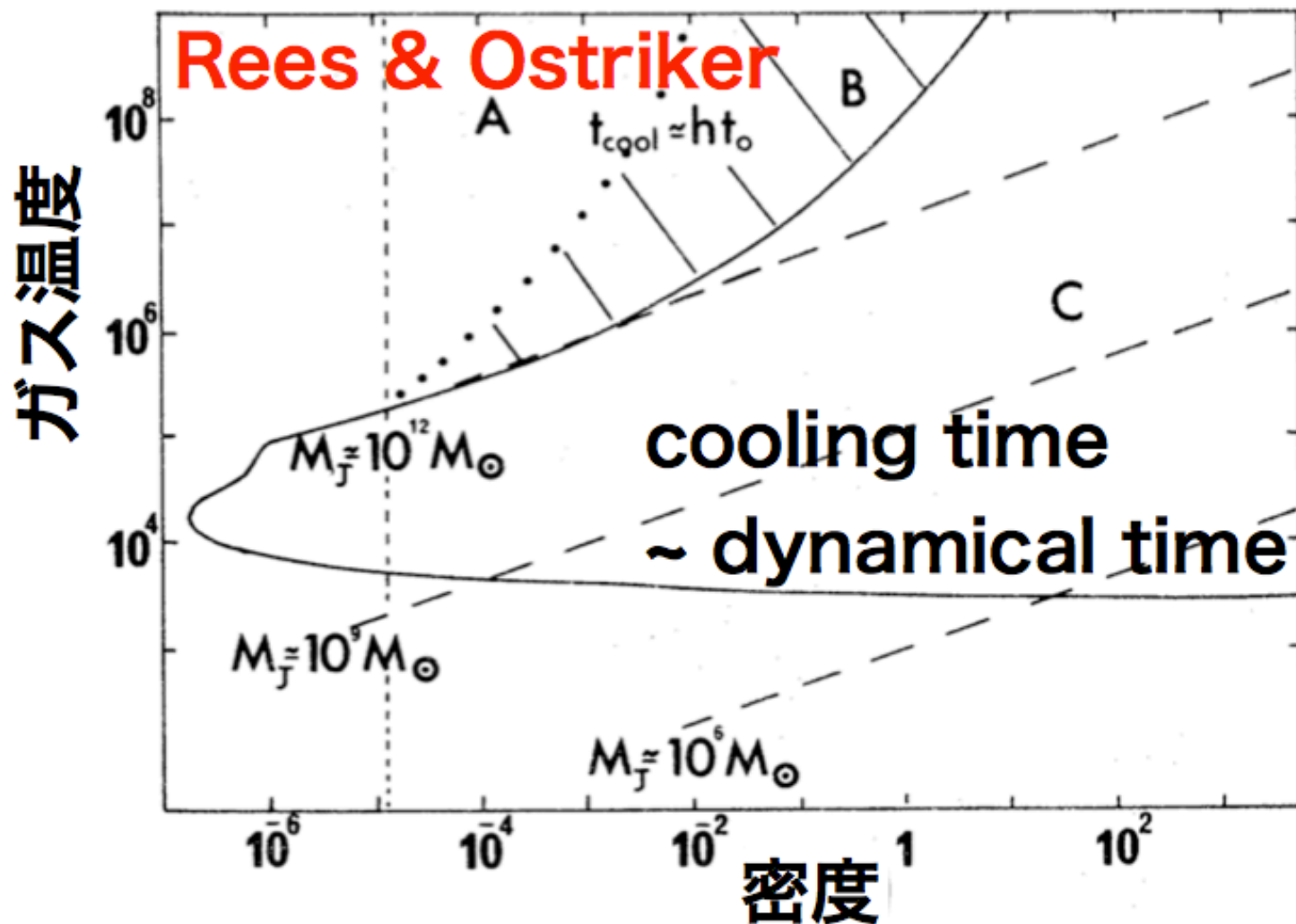


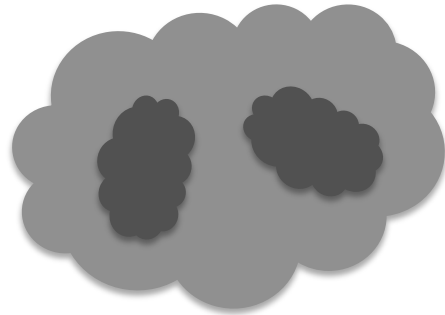
# 銀河形成の基本(30年前)

