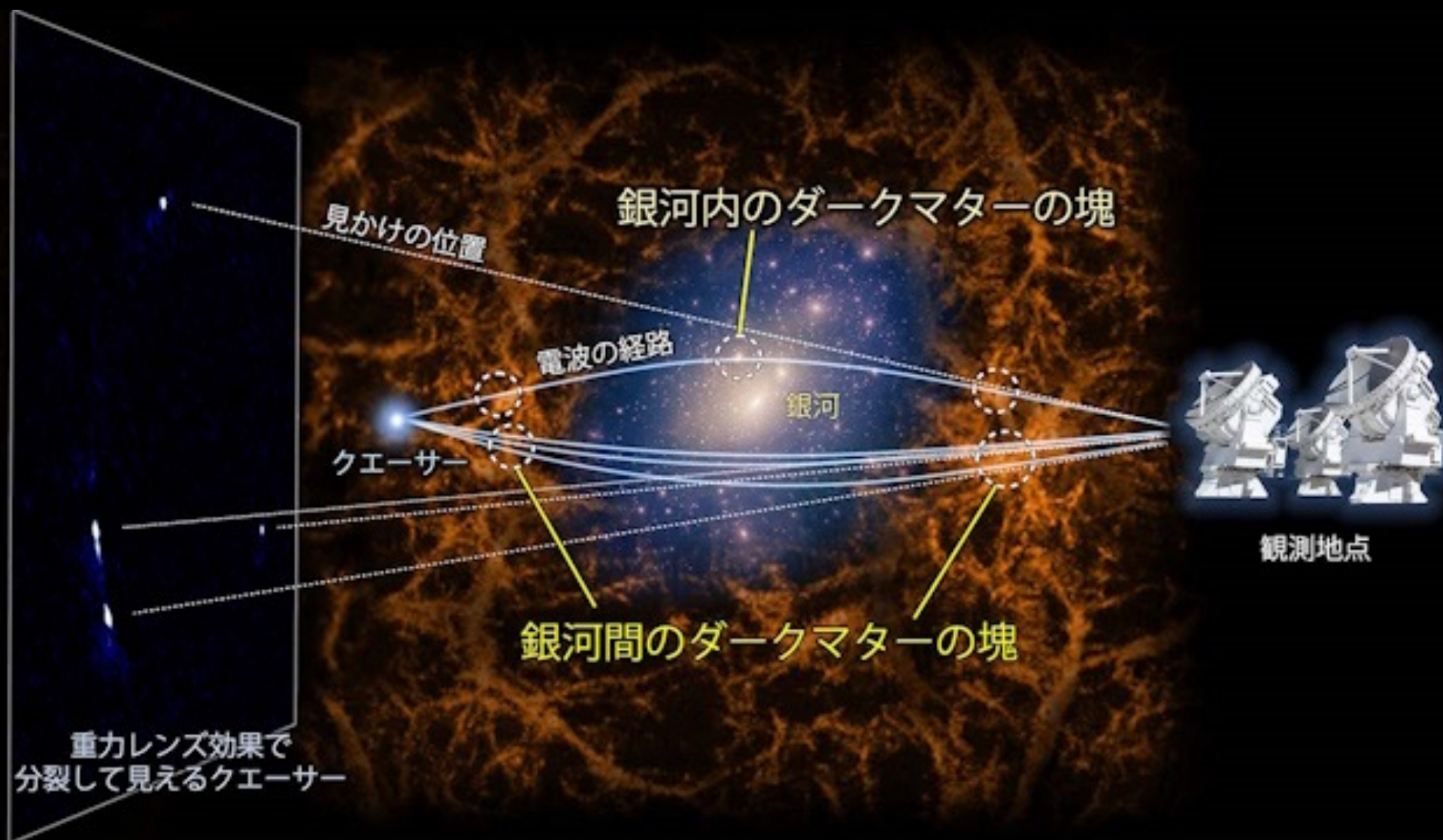
熱いガス

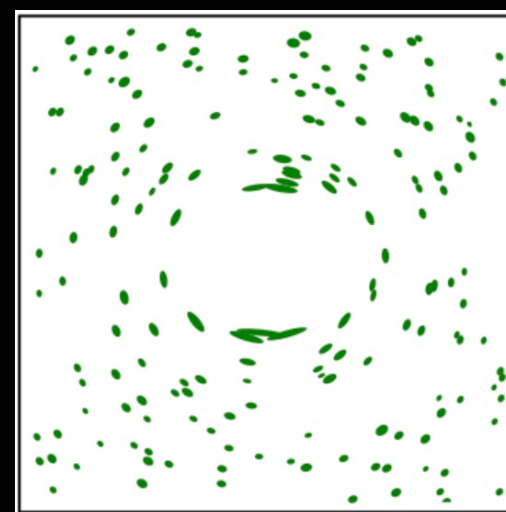
ダークマター

銀河



ダークマターは幽霊のようにすり抜ける





ダークマターの候補

- 質量をもつニュートリノ
- 褐色矮星
- きわめて暗い恒星, 浮遊惑星
- 未知の素粒子
 アクシオン、ニュートラリーノ
- ブラックホール

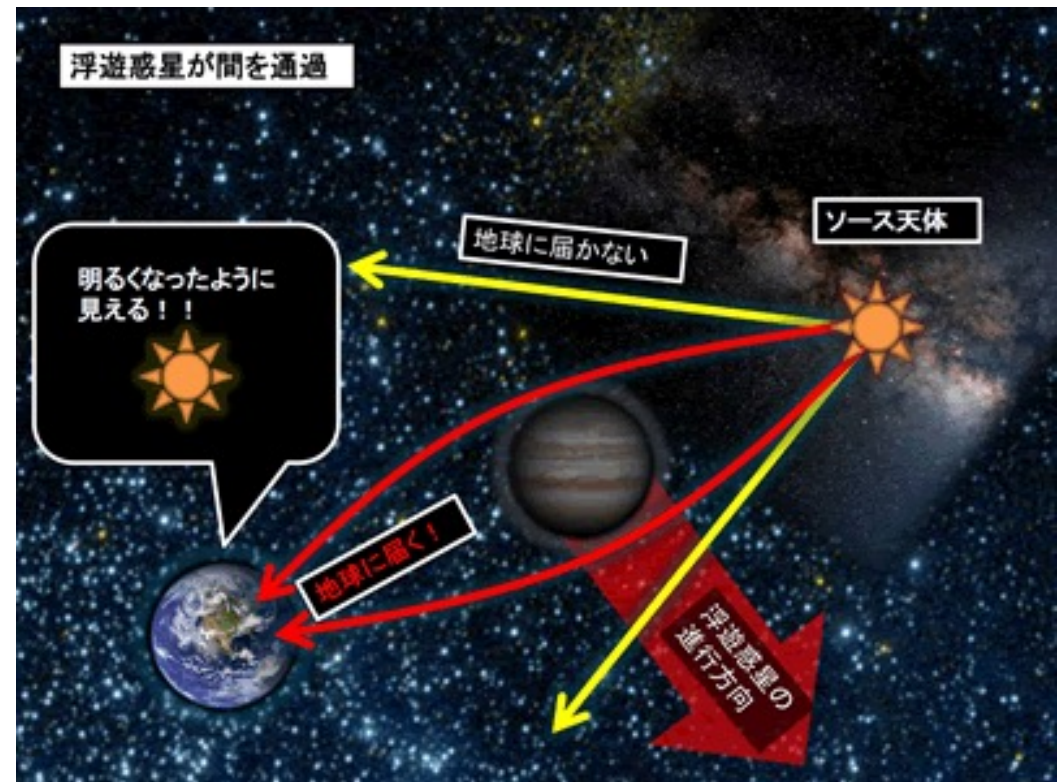
浮遊惑星



星のどれかの周りを巡るのではなく、銀河系をふらふらしている惑星

なんと、銀河系に
数千億個!
恒星の2倍ほど!

大阪大学 住准教授ら(2010)



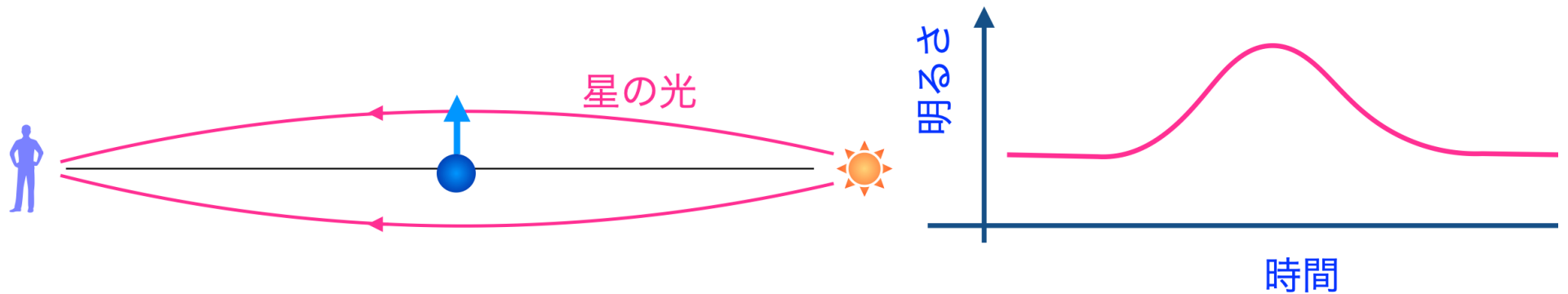
原始ブラックホール



- ホーキング博士(S. Hawking)が
1971年に予言
- 星の進化の最終で作られるBHと異なり
0.00001 g から太陽の1000倍まで様々な質
量を持つ可能性
- 10^{15} g以上のBHは現在までに蒸発せずに
生き残っている(かも)

原始ブラックホールをさがす！

重力マイクロレンズ現象



ダークマターは原始ブラックホールではなさそう

B! 1

✕ ポスト

👍 いいね! 3

📌 Pocket 3

すばる望遠鏡で撮影したアンドロメダ座大銀河の画像解析から、重力マイクロレンズ現象が調べられた。その結果をもとに、ダークマターが原始ブラックホールではない可能性が高いことが観測的に初めて示された

【2019年4月】

宇宙にダークマターが効果などについていない。

ダークマターだ。ホー

🏠 ホーム ▶ 天文 ▶ やはり未知の素粒子か。ダークマターは原始ブラックホールでもなかった

天文

🔍 ブラックホール

🏛️ 国立天文台

🔍 すばる望遠鏡

🔍 ダークマター

🔍 初期宇宙

やはり未知の素粒子か。ダークマターは原始ブラックホールでもなかった

📅 2019-04-02 🔄 2022-10-13

 sorae編集部

TECH+ > テクノロジー > 宇宙・航空 > ダークマターの正体、原始ブラックホールではない可能性高まる - Kavli IPMU

ダークマターの正体、原始ブラックホールではない可能性高まる - Kavli IPMU

掲載日 2019/04/02 19:28

著者：小林行



宇宙

Kavli IPMU

東京大学

ブラックホール

素粒子ダークマター

Hot dark matter

ニュートリノ

Warm dark matter

グラビティーノ、不活性ニュートリノ

Cold dark matter

ニュートラリーノ、アクシオン

Crisis on Small Scales

1998 - 2010

- ・ 回転曲線と密度プロファイル
 - コア（観測）、カस्प（理論）
- ・ 衛星銀河の数とサブハローの量
 - 10（観測）、1000以上（理論）

暗黒物質

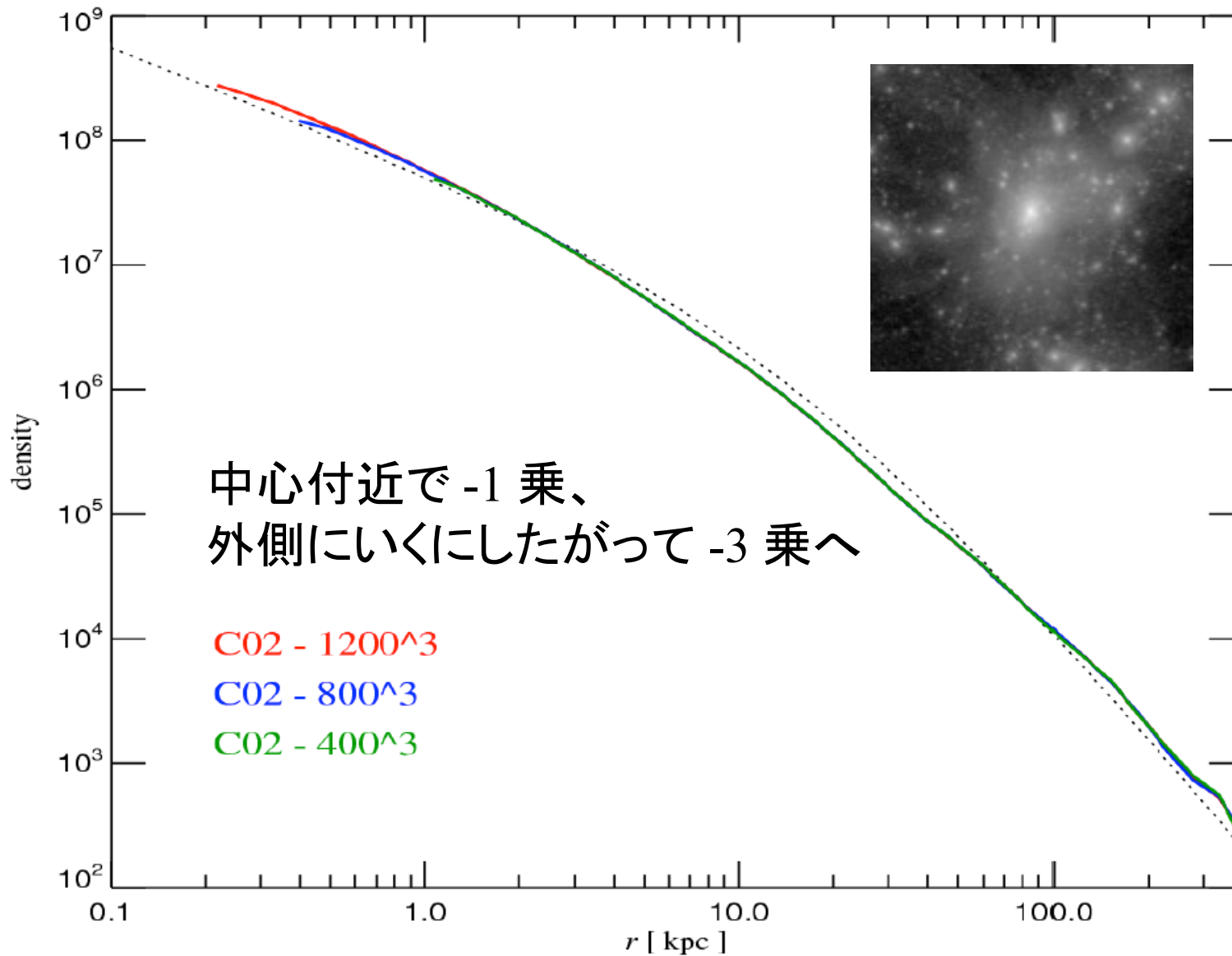
散乱、速度分散
初期密度揺らぎ

バリオン物質

フィードバック
（超新星、再電離）

ダークマターハローの構造

ハローの密度プロファイル



密度プロファイルの歴史

- 1991 Dubinski & Carlberg ($N = 100,000$)
CDMハローの密度は中心で発散する
- 1996 Navarro, Frenk, White ($N=1,000,000$)
力学的平衡にあるハローは中心付近
で r^{-1} のプロファイルを持つ
- 1999 Moore et al. ($N=1,000,000$ per halo)
中心付近の巾は-1より大きく、-1.5.