銀河の大きさになぜ上限があるのか



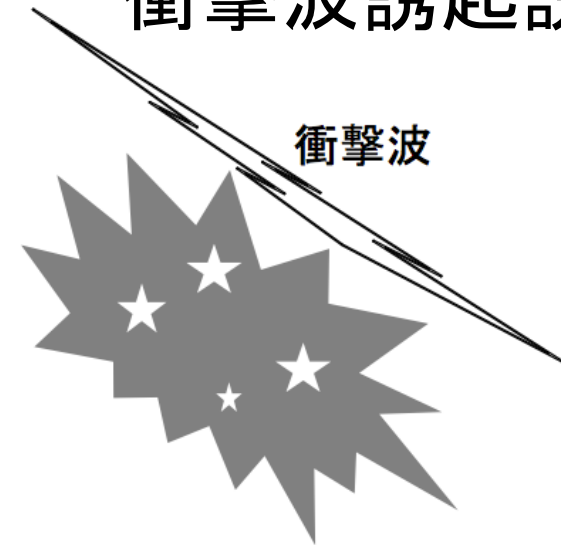
# それがどうやって起こるのか

~1980まで

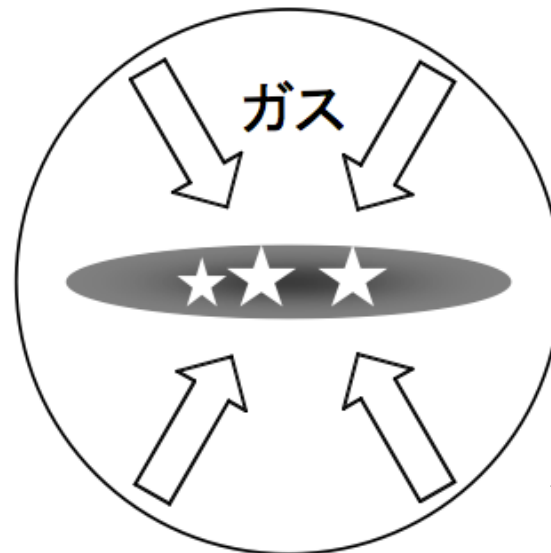


巨大なガス雲の  
重力不安定性説

衝撃波誘起説



衝撃波

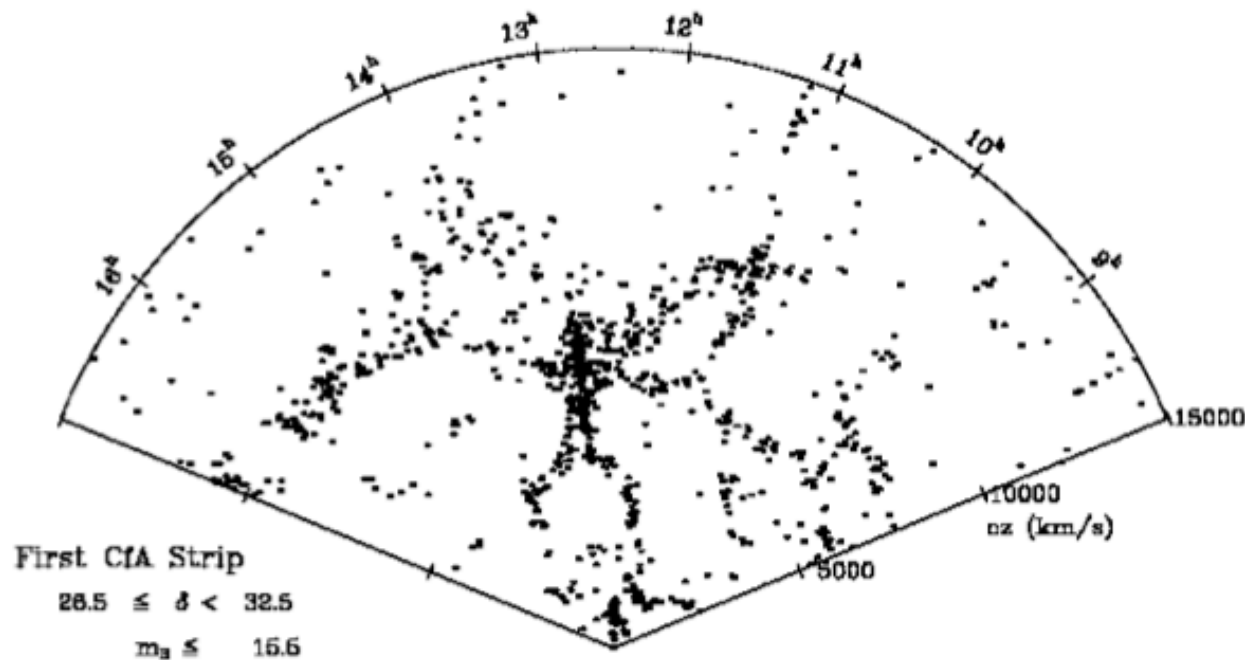


ダークホール器説

# 決着は大規模構造で

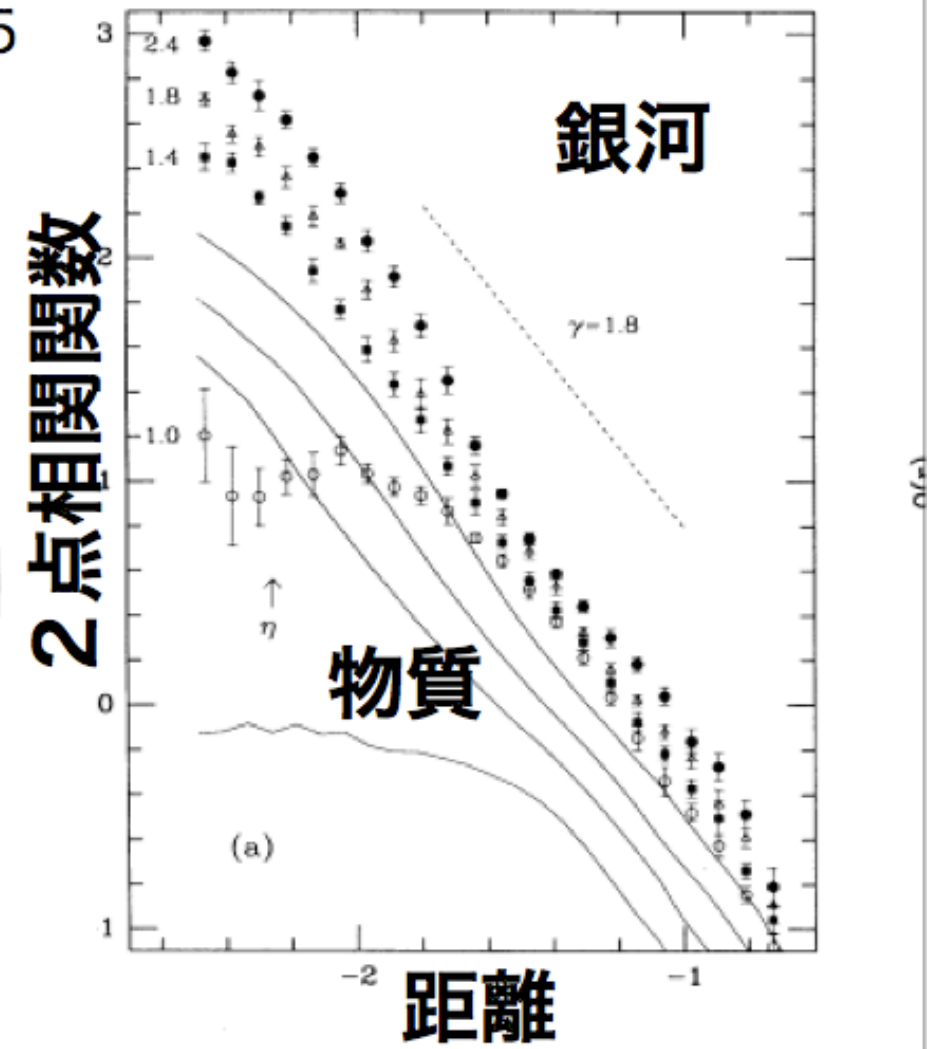
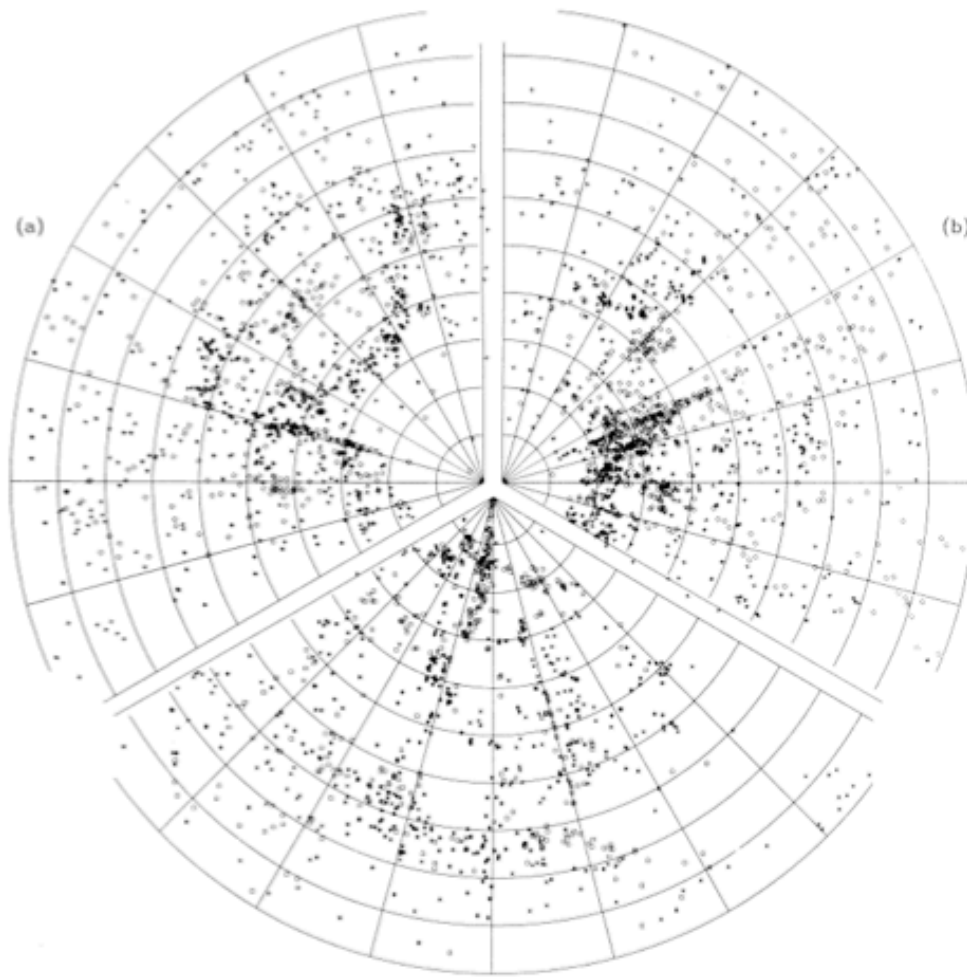
← 形成現場を見たわけではない

## CfA galaxy redshift survey in early 80's



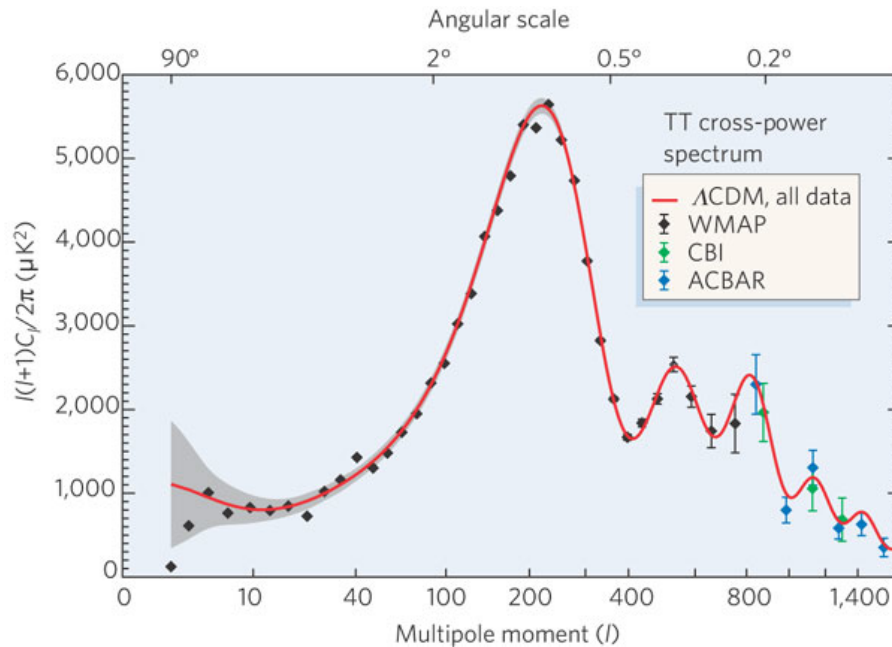
# Inflation + Cold Dark Matter

Davis, Efstathiou, Frenk, White 85



# 構造は重力不安定性でできた

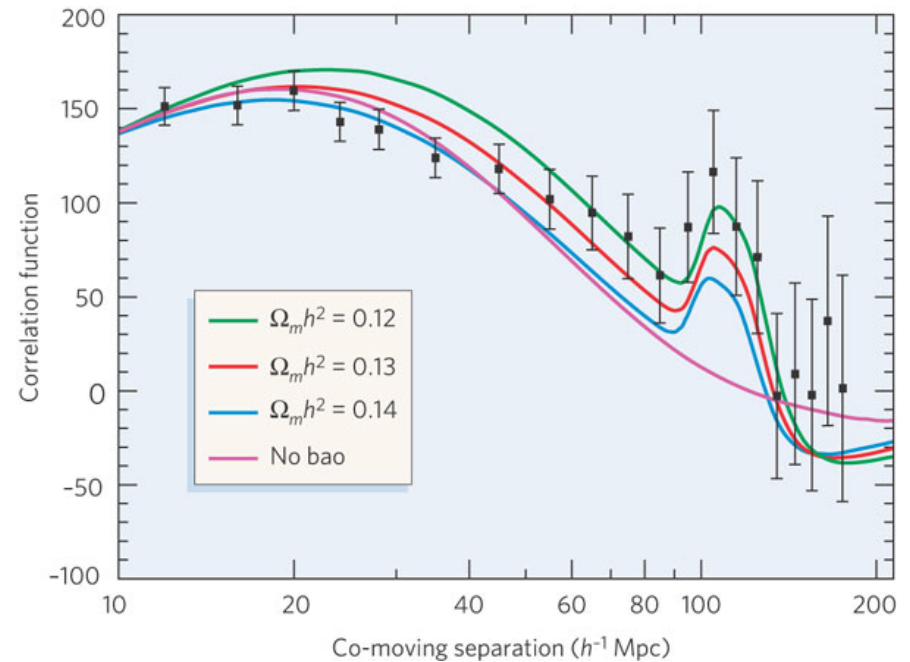
## CMBの揺らぎ



137億年前

宇宙初期の揺らぎ

## 銀河の相関関数



現在

ちなみに

# Inflation + Hot Dark Matter does not work...

CLUSTERING IN A NEUTRINO-DOMINATED UNIVERSE

SIMON D. M. WHITE,<sup>1,2</sup> CARLOS S. FRENK,<sup>1</sup> AND MARC DAVIS<sup>1,3</sup>

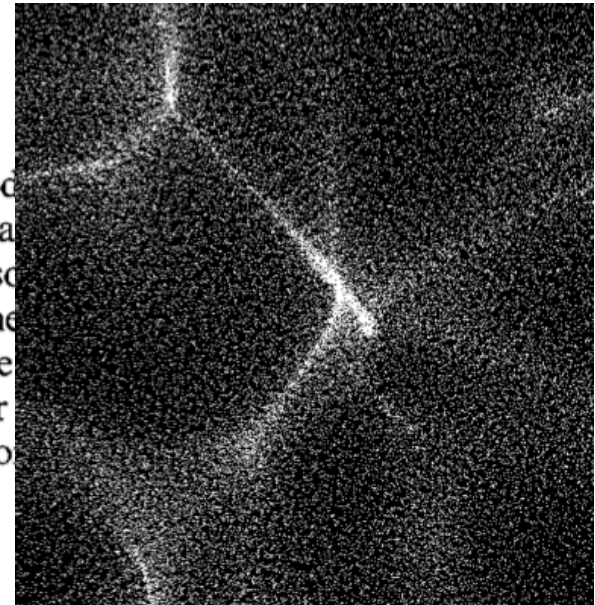
University of California, Berkeley

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 galaxy using a direct  $N$ -body integrator and on a fast Fourier transform Poisson solver. The coherence length of the neutrino distribution at early times is compared to the scale of the neutrino and thence to the present density of the universe. We find that the model is to be consistent with the observed clustering scale of galaxies if other parameters are chosen to remain within their accepted ranges. The conventional neutrino-dominated model is ruled out.