歴史の続き

2000 Jing & Suto ($N = 1,000,000$ per halo)

中心の巾は $-1.5 - -1.1$,

小さなハローほど大きい値の傾向

2004 Fukushige, Kawai, Makino ($N=30M$)

中心付近では $-1.2-1.3$

2004 Navarro et al.

本当の中心では -1 よりも大きな値！

現況

2008 Diemand et al. “Via Lactea II”

2008 Springel et al. “Aquarius”

$N = 10^9$ per halo

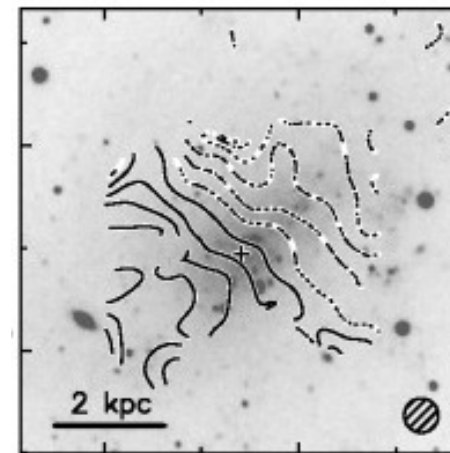
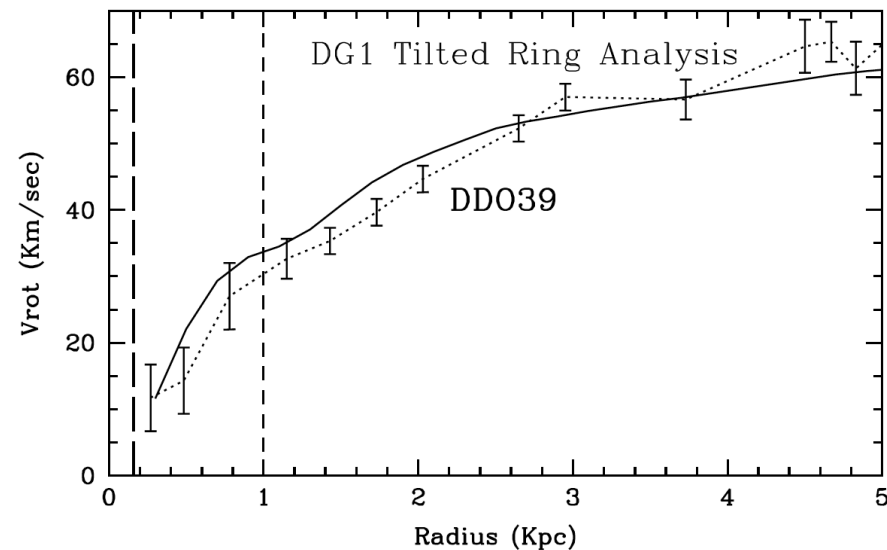
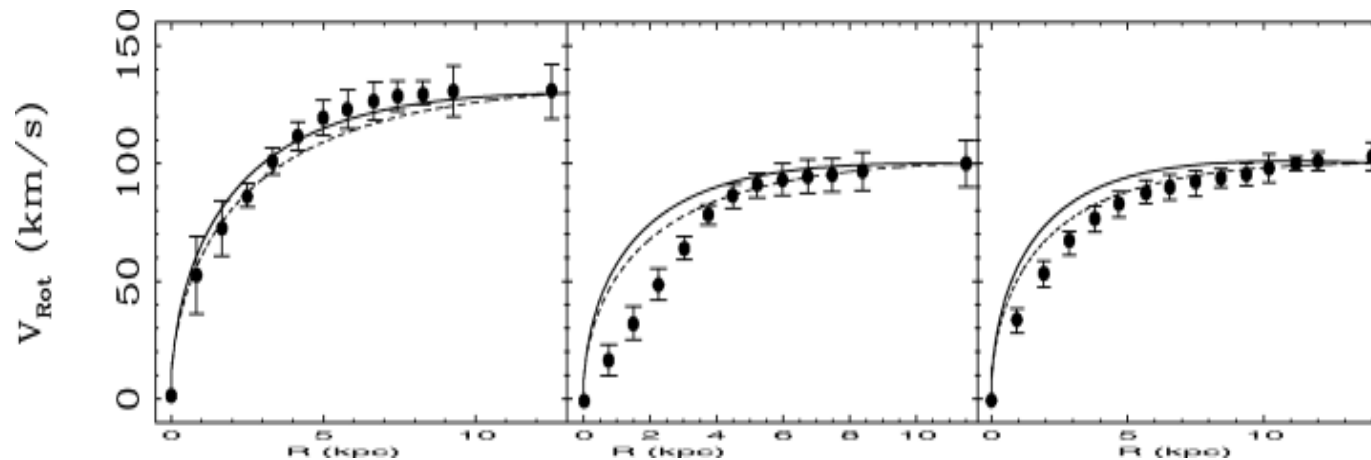
巾は半径にしたがって変化する。

中心に近くなるほど緩やかになる。

The cusp problem

矮小銀河、低輝度銀河の回転曲線

Swaters 2000



Crisis on Small Scales

1998 - 2010

- ・ 回転曲線と密度プロファイル
 - コア（観測）、カस्प（理論）
- ・ 衛星銀河の数とサブハローの量
 - 10（観測）、1000以上（理論）

暗黒物質

散乱、速度分散
初期密度揺らぎ

バリオン物質

フィードバック
（超新星、再電離）

CDMに基づく階層的構造形成



理論が一般に予言する事柄:

1. ほぼスケール不変

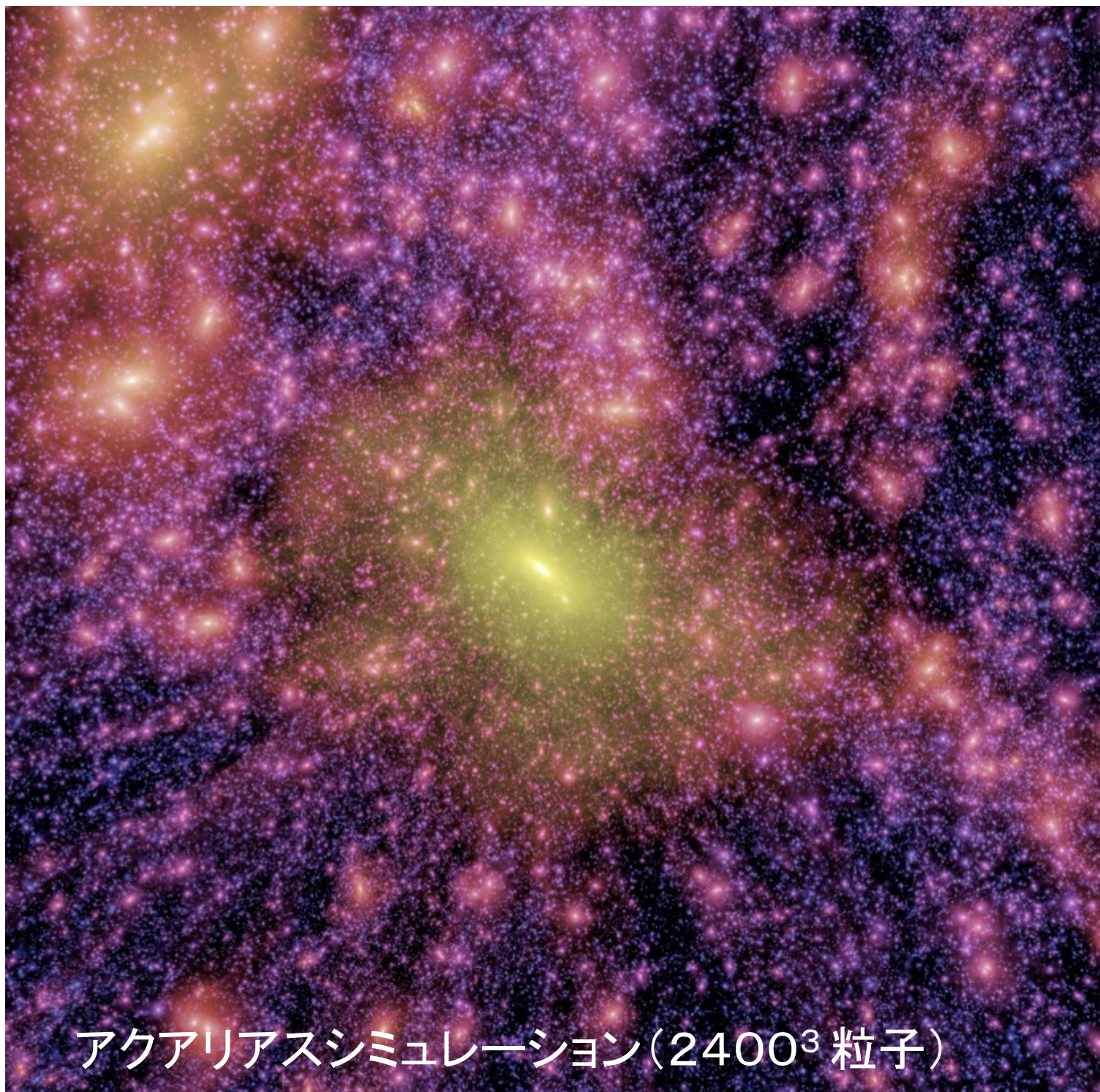
⇒ 銀河の中にも多くの部分構造

2. ボトムアップ型構造形成

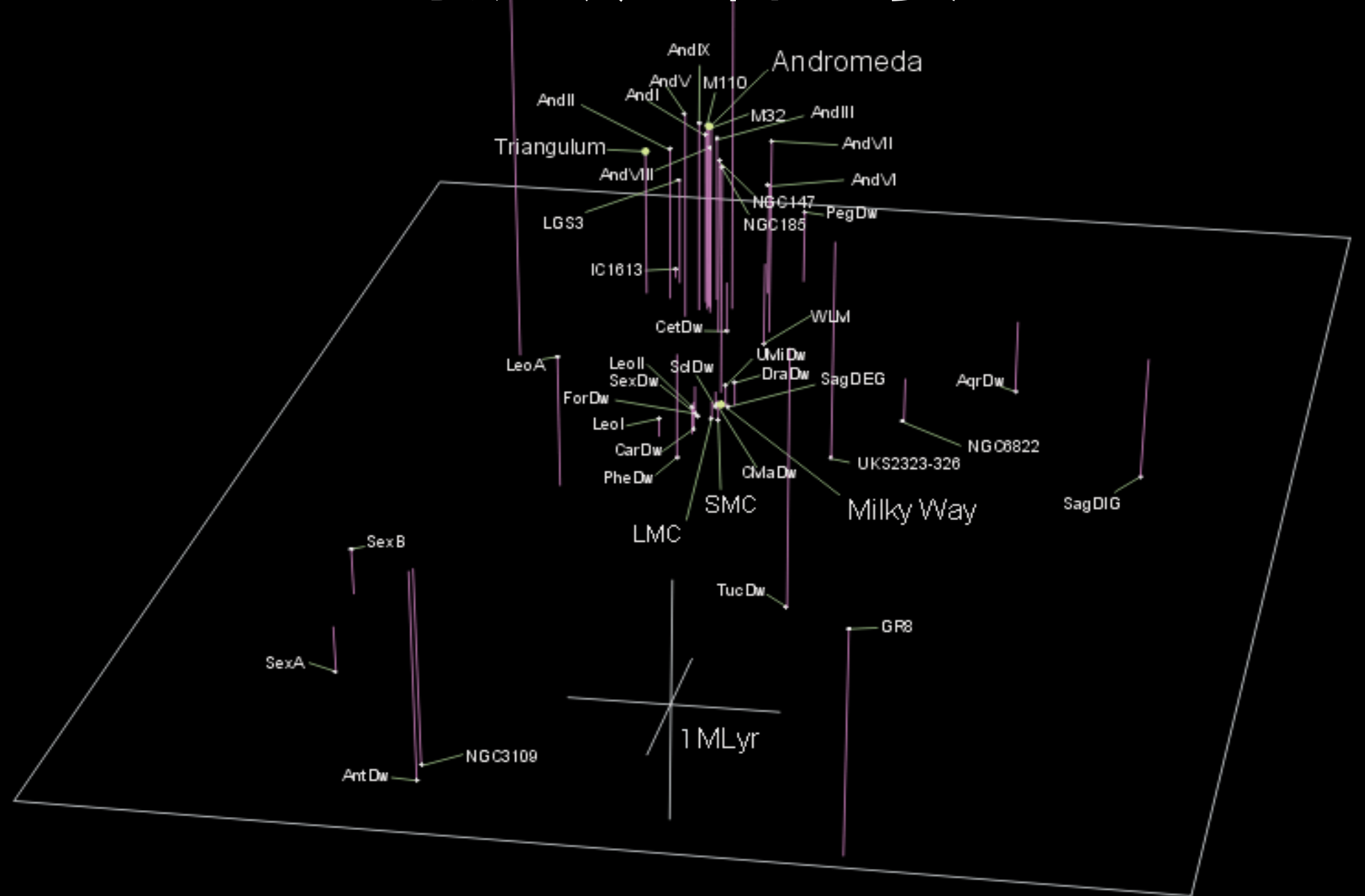
⇒ 合体が頻繁に起こる



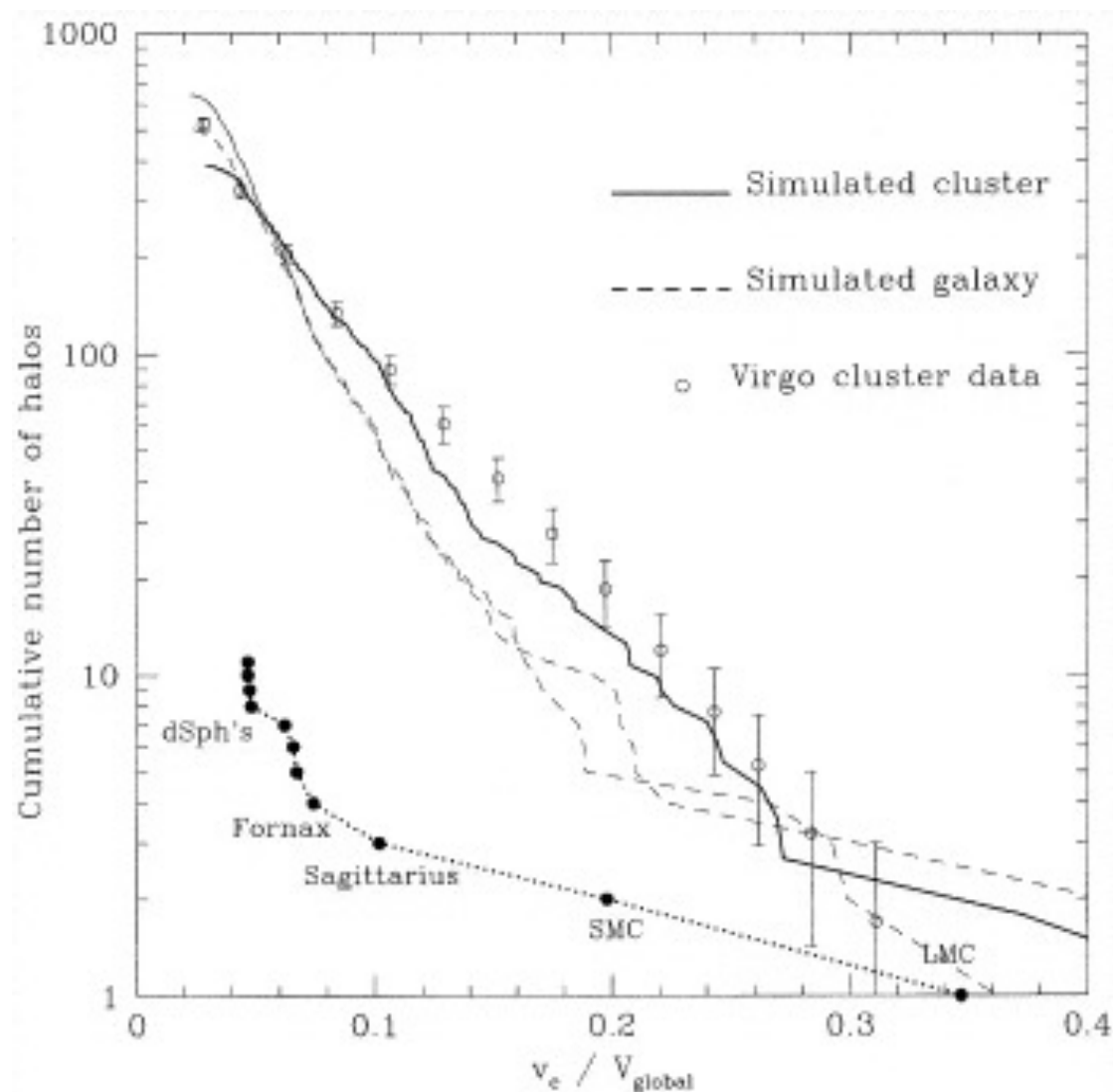
冷たい暗黒物質モデルの予言



局所銀河群の姿



衛星銀河の数



小ハロー内での星形成抑止

再電離原因説 Bullock et al. (2001) Benson et al. (2002) Kravtsov et al. (2003) Susa&Umemura (2004)