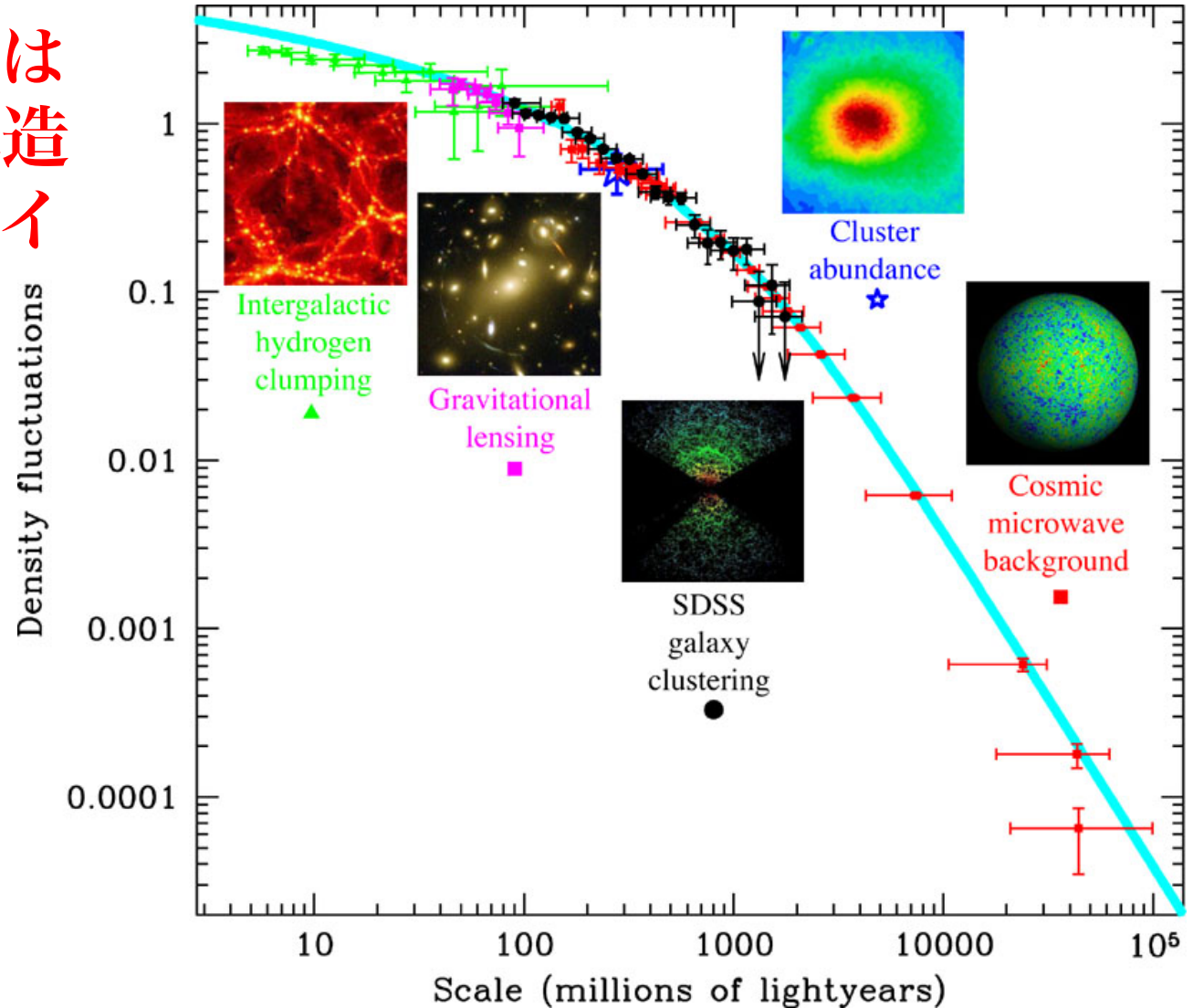
*Subject headings:* cosmology — galaxies: clustering — neutrinos



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距離で大きすぎる

# $\Lambda$ + 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

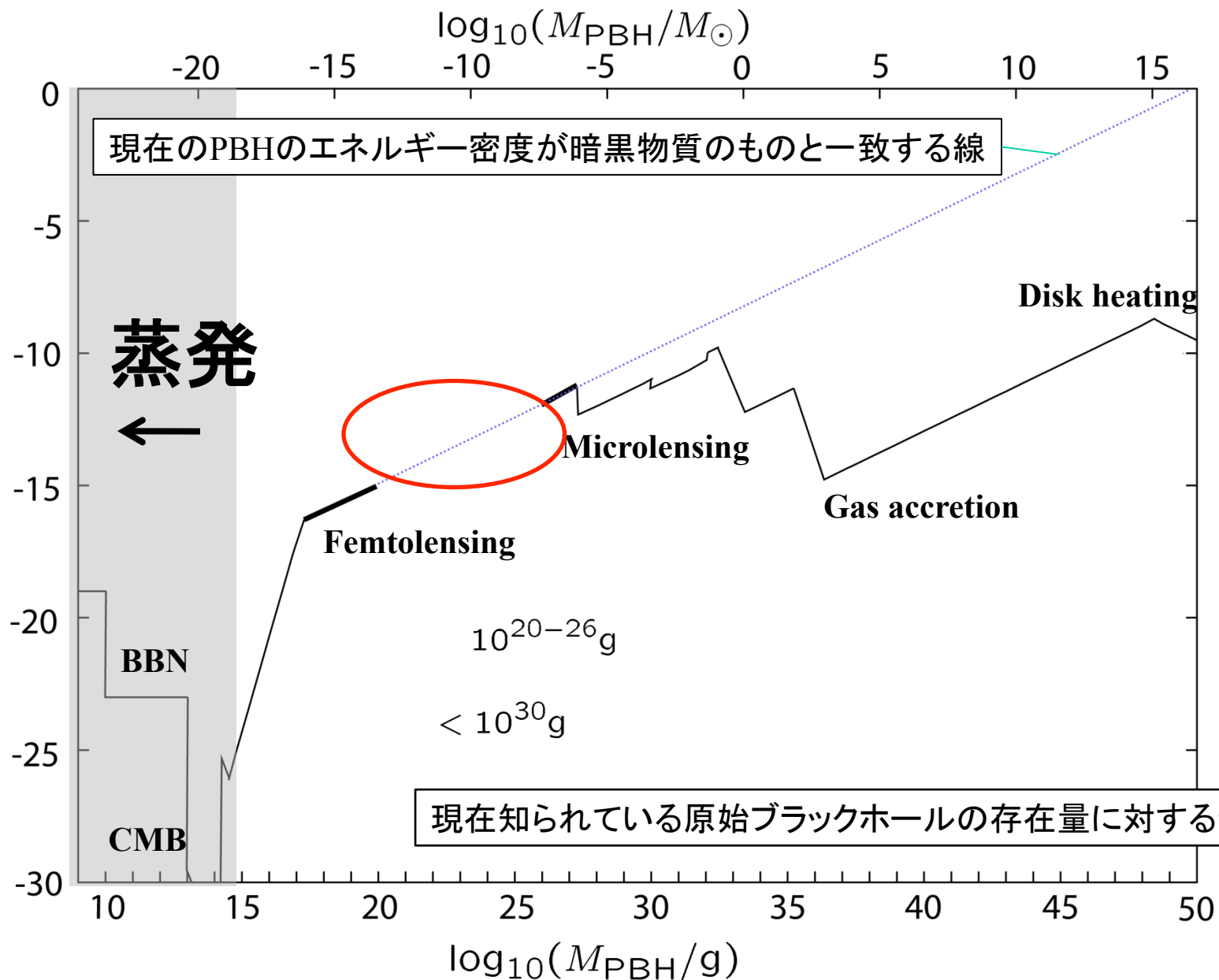






(Josan, Green, Malik '09, Carr, Kohri, Sendouda, & Yokoyama '09)

形成時の全エネルギーに対する割合



# 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

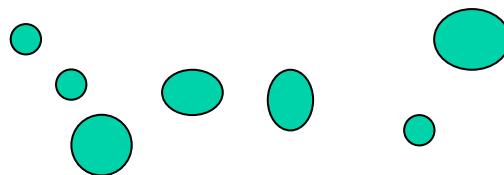
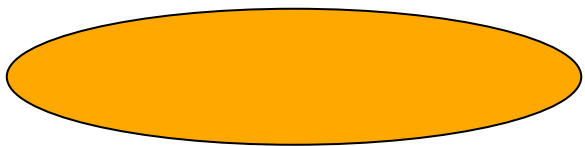
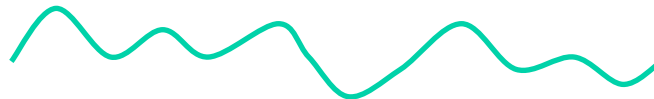
粒子の乱雑な動きがほとんど  
なかったもの

多くの小さい塊

熱い

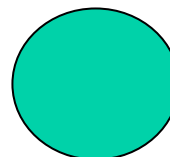
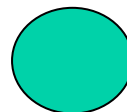
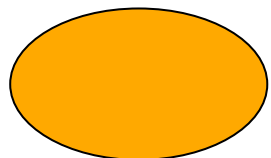
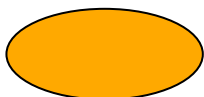
冷たい

昔



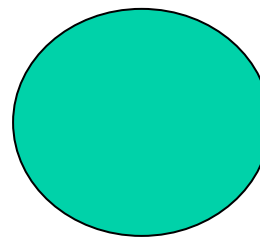
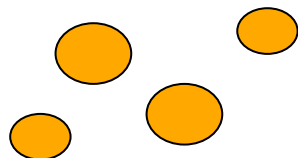
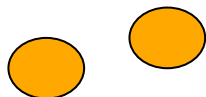
分裂

合体



さらに分裂

さらに合体



今

階層的構造形成

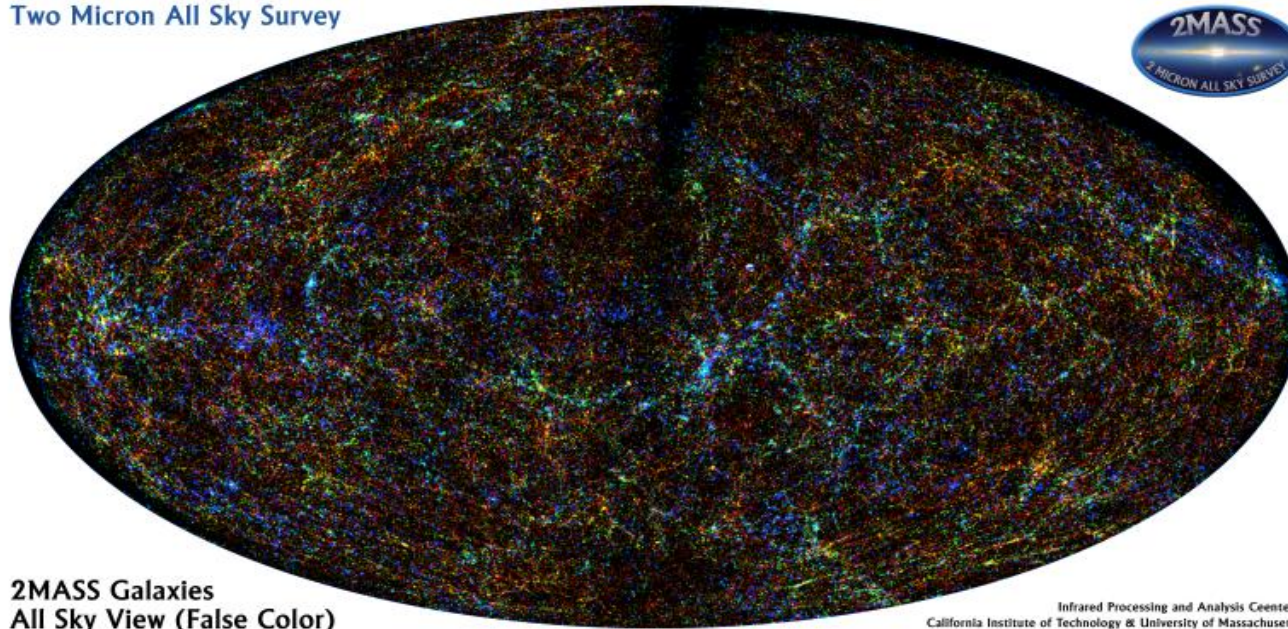


# ダークマターの性質と構造の進化

Two Micron All Sky Survey



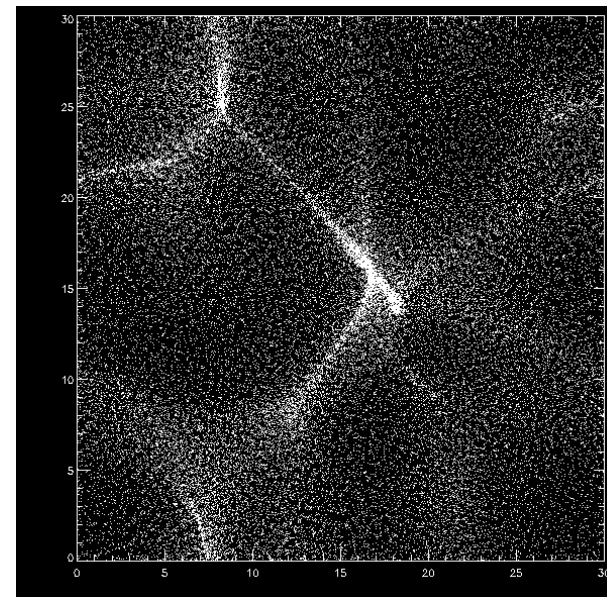
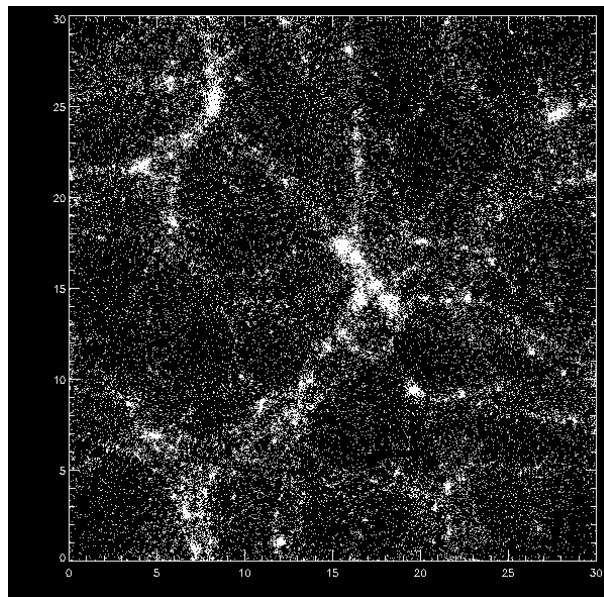
初期



2MASS Galaxies  
All Sky View (False Color)

Infrared Processing and Analysis Center/  
California Institute of Technology & University of Massachusetts

現在



# 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 -

- ・ 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**

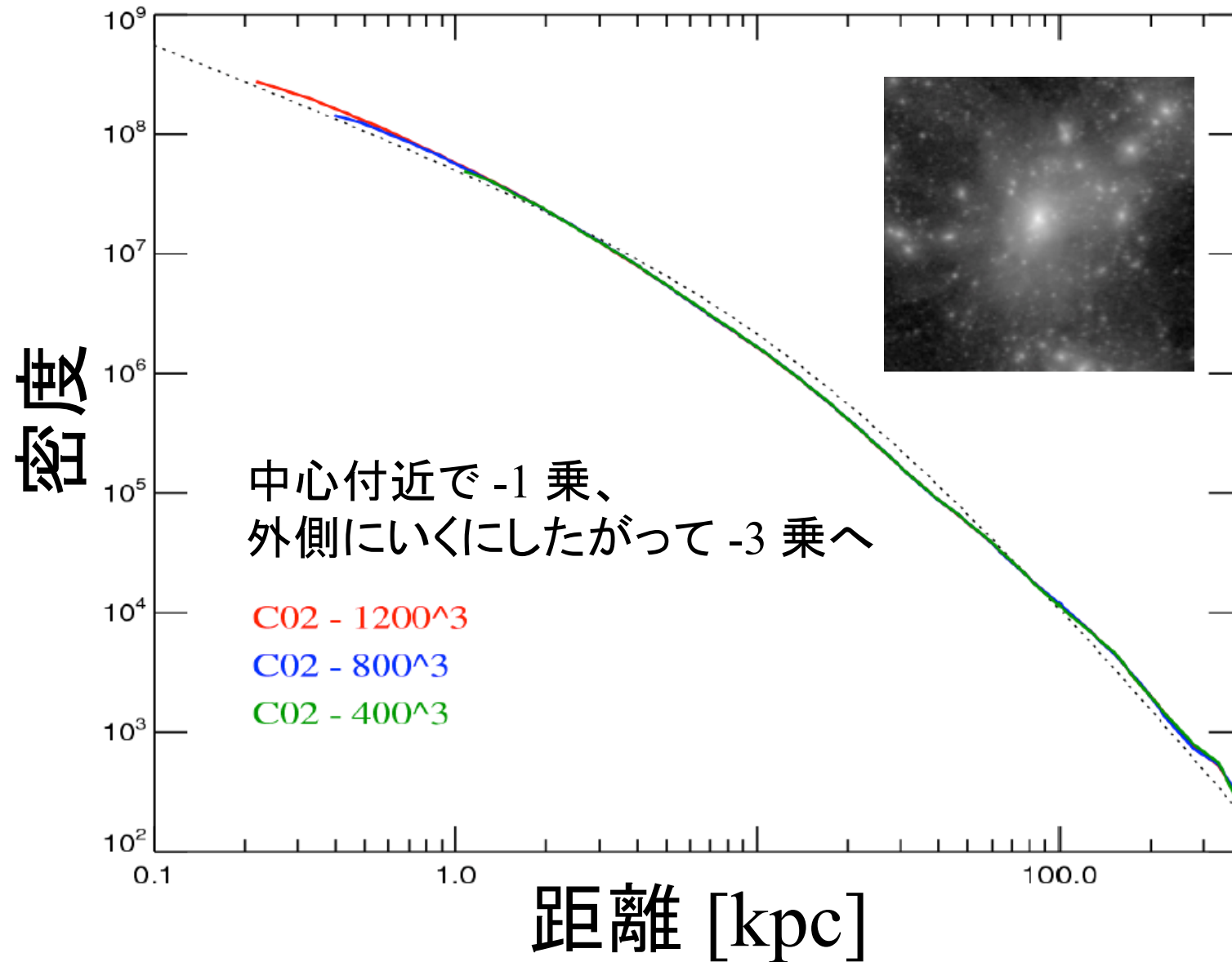
散乱、速度分散  
初期密度揺らぎ

**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 ( $N_{\text{粒子}} = 100,000$ )

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)

中心の中は  $-1.5 - -1.1$ ,

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。

# クイズ: NFWの回転曲線

銀河ダークハローの密度プロファイルが  
double power law

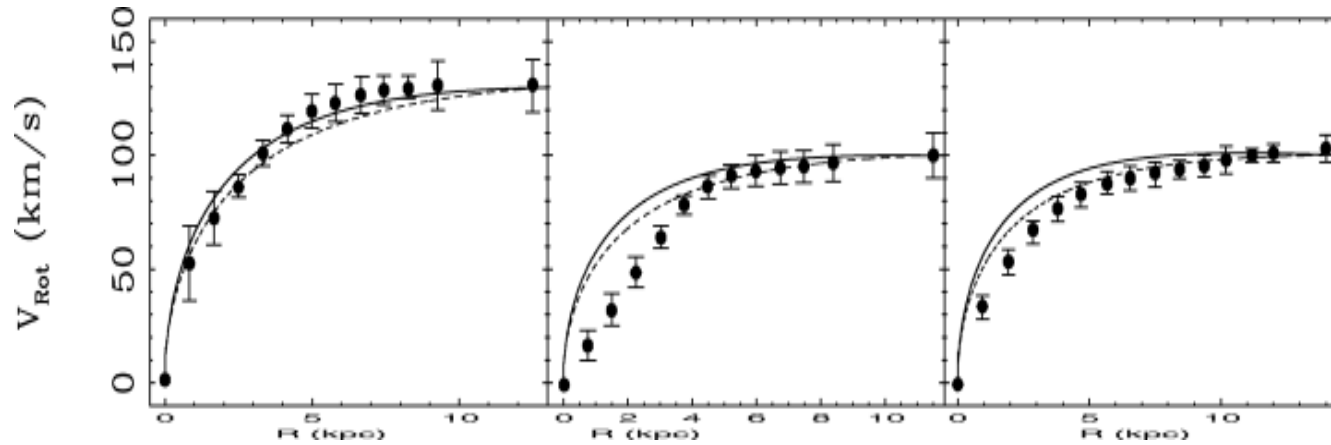
$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{\frac{r}{r_s} \left(1 + \frac{r}{r_s}\right)^2}$$