- 水素再電離時期($z \sim 6-10$)以降, 銀河間物質の温度が高く保たれ、それ以下の温度(質量)の天体ができなかった。
- 観測からは急な星形成休止の兆候は見られない
(e.g. Grebel & Gallagher 2004)

星形成フィードバック原因説 Dekel & Silk (1986)

- エネルギー注入によりガスが流出

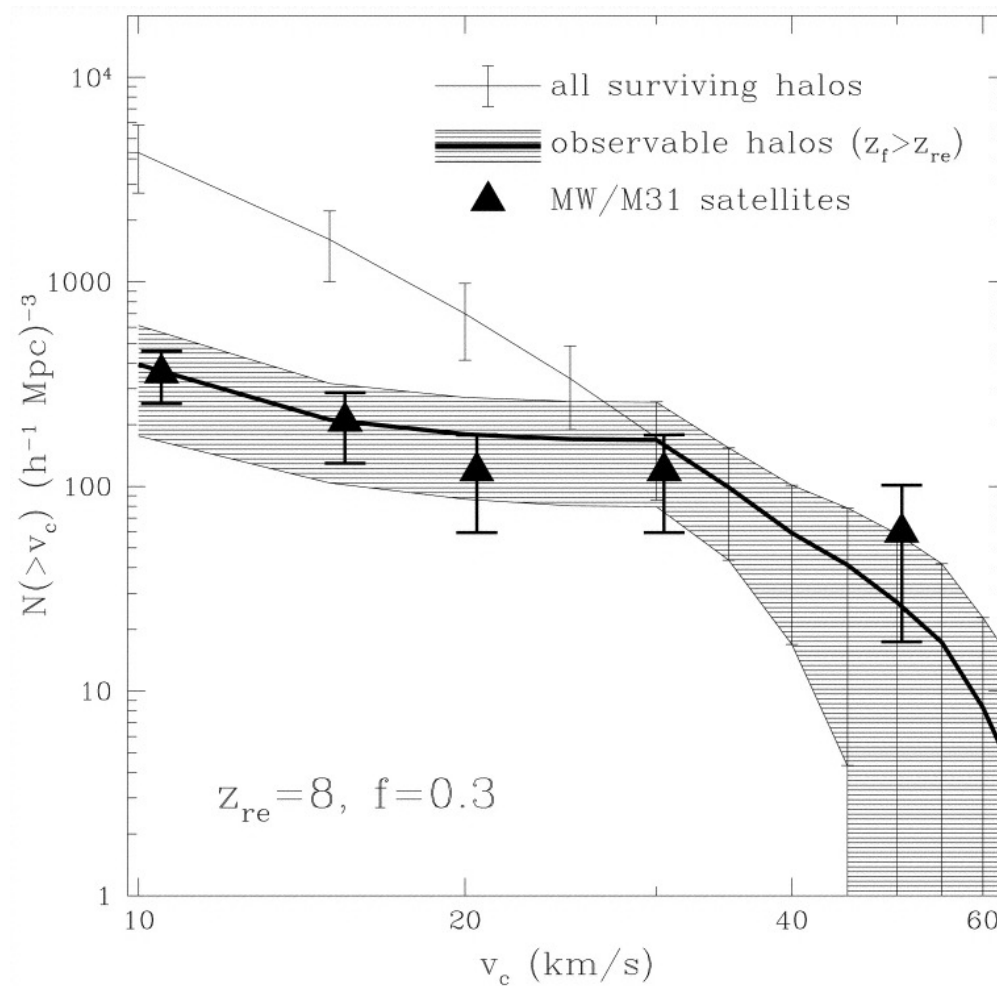
親ハロー内での早期ガスストリッピング原因説 Mayer et al. (2007)

おそらくどの機構もはたらいていた。

どれが主要か観測から決定的な証拠を得るのは難しい。

(衛星銀河の運動、動径方向分布、Helium再電離の痕跡)

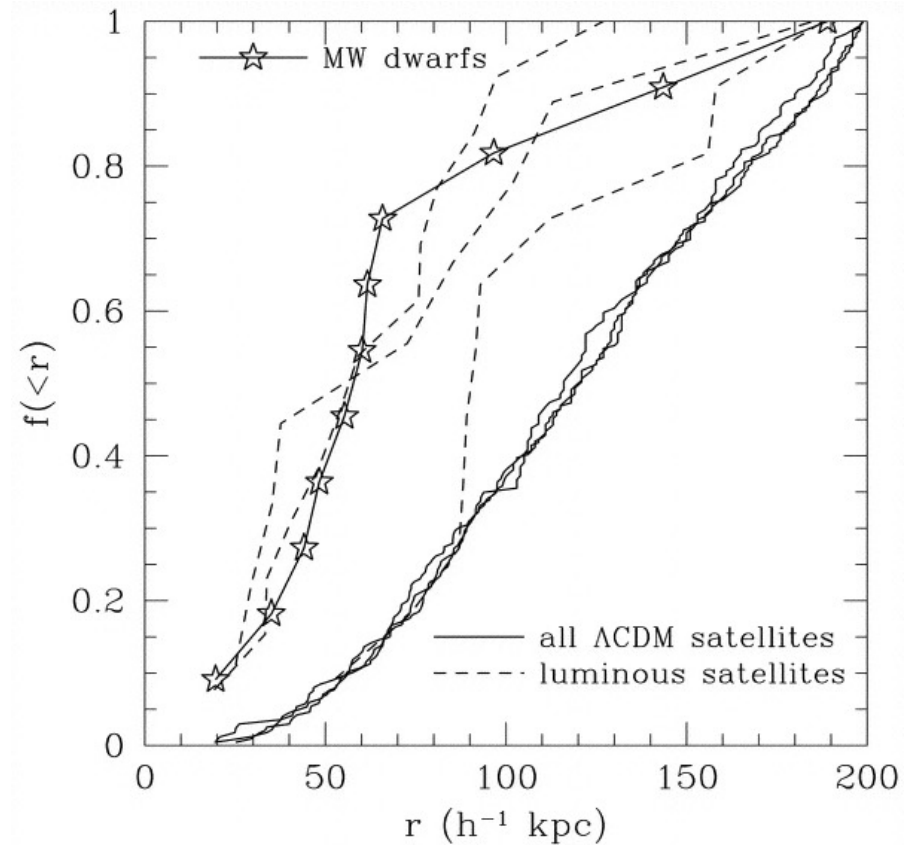
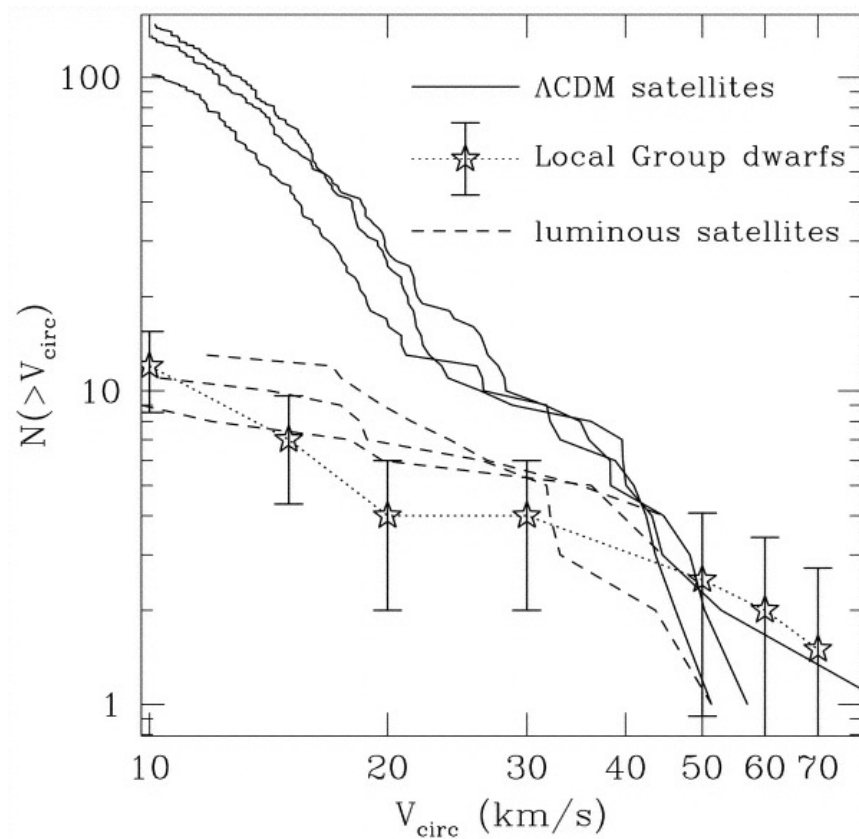
再イオン化原因説



Bullock et al. (2001)
Benson et al. (2002)
Kravtsov et al. (2003)

再イオン化時期以降
IGMの温度が高く
保たれ、それ以下の
温度(質量)の天体が
できなかった、とする説

同起源(?)の問題: 局所銀河群メンバー銀河の数と分布

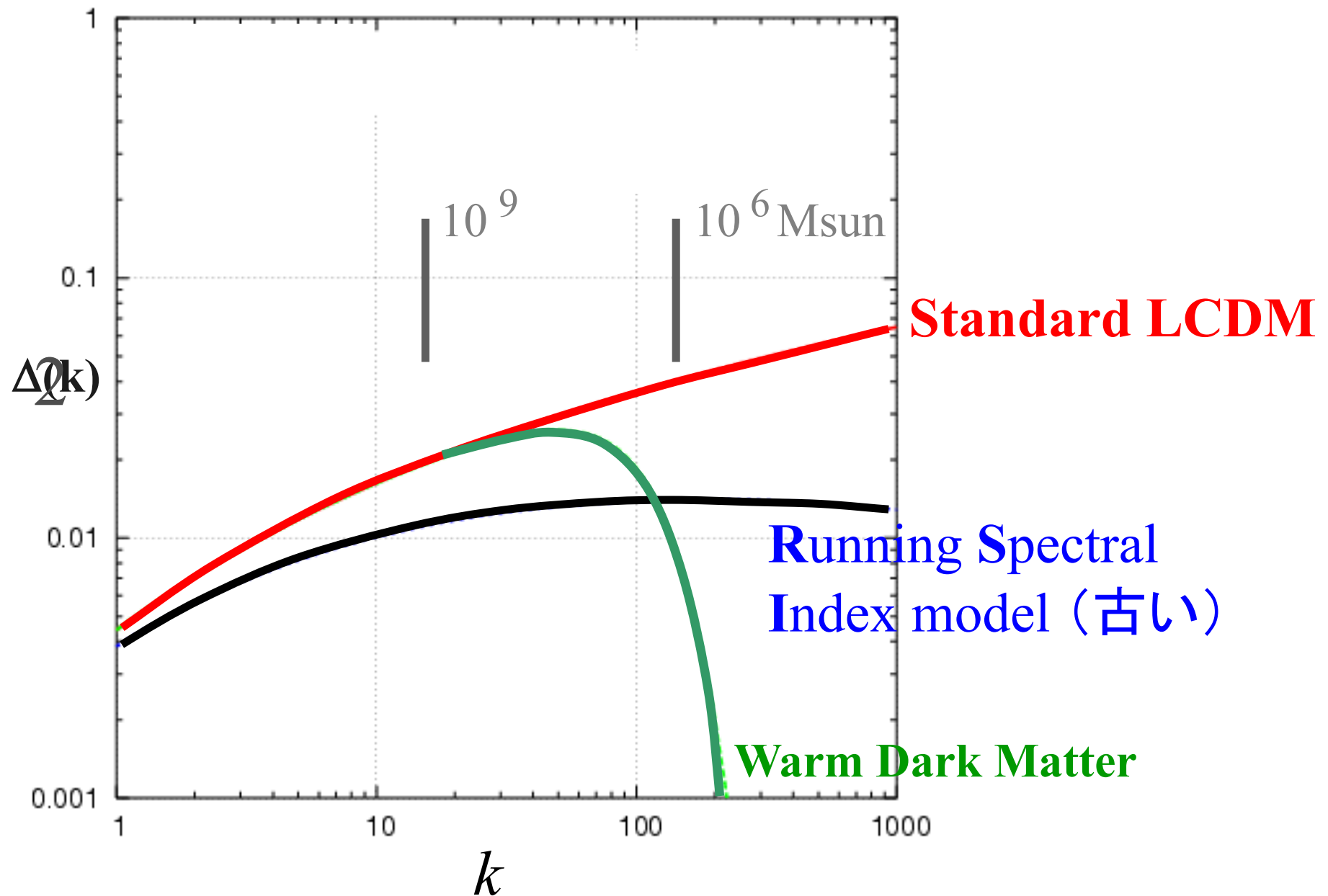


Kravtsov et al. (2004)

サブハロー問題解決策： ダークマター

- ダークマターは温かかった
- インフレーション場に変なことがおこった
- ダークマターは実は衝突する

小スケールでの密度揺らぎ



Warm dark matter

微少な熱速度を持つ暗黒物質
(Thermal relic, non-thermal どちらもある)

赤方偏移 Z での熱速度:

$$v_0(Z) \approx .012 (1 + Z) \left(\frac{\Omega_X}{0.3} \right)^{1/3} \left(\frac{h}{0.65} \right)^{2/3} \left(\frac{1.5}{g_X} \right)^{1/3} \left(\frac{\text{keV}}{m_X} \right)^{4/3} \text{ km s}^{-1}$$

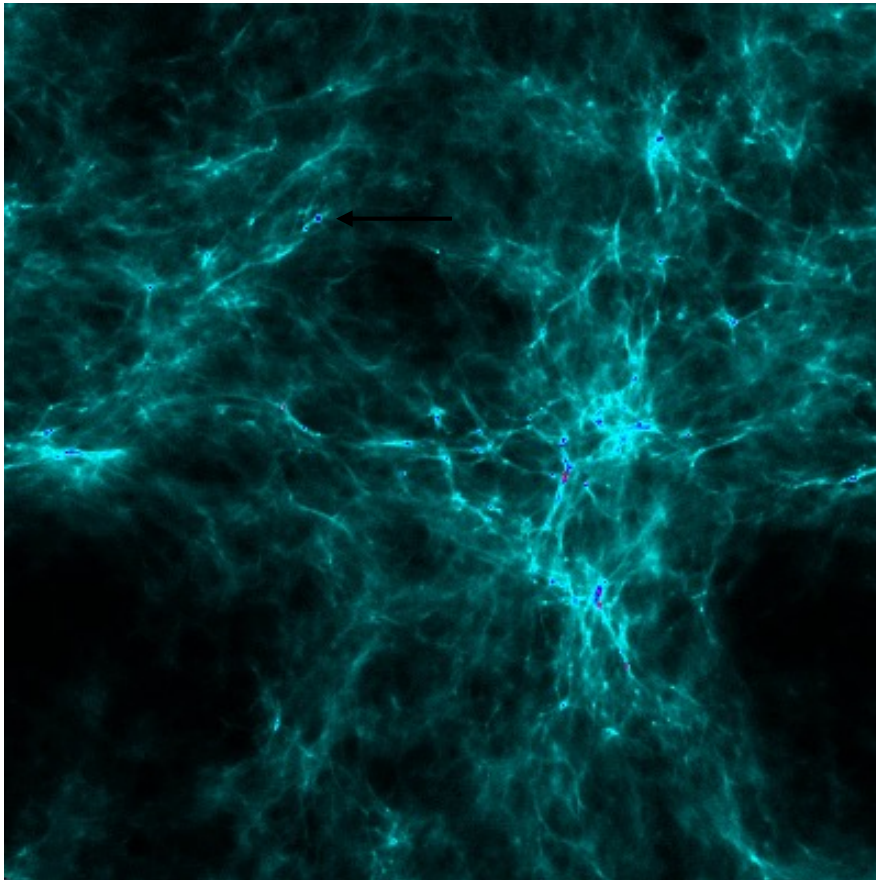
自由流減衰の長さスケール

$$R_S \approx 0.31 \left(\frac{\Omega_X}{0.3} \right)^{0.15} \left(\frac{h}{0.65} \right)^{1.3} \left(\frac{\text{keV}}{m_X} \right)^{1.15} h^{-1} \text{ Mpc} .$$

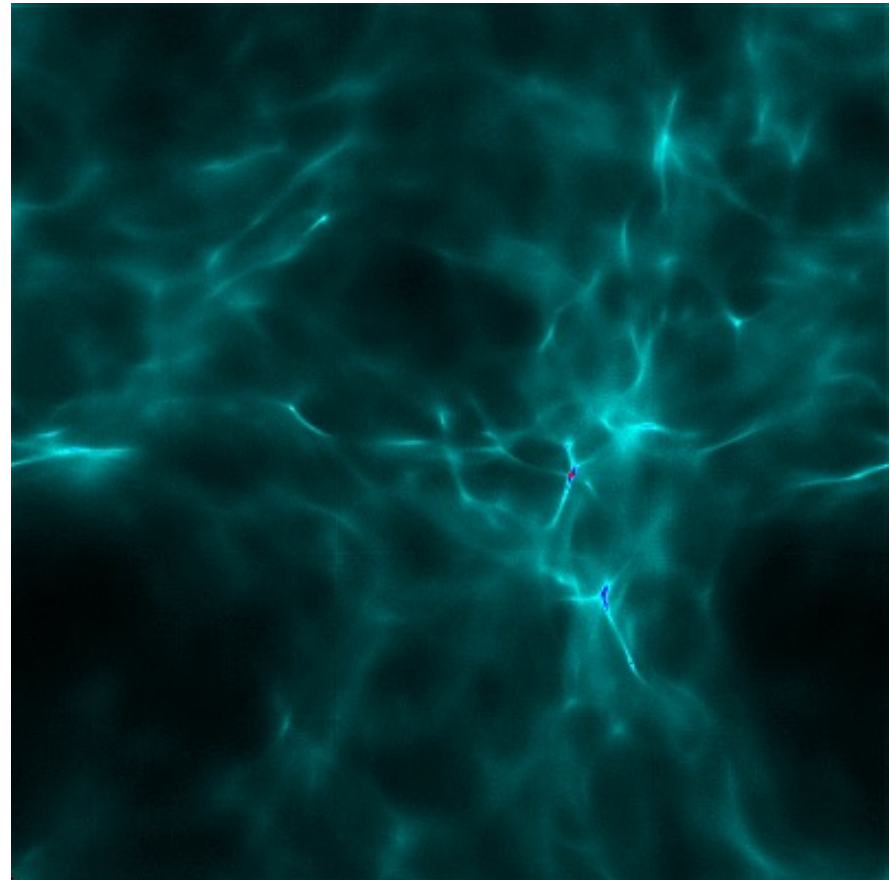
CDM

vs WDM (10 keV)

1 Mpc



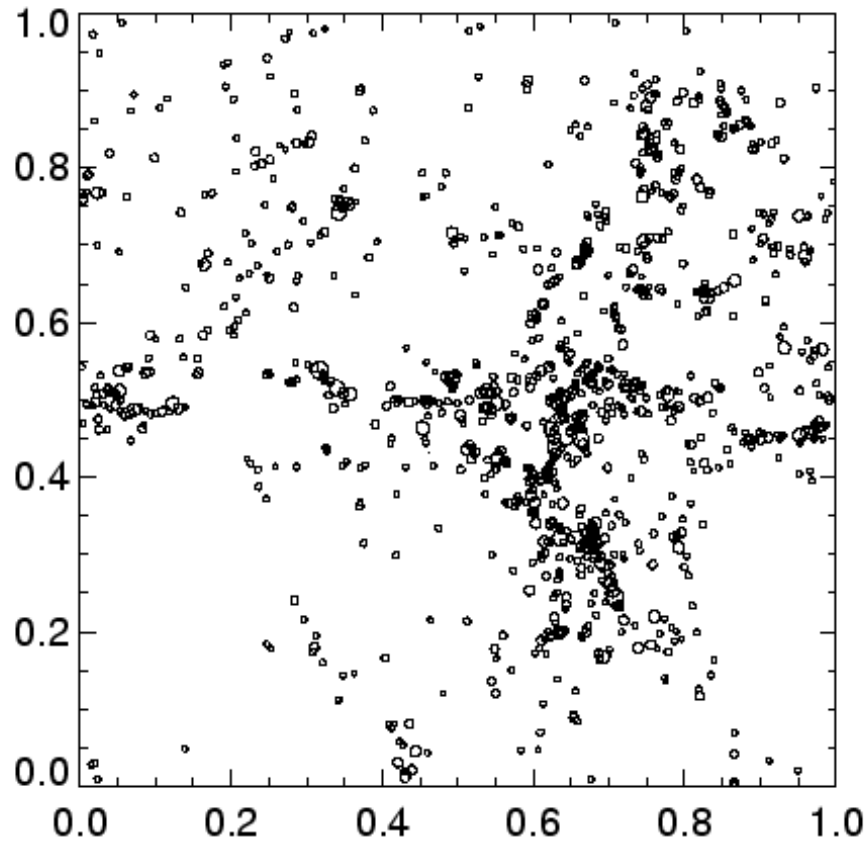
z=20 でたくさん



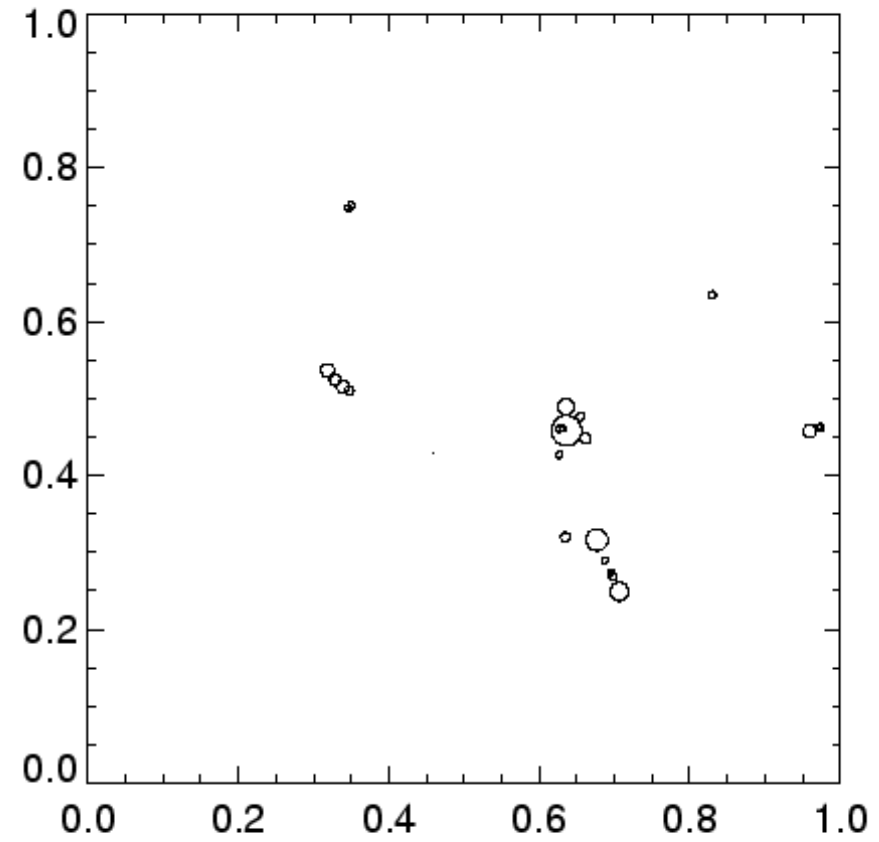
1個だけ！

Halo distribution

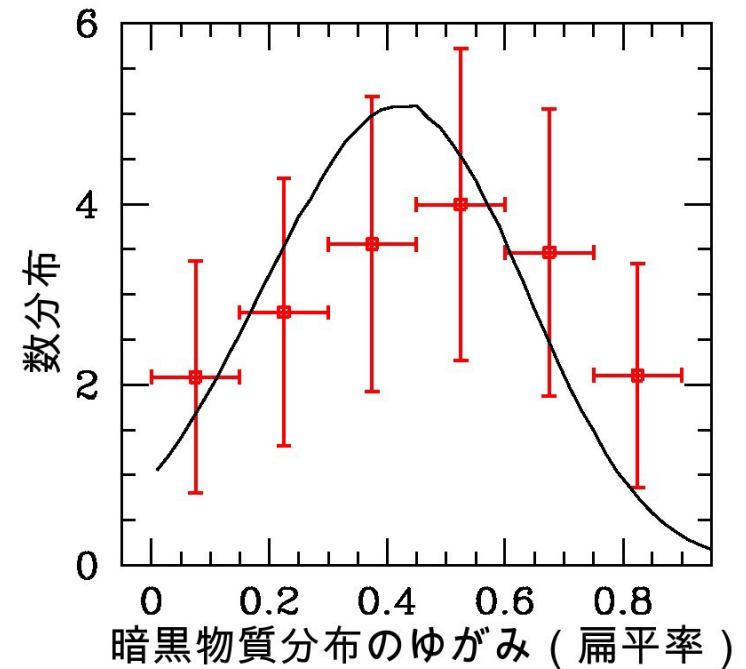
CDM



WDM



銀河団暗黒物質の分布

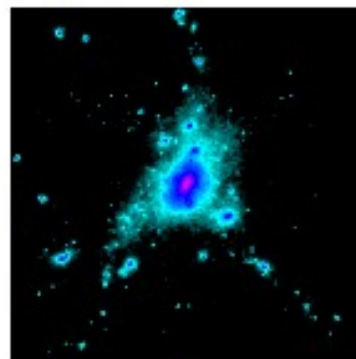


ダークマターの塊
は丸くない

すばる望遠鏡による観測

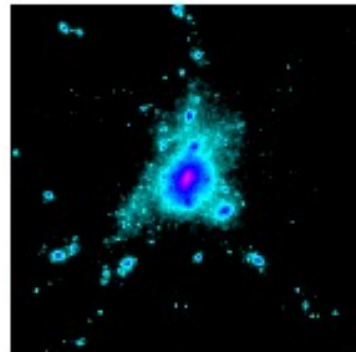
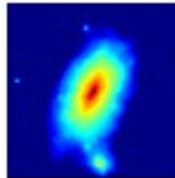
相互作用するダークマター

暗黒物質粒子衝突によるサブハローの蒸発



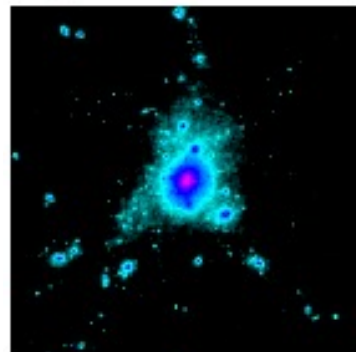
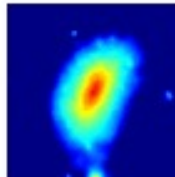
S1

1 : 0.82 : 0.65



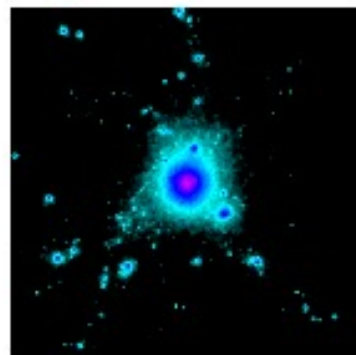
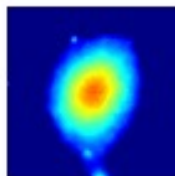
S1Wa

$\sigma^* = 0.1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$
 $r_c = 40 h^{-1} \text{ kpc}$
 1 : 0.88 : 0.66



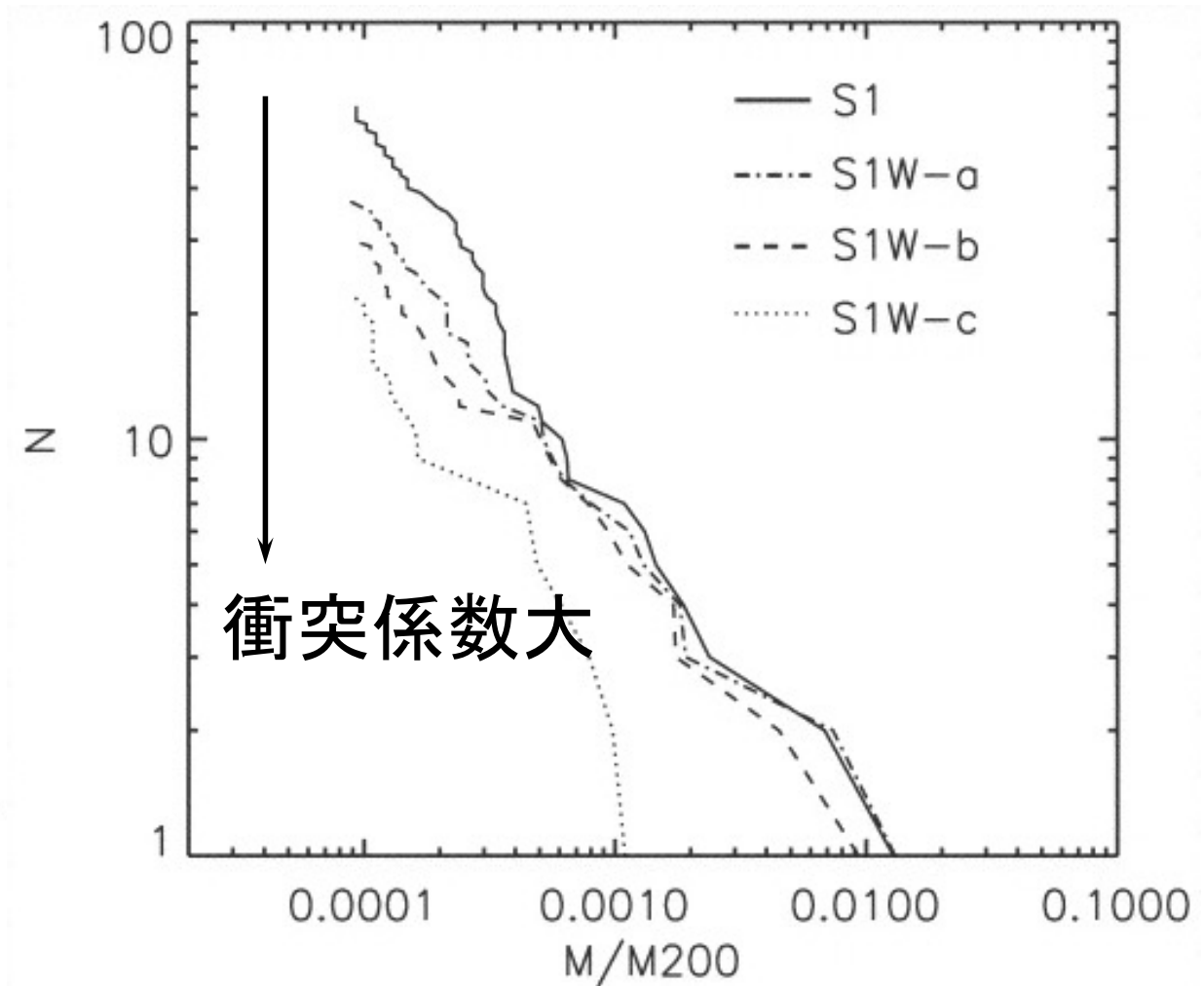
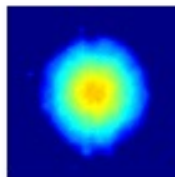
S1Wb