で与えられるとき、この銀河の回転曲線を  
求め、観測と比べてみよう。

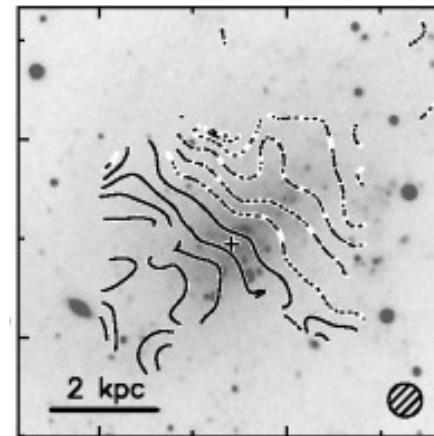
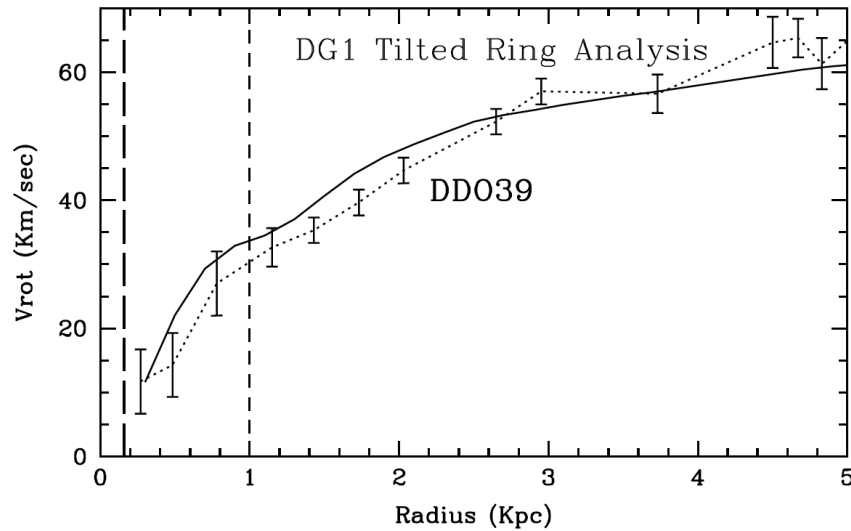
バリオンは無視してよい。

# The cusp problem

## 矮小銀河、低輝度銀河の回転曲線



Swaters 2000



# Crisis on Small Scales 1998 -

- ・ 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）

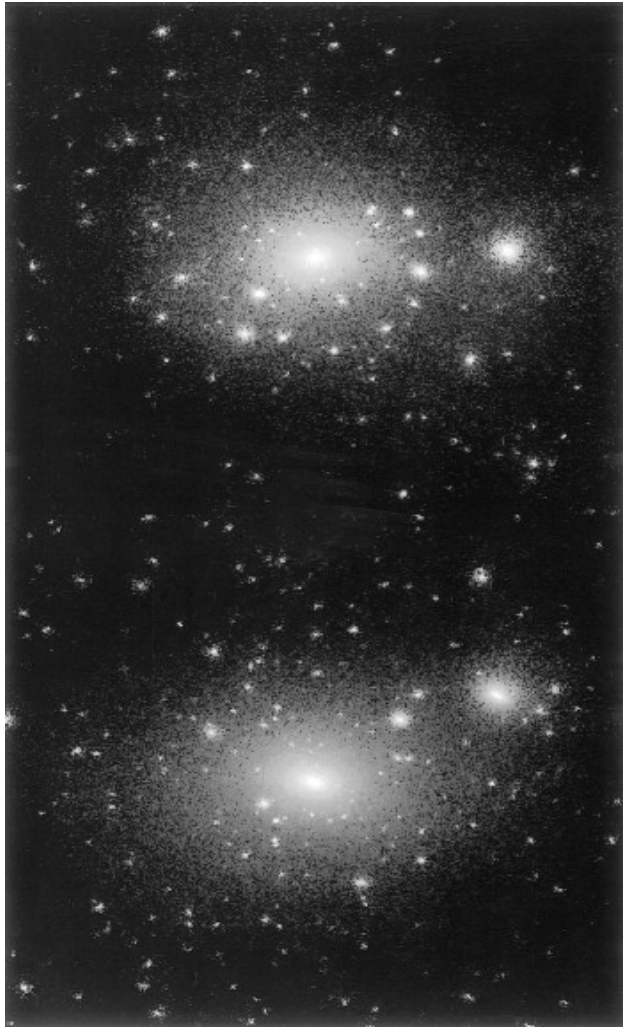
**暗黒物質**

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



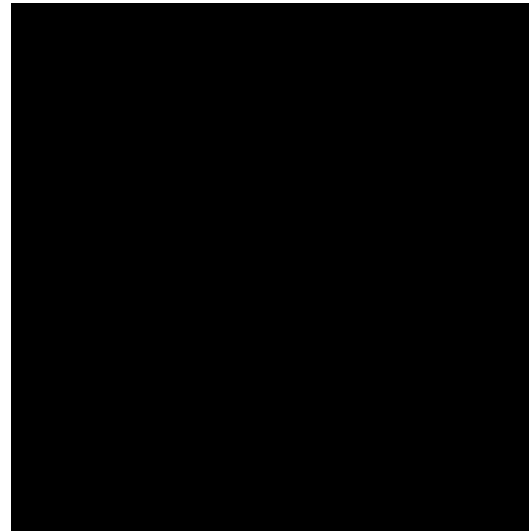
理論が一般に予言する事柄:

1. ほぼスケール不変

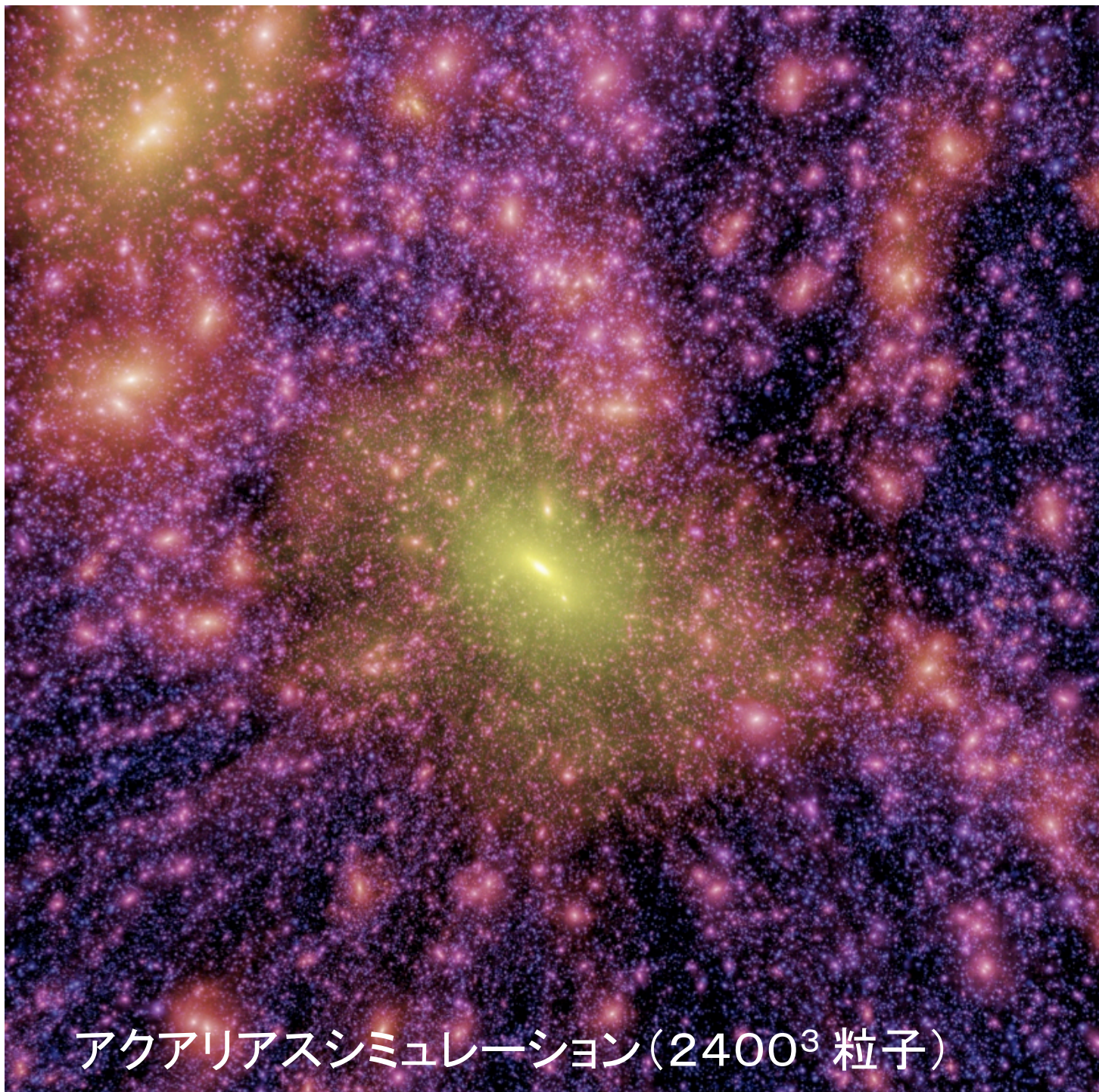
⇒ 銀河の中にも多くの部分構造

2. ボトムアップ型構造形成

⇒ 合体が頻繁に起こる



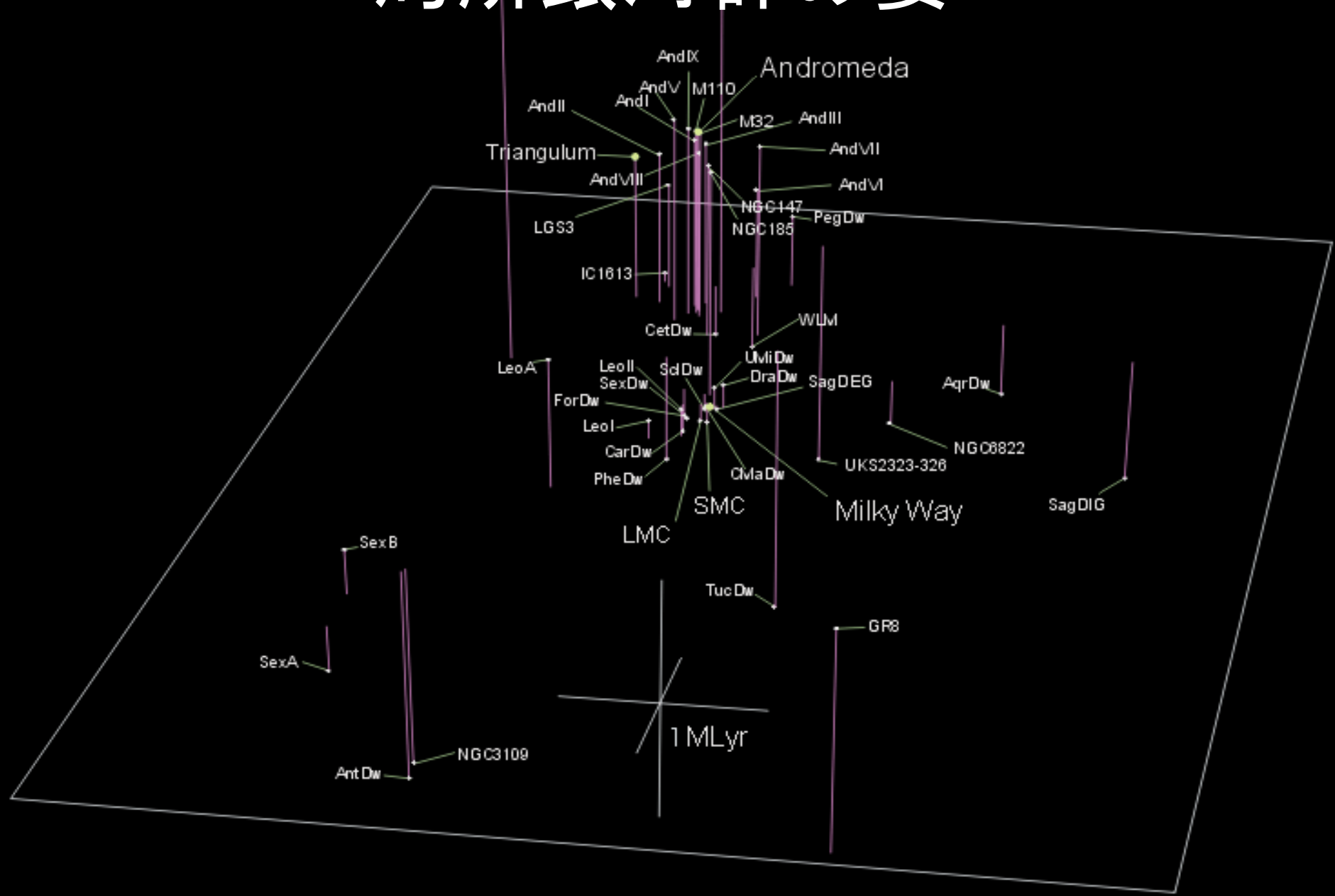
冷たい暗黒物質モデルの予言



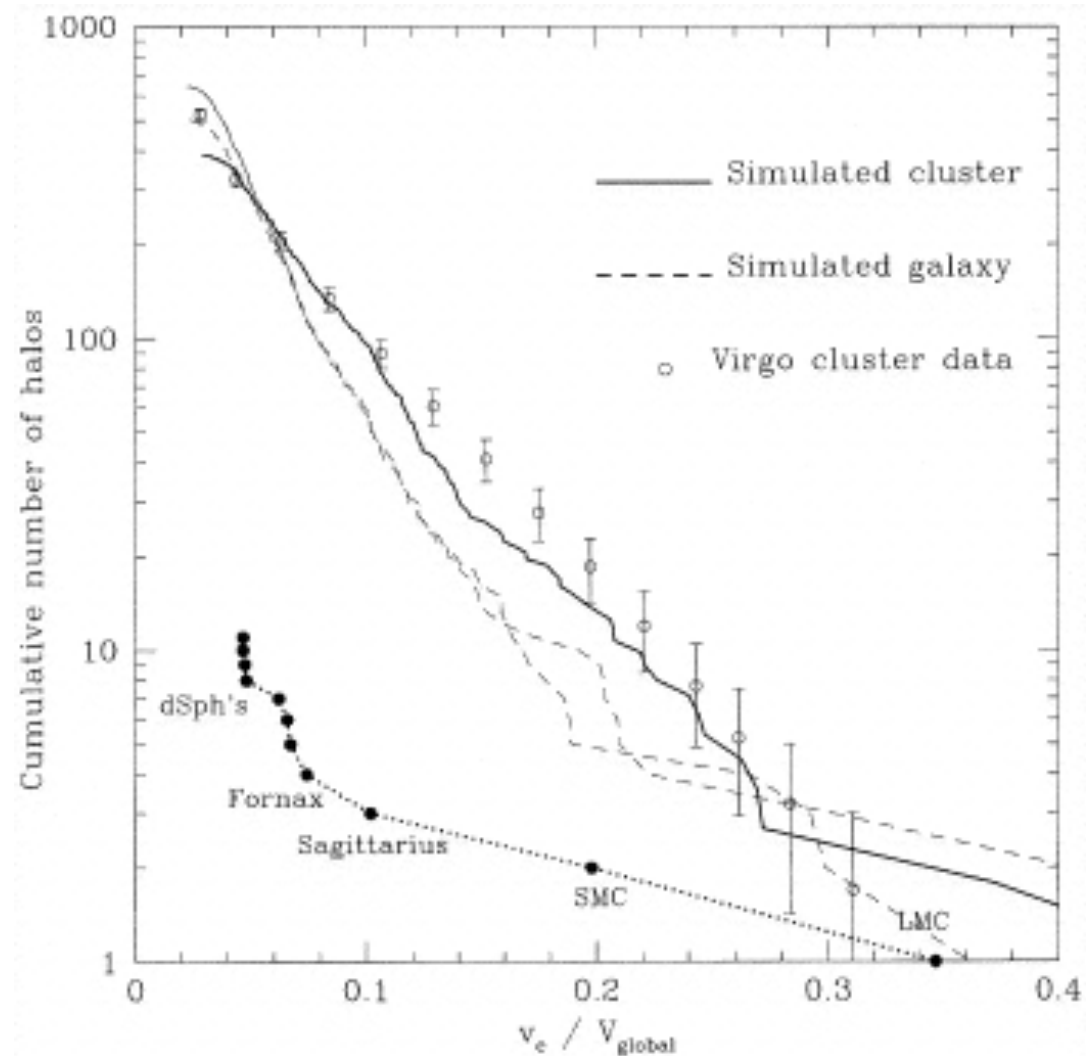
アクアリアスシミュレーション(2400<sup>3</sup> 粒子)



# 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)

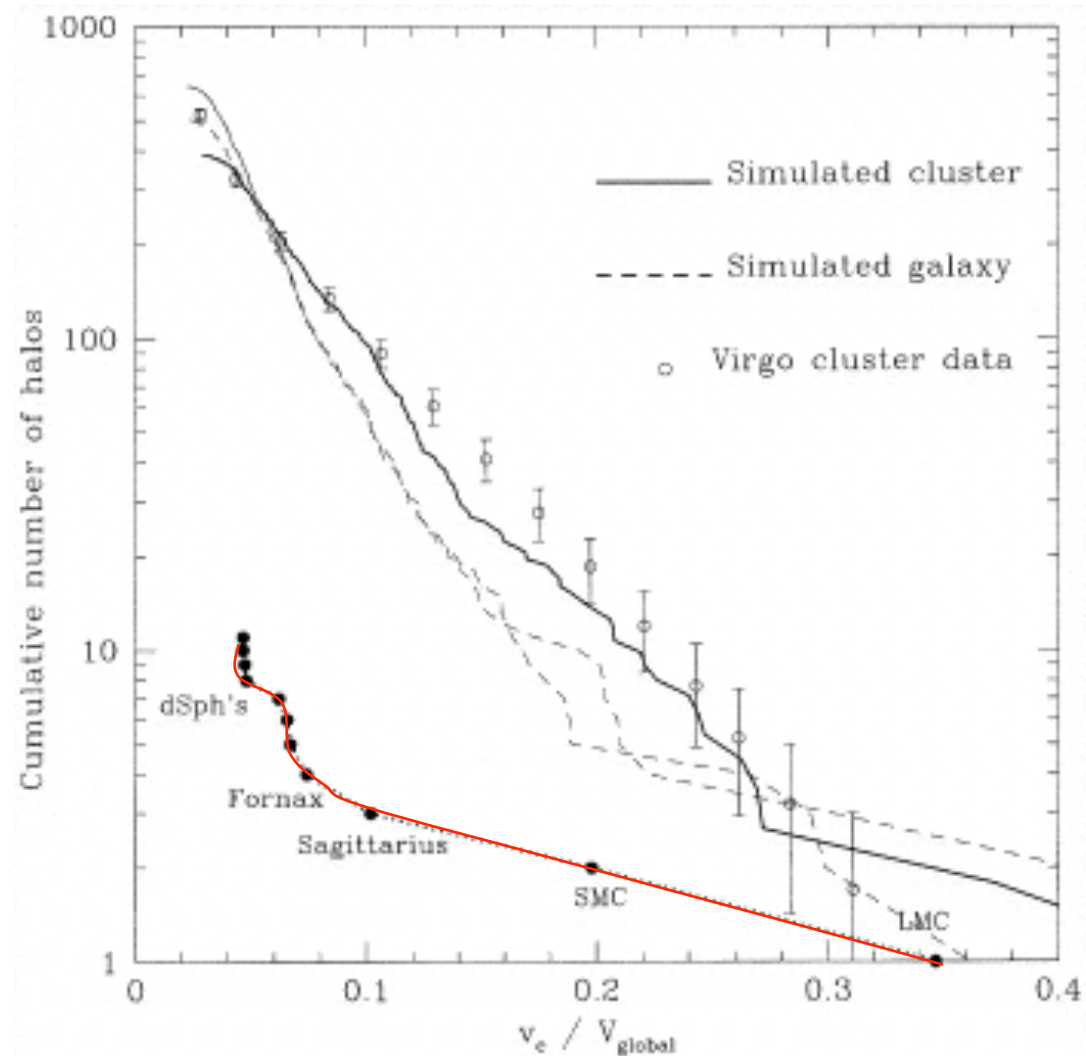
# THE FORMATION OF A BULGELESS GALAXY WITH A SHALLOW DARK MATTER CORE

**Fabio Governato** (University of Washington)  
**Chris Brook** (University of Central Lancashire)  
**Lucio Mayer** (ETH and University of Zurich)  
and the N-Body Shop