$\sigma^* = 1.0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$
 $r_c = 100 h^{-1} \text{ kpc}$
 1 : 0.91 : 0.72



S1Wc

$\sigma^* = 10.0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$
 $r_c = 160 h^{-1} \text{ kpc}$
 1 : 0.98 : 0.89



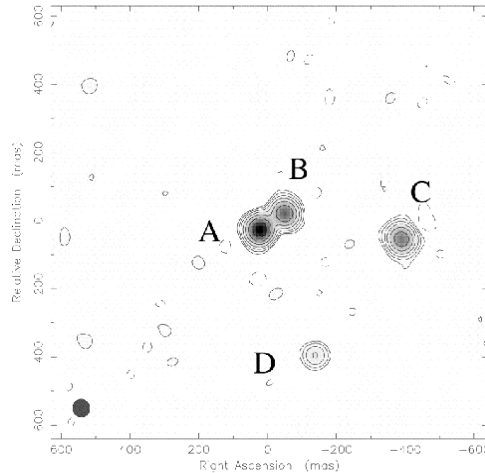
Yoshida+ (2000)

ハローの構造を詳しく探るには

- ・ 銀河系内、周辺の巨大暗黒ガス雲のサーベイ
- ・ 重力レンズによるダークマターサブハローの検出（遠方銀河、MW、M31）
- ・ ダークマター(neutralino)の対消滅による γ 線
- ・ 銀河系やM31の星の形成史と運動

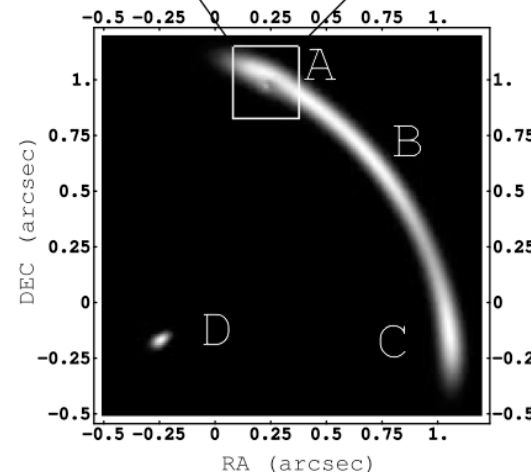
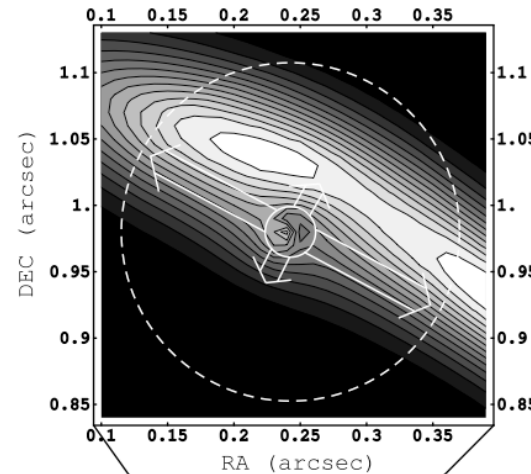
重力レンズをつかった検出

Inoue&Chiba (2003,2005a,b)



レンズ像のフラックス比
(Dalal&Kochanek 2002;Keeton 2003)

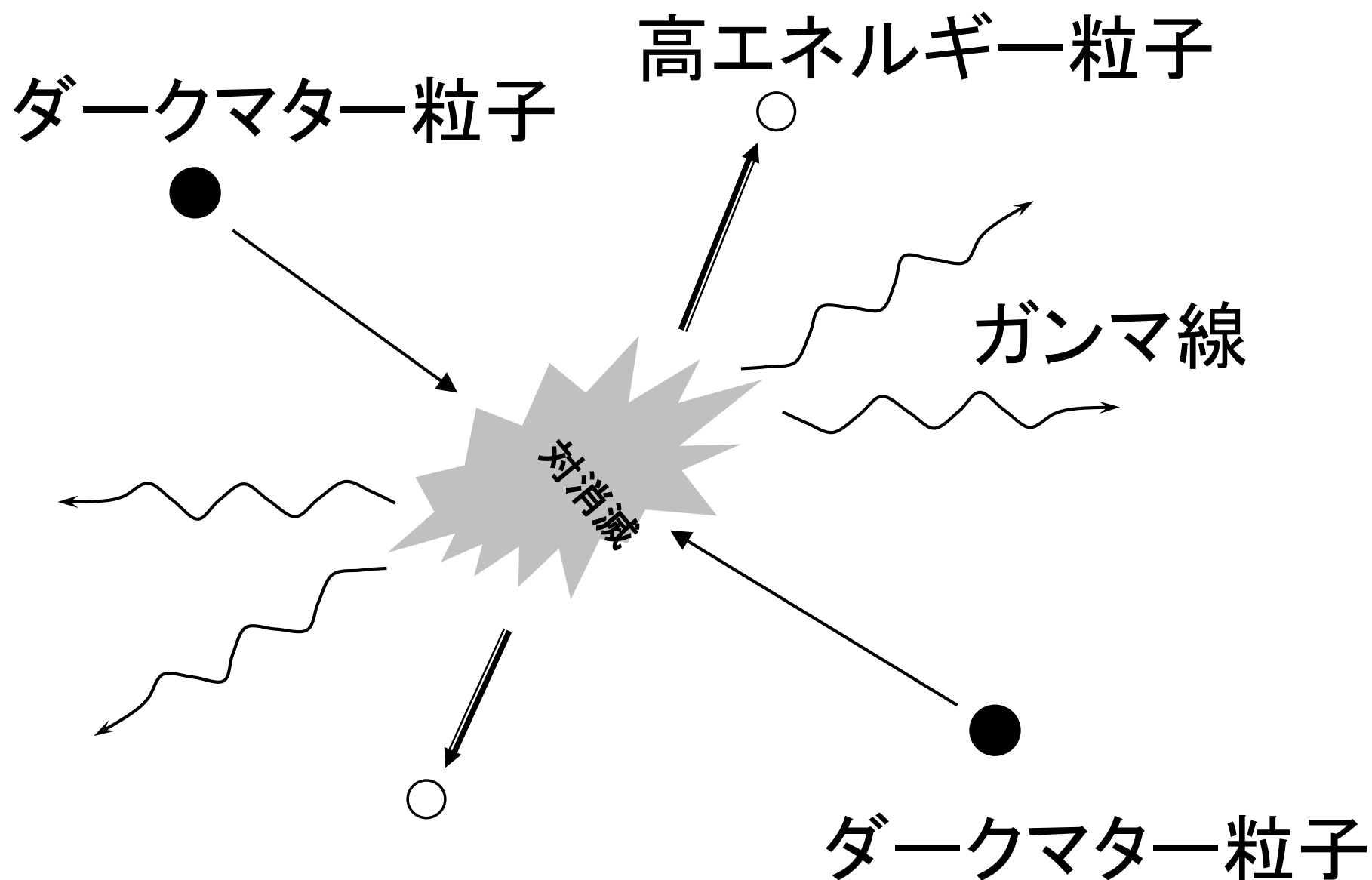
大きなサブハローの寄与
が卓越。
視線方向の偶然の重なり
と区別できない



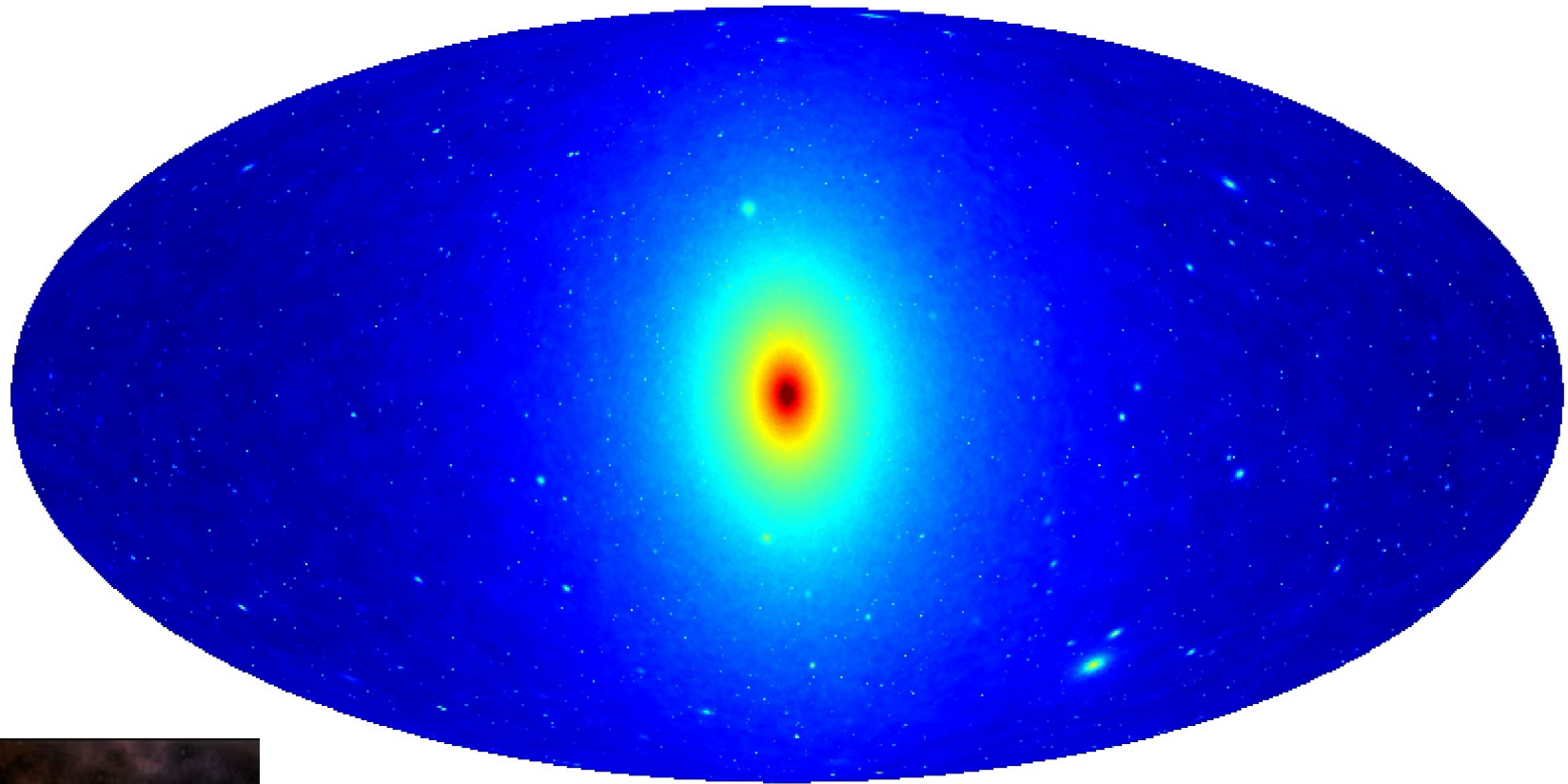
電波、
サブミリ観測
0.01秒角の高
分解能で 10^8
Msunのハロー
検出可能

ALMAで数時
間！！

たまに変化するダークマター



銀河中心から来るガンマ線(シミュレーション)