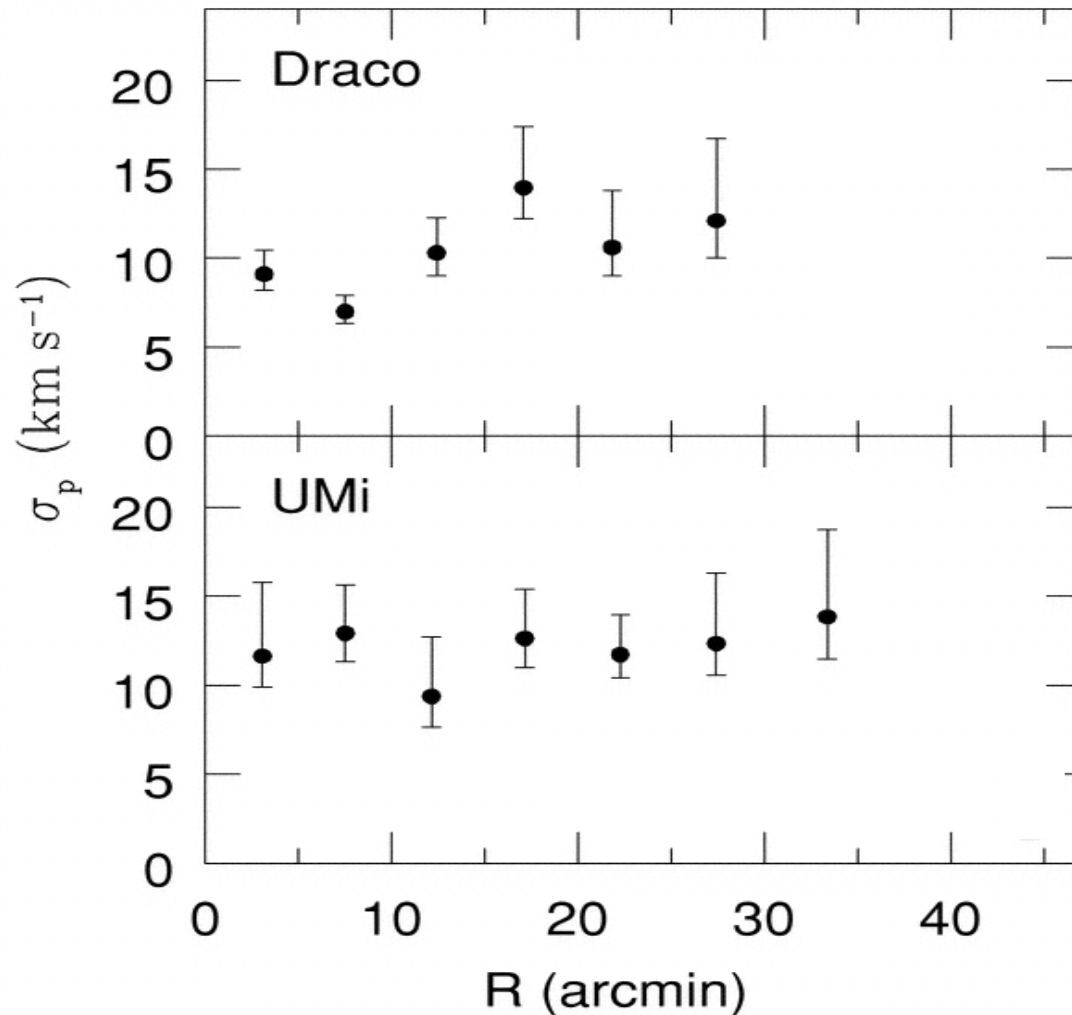
KEY: Blue: gas density map. The brighter regions represent gas that is actively forming stars. The clock shows the time from the Big Bang. The frame is 50,000 light years across.

Simulations were run on Columbia (NASA Advanced Supercomputing Center) and at ARSC

# 衛星銀河の速度測定



# 衛星銀河速度分散の観測



Wilkinson et al. (2005)  
WHTwyffosを使った観測

速度分散はR > 1kpc の  
ところで減少していることが  
わかった。

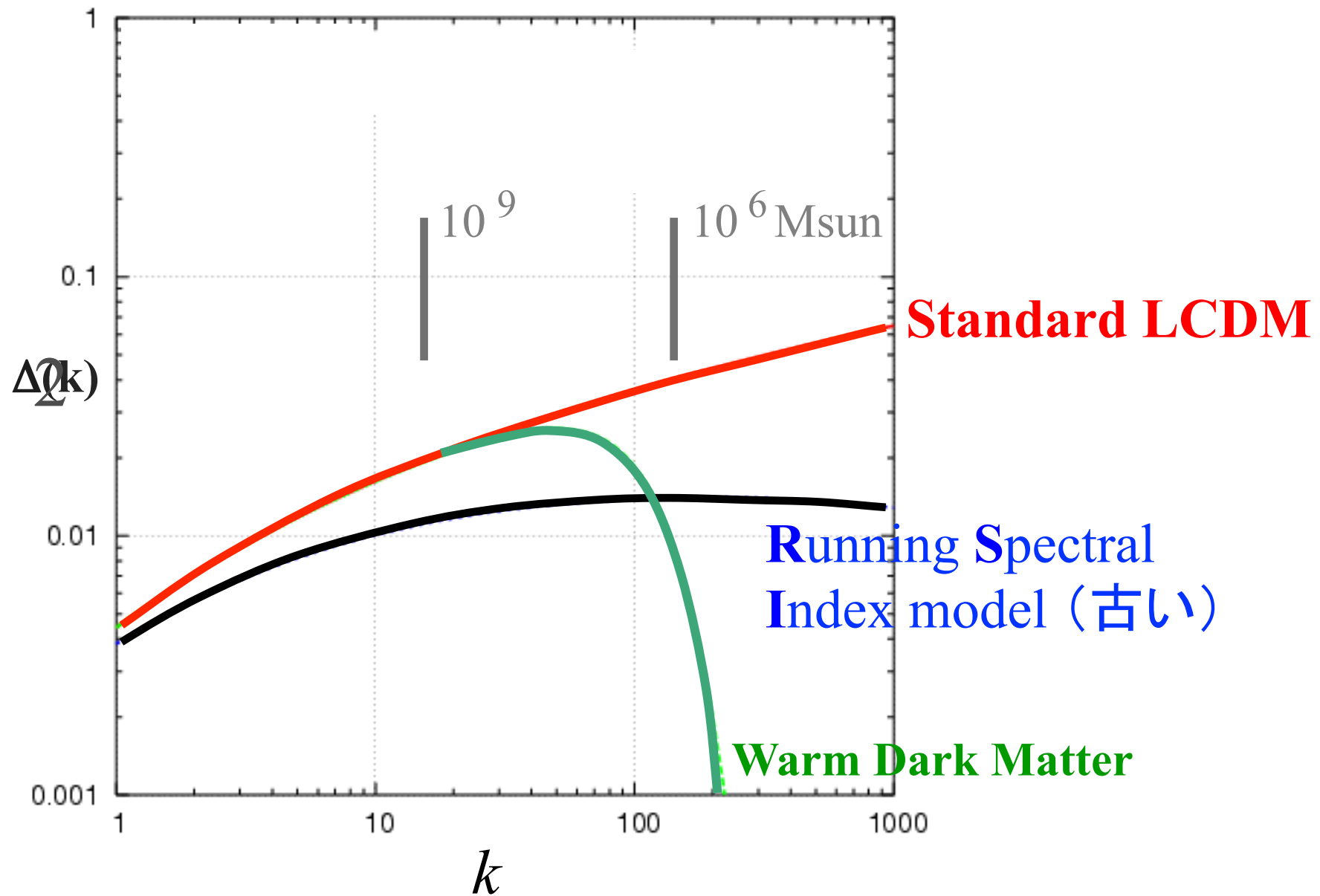


Tidal stripping ではない?  
大きなハローの中にある?