14  18
 $\log S \text{ (M}_{\text{sun}}^2 \text{ kpc}^{-5} \text{ sr}^{-1})$



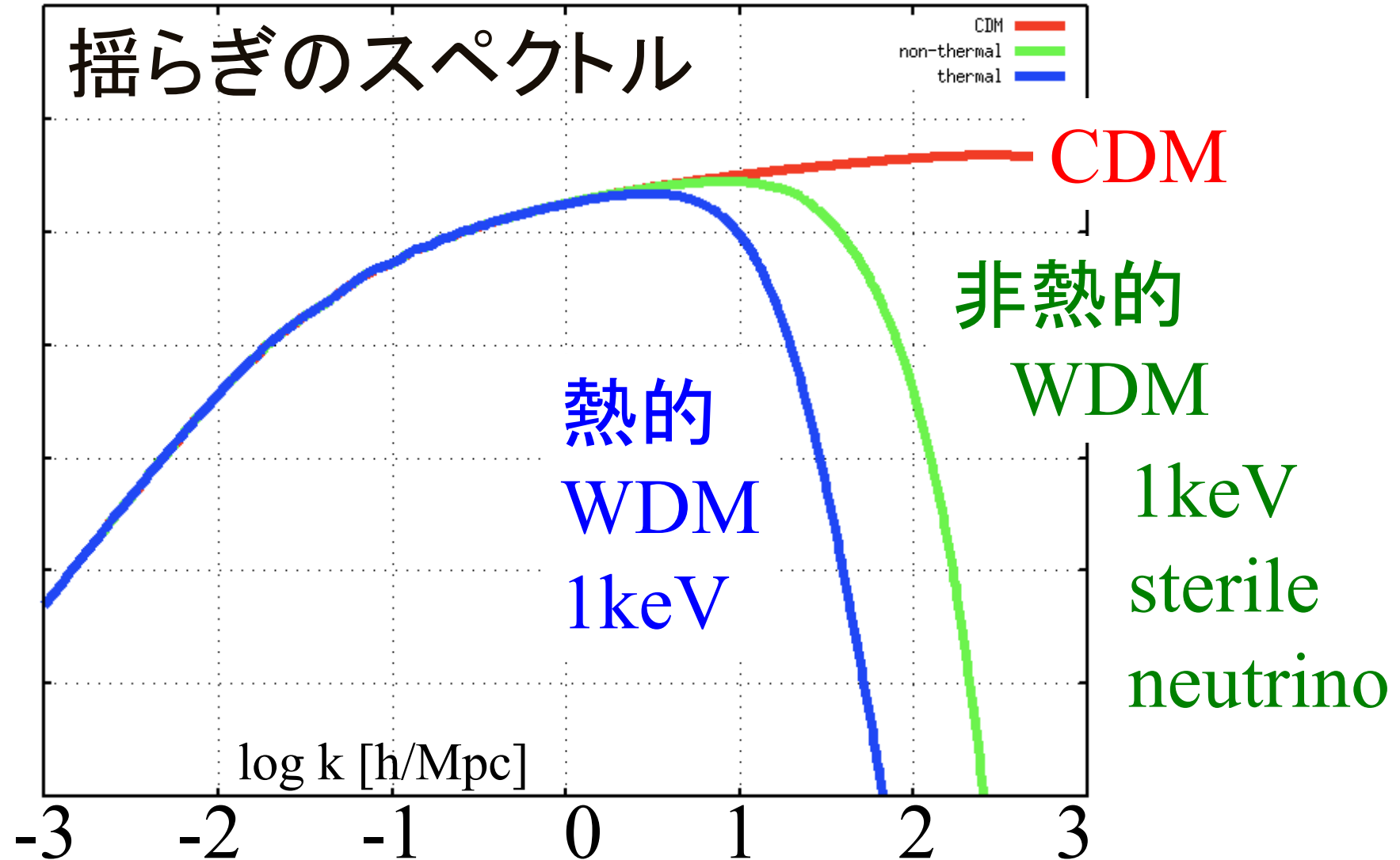
Fermi ガンマ線望遠鏡

密度プロファイルと消滅率

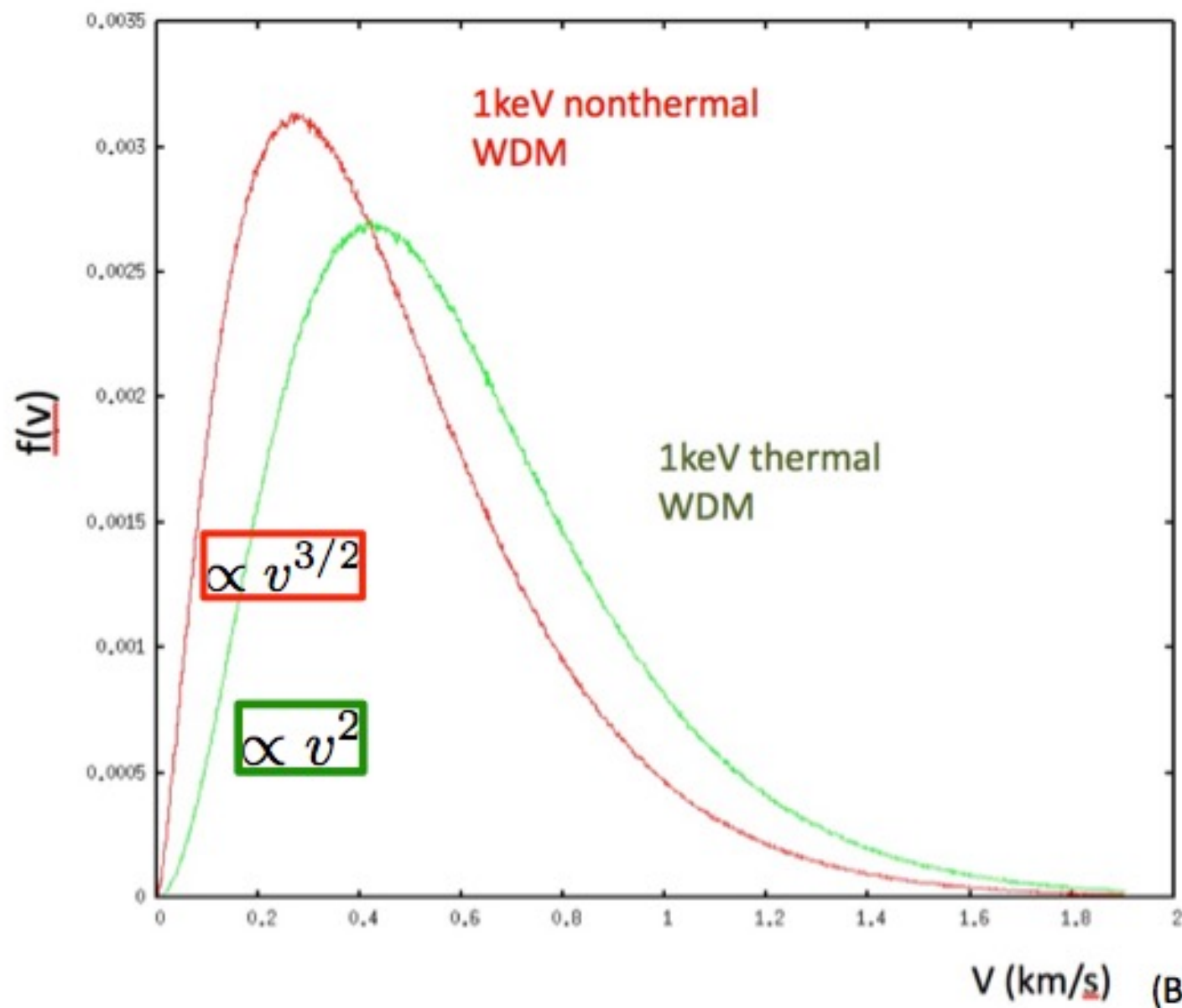
$$F = \frac{N \langle \sigma v \rangle}{2m_x^2} \int \frac{\rho^2(r)}{4\pi D^2} d^3x$$

- 高密度領域からの寄与大
(G.C., centers of satellites)
- 星やガスの分布、運動が多大に影響する。
特にbryon-dominateの場合、逆にはたらく可能性。
(e.g. Gnedin et al. 2005)
- フラックスが中心で発散するのは $\rho \sim r^{-1.5}$

Warm Dark Matter Revisited



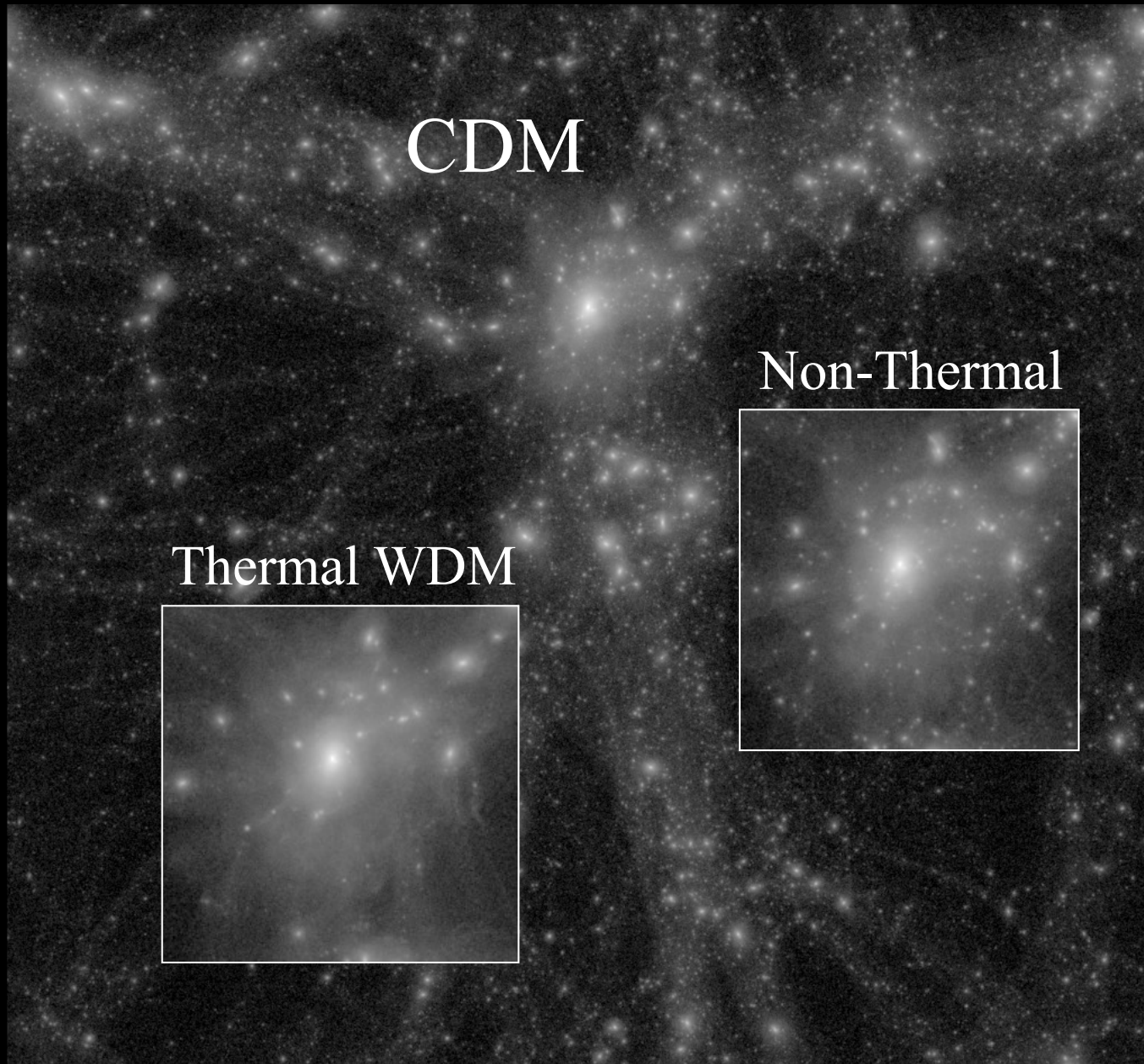
Velocity Distribution @ z=9



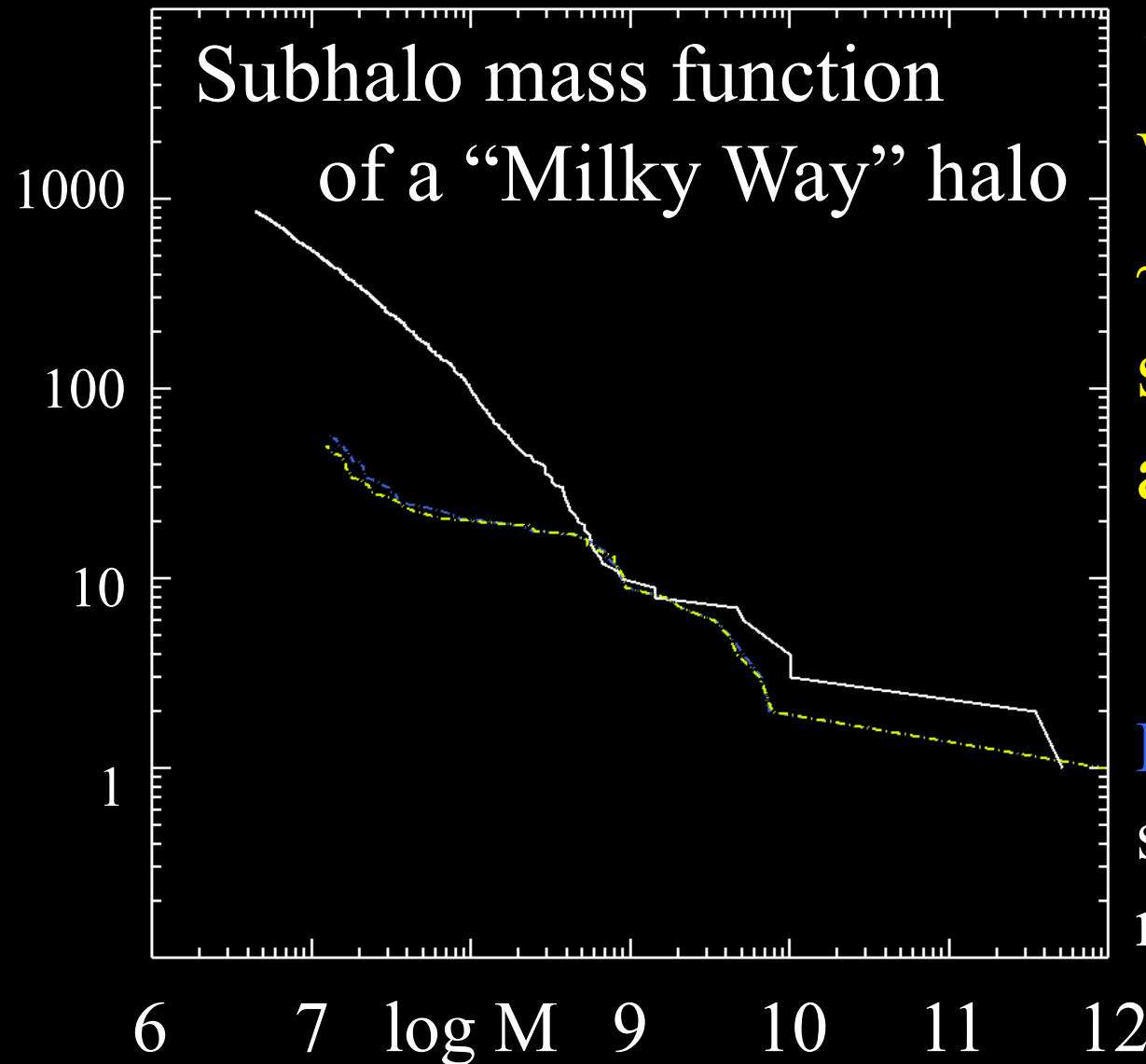
Structure of dark halos



Structure of dark halos



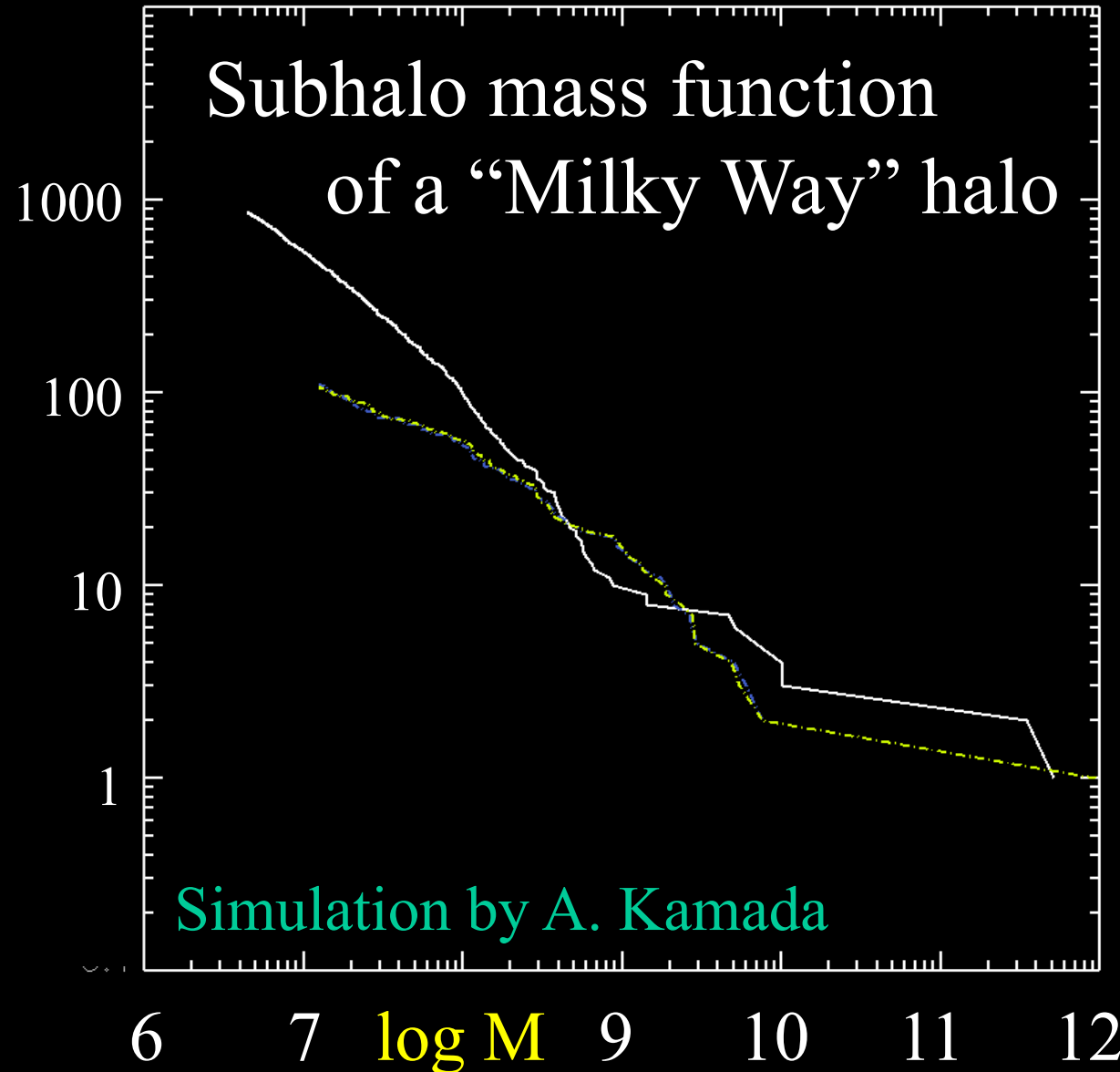
Substructure in tWDM models



1keV thermal
WDM predicts
 $\sim$ a factor of 10
smaller abundance
at $M < 10^8 M_{\text{sun}}$

Blue/yellow lines
show ICs with/without
random velocities

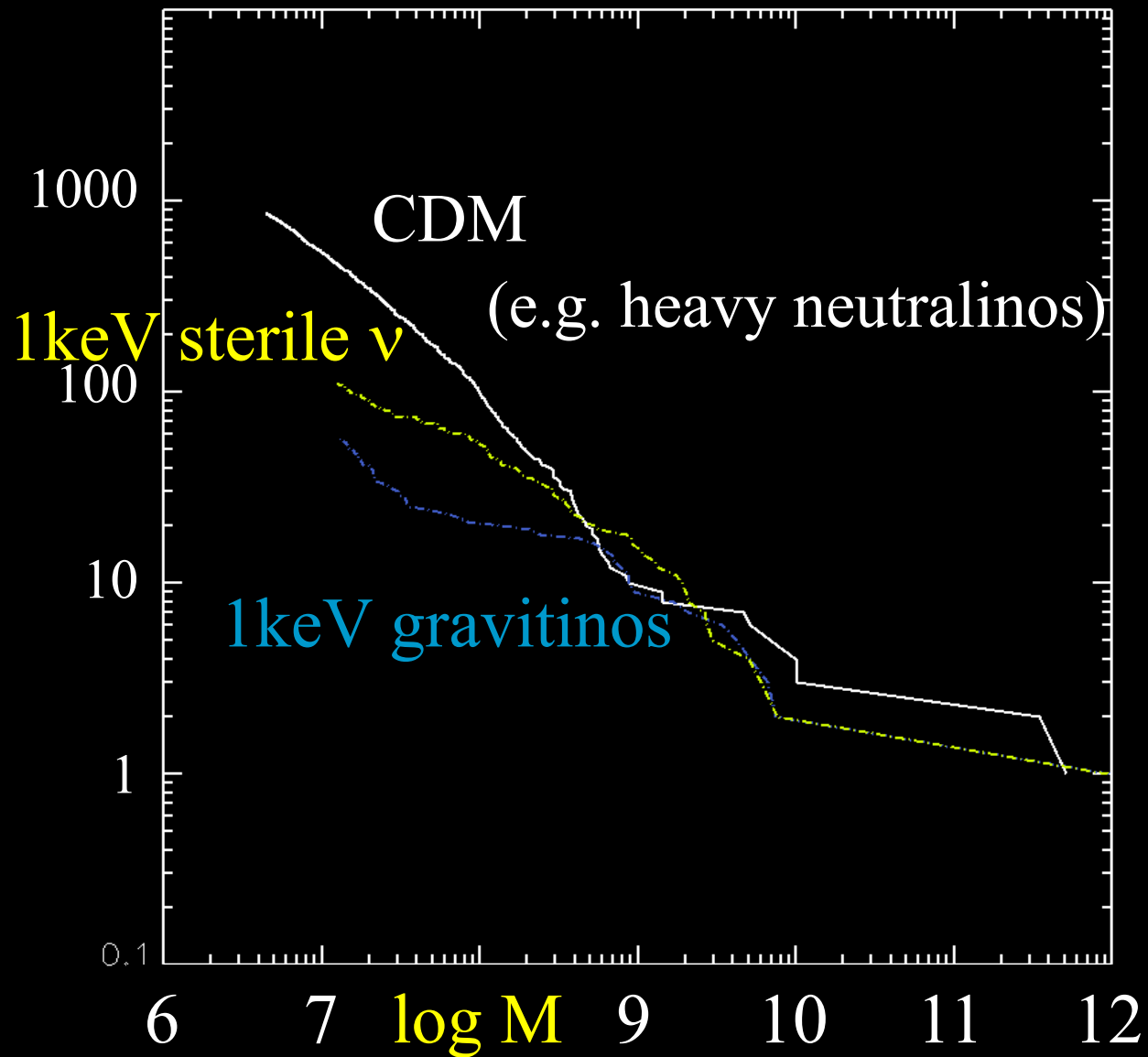
Substructure in non-thermal models



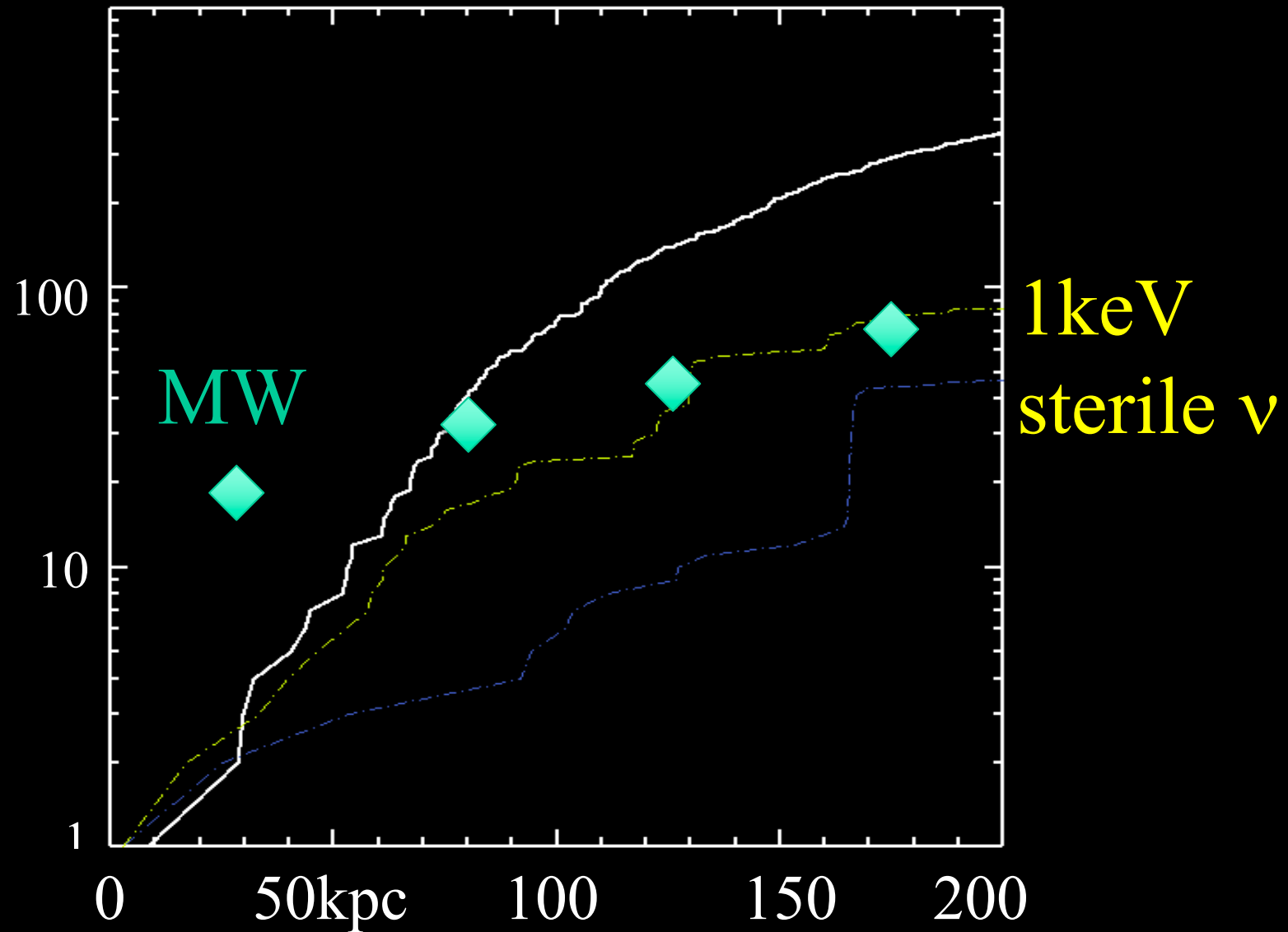
1keV sterile ν
WDM predicts
slightly larger
abundance
at $M < 10^8 M_{\text{sun}}$

100 subhalos
within the virial
radius

Thermal WDM vs Non-thermal

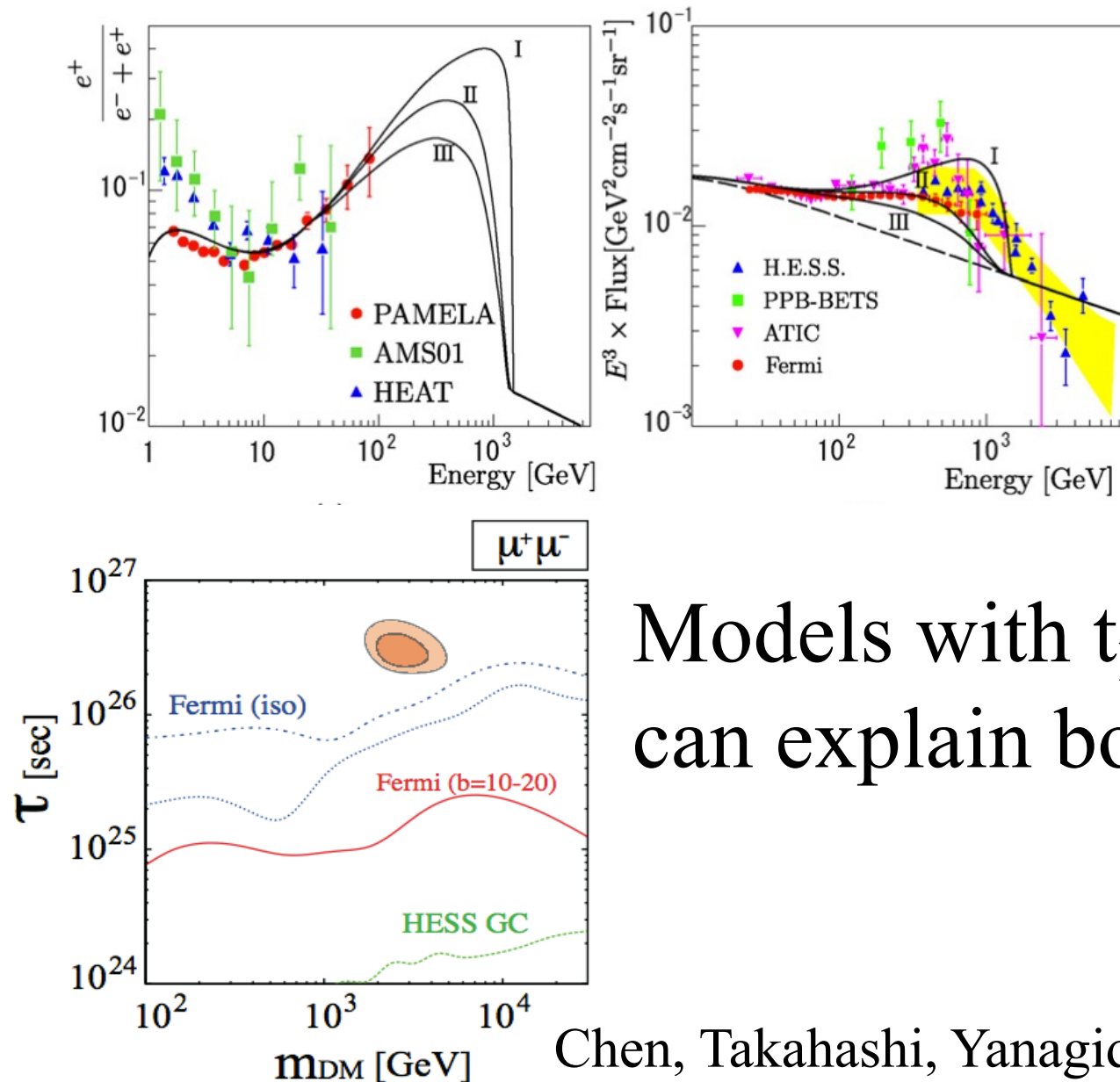


Radial distribution



Lifetime of dark matter

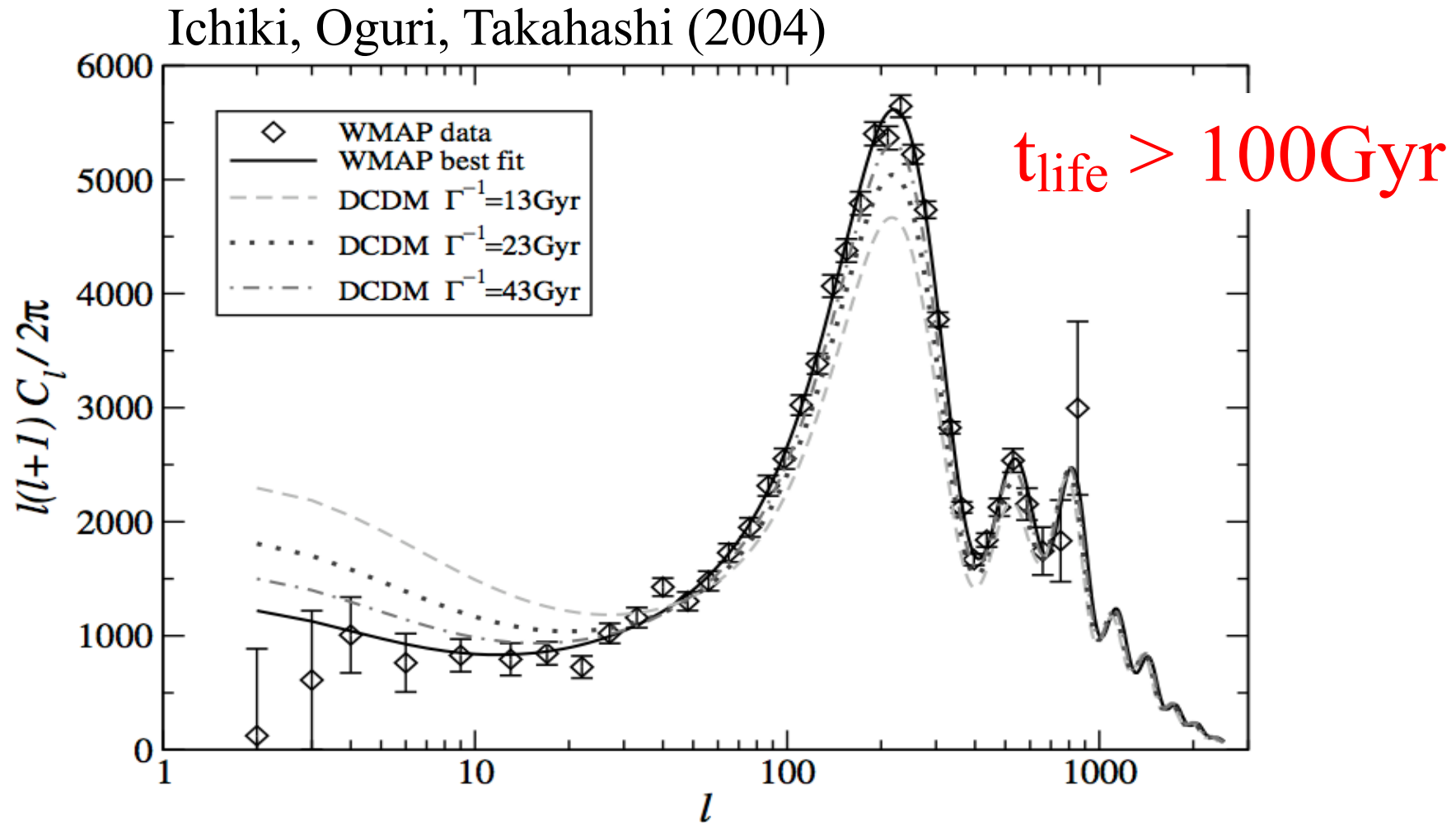
Decaying DM after PAMELA/Fermi



Models with $t_{\text{life}} \sim 10^{26}$
can explain both.

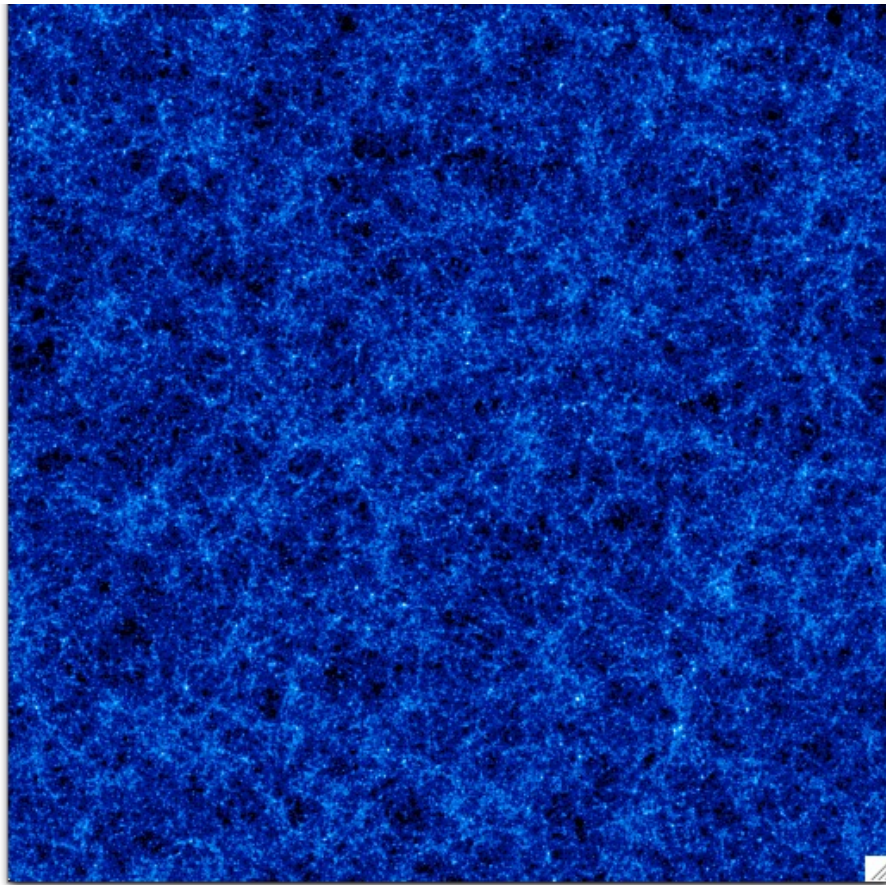
Chen, Takahashi, Yanagida (2010)

How stable is a dark matter particle ?



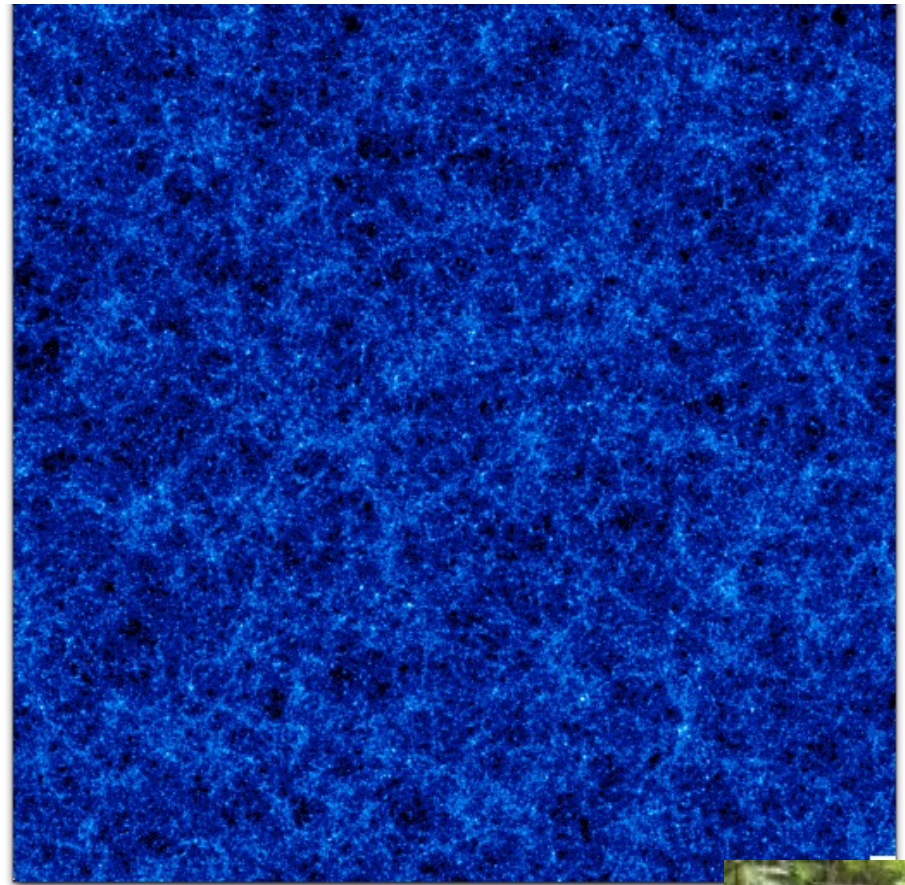
Structure formation in DDM models

CDM



← 1 Giga parsecs →

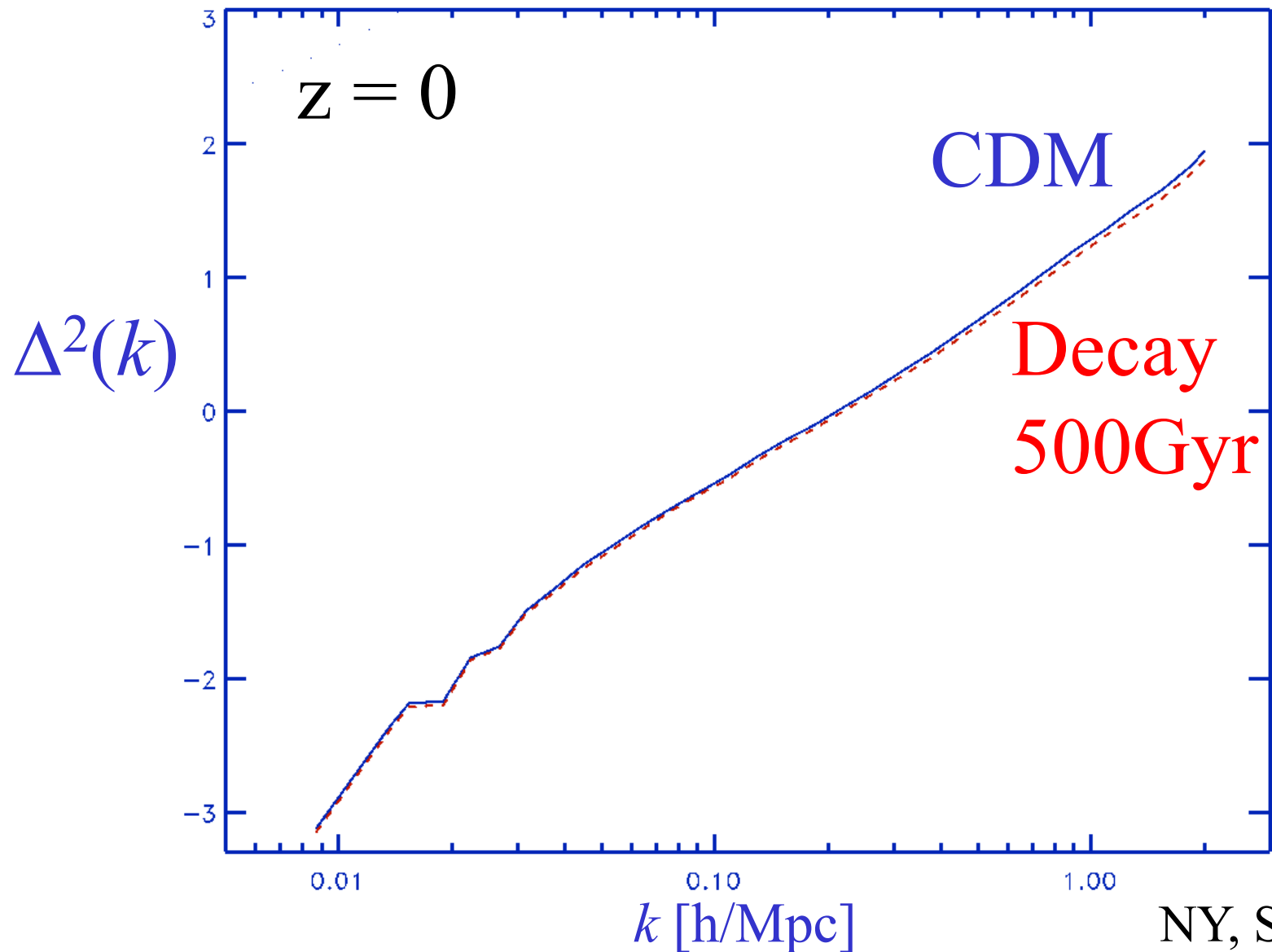
Decay 500Gyr



NY, Mandal et al.

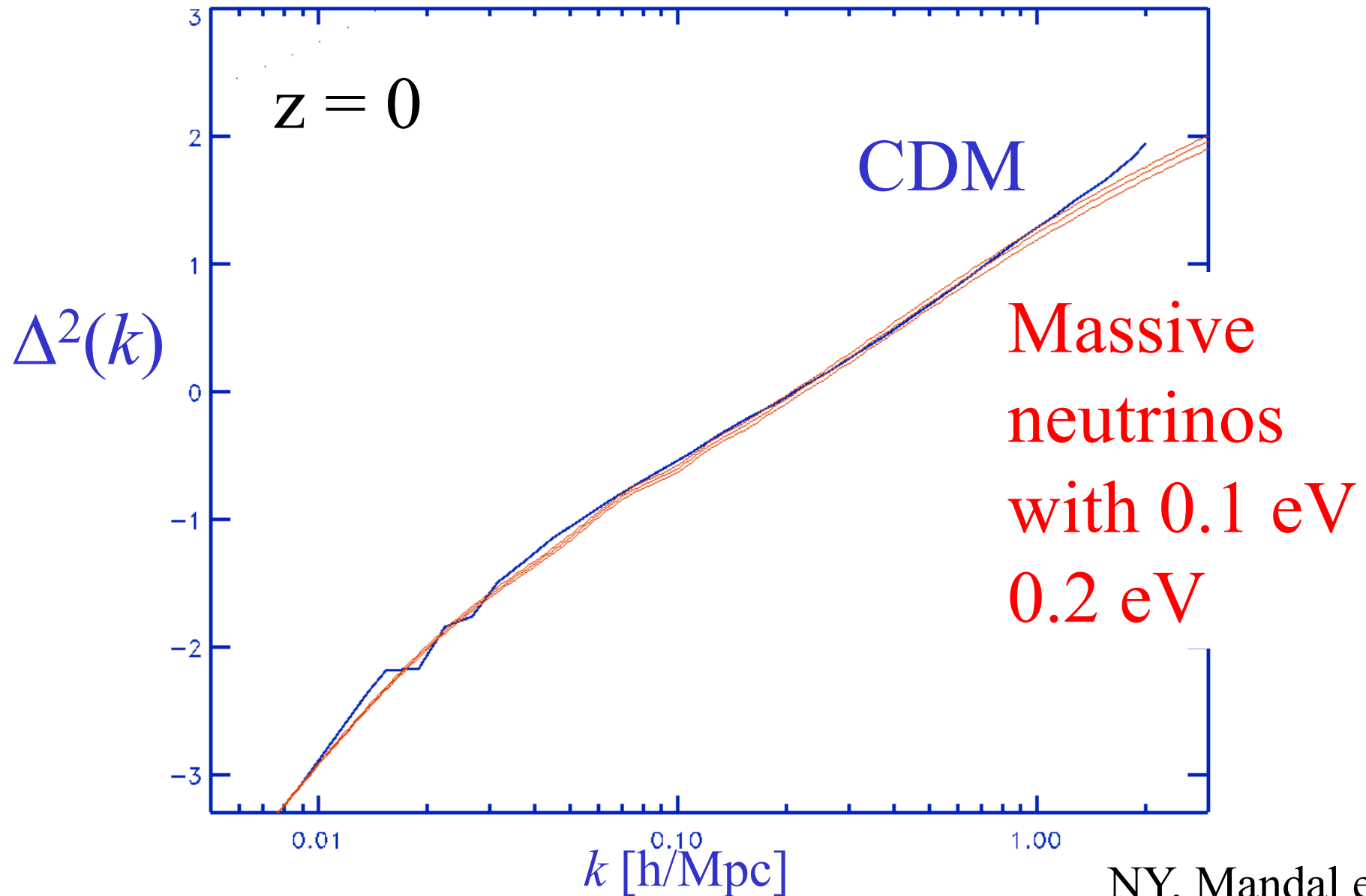


The DDM power spectrum



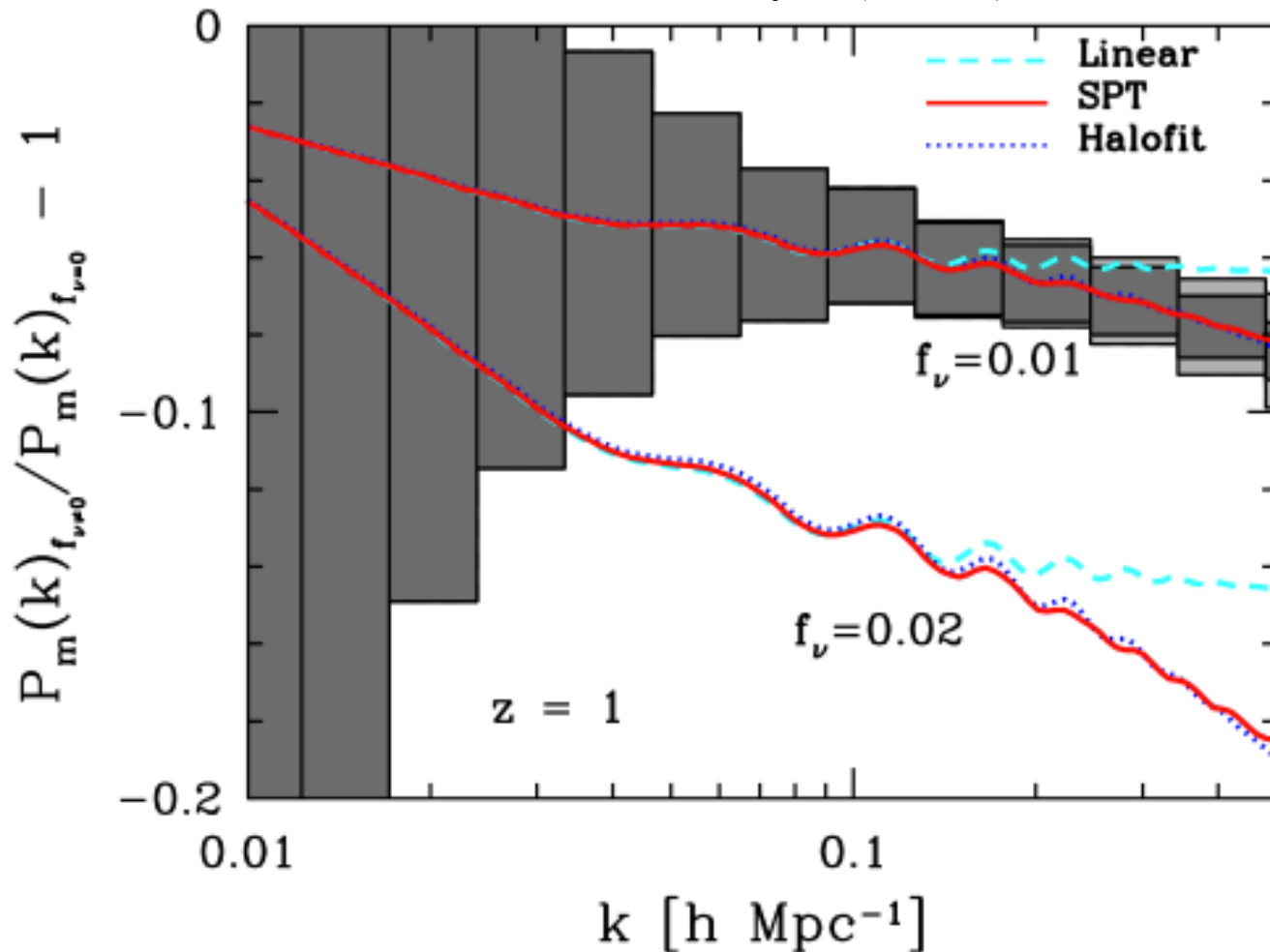
NY, S. Mandal et al.

The effect of massive neutrinos



Matter $P(k)$ and neutrino mass

Saito, Takada, Taruya (2009)



Future surveys
of galaxies and
IGM can *measure*
the neutrino mass

Error bars for
 $\sim 2 \text{ Gpc}^3$ volume
survey

Lifetime and matter $P(k)$