# 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:

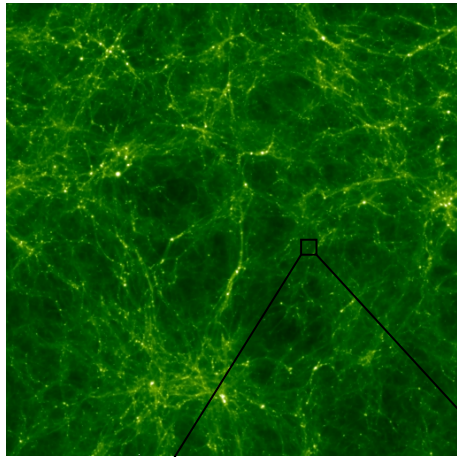
$$v_0(Z) \approx .012 (1 + Z) \left( \frac{\Omega_X}{0.3} \right)^{1/3} \left( \frac{h}{0.65} \right)^{2/3} \left( \frac{1.5}{g_X} \right)^{1/3} \left( \frac{\text{keV}}{m_X} \right)^{4/3} \text{ km s}^{-1}$$

自由流減衰の長さスケール

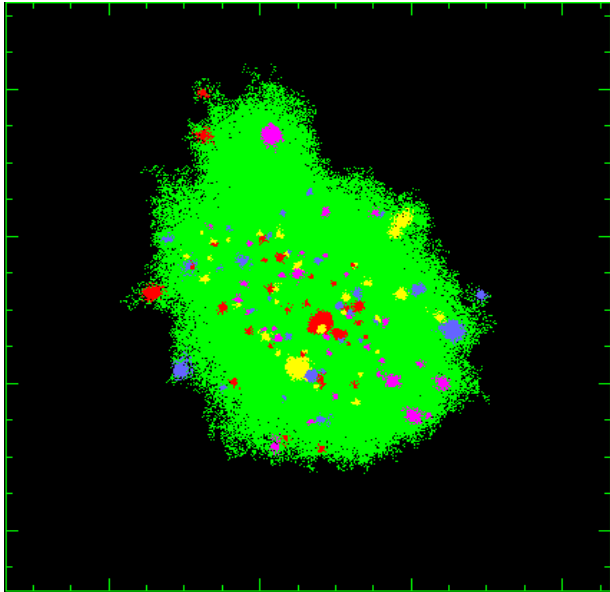
$$R_S \approx 0.31 \left( \frac{\Omega_X}{0.3} \right)^{0.15} \left( \frac{h}{0.65} \right)^{1.3} \left( \frac{\text{keV}}{m_X} \right)^{1.15} h^{-1} \text{ Mpc} .$$

# サブハローの個数

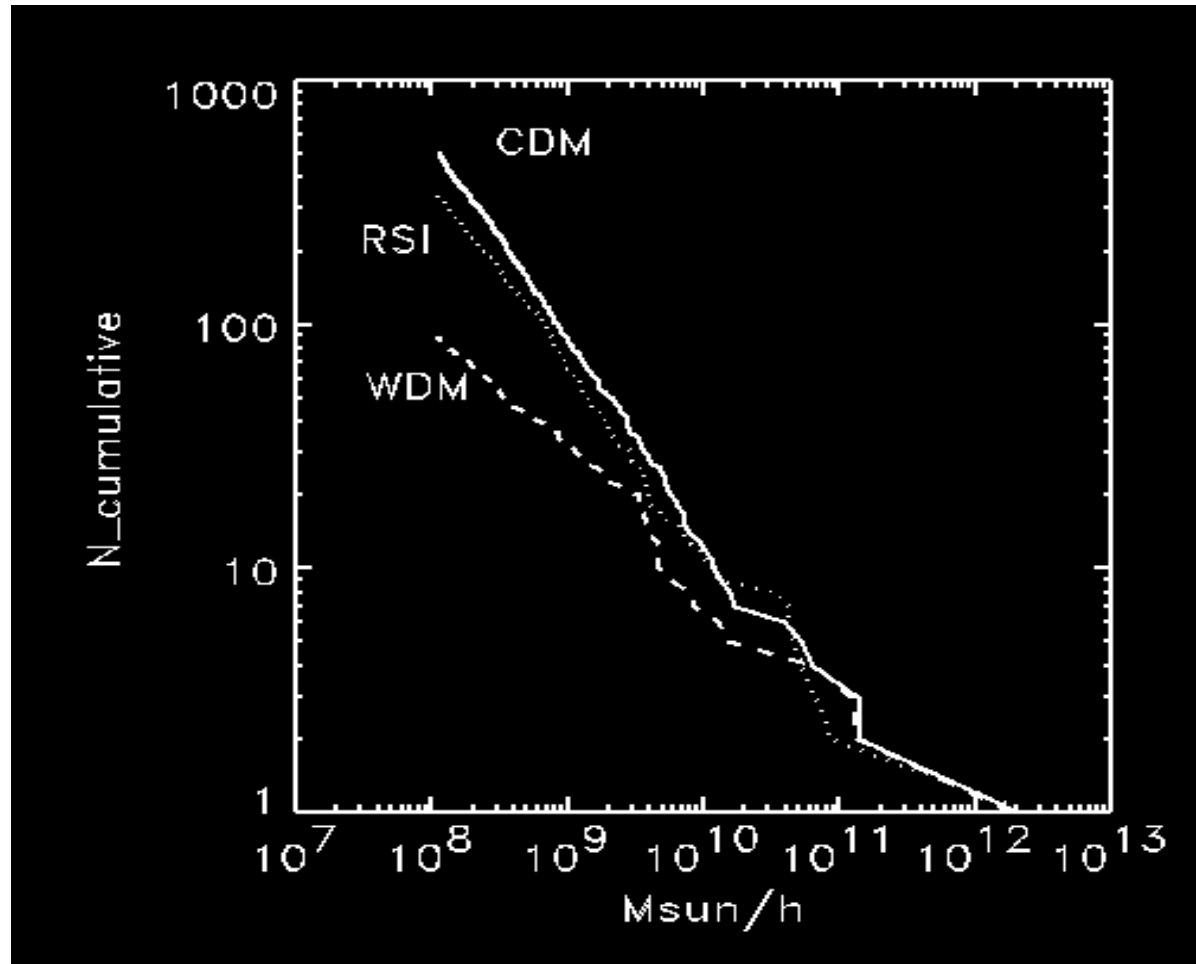
N体計算の結果



CDM

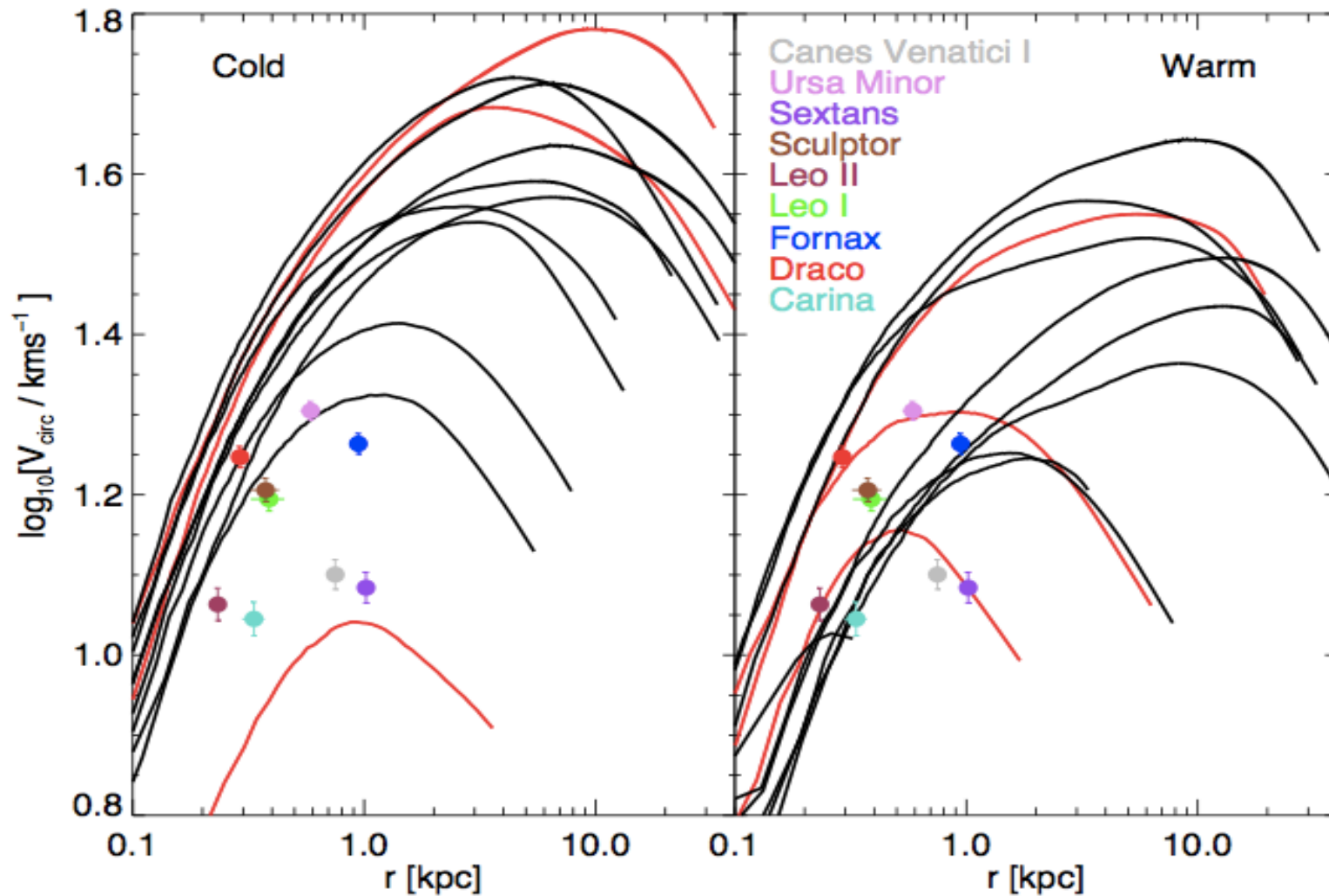


~ 7 %



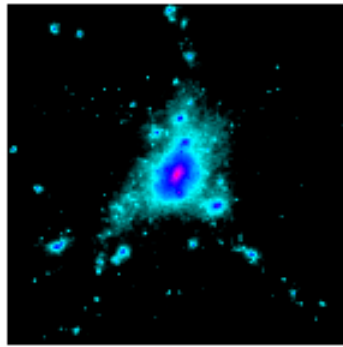
# 実は最近新たな問題が...

CDMではやはり物質が凝縮しすぎ



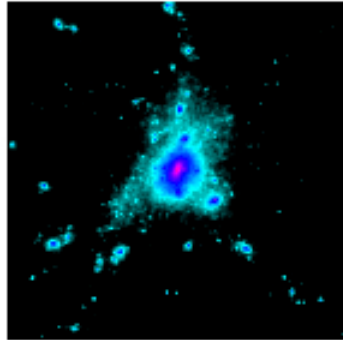
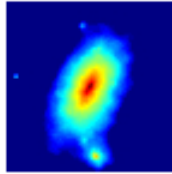
# 相互作用するダークマター

暗黒物質粒子衝突によるサブハローの蒸発



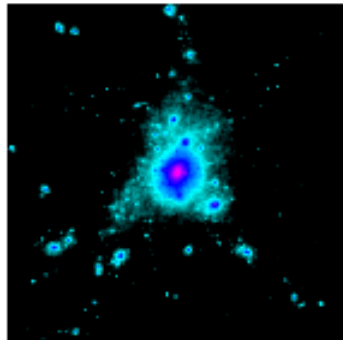
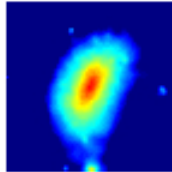
S1

1 : 0.82 : 0.65



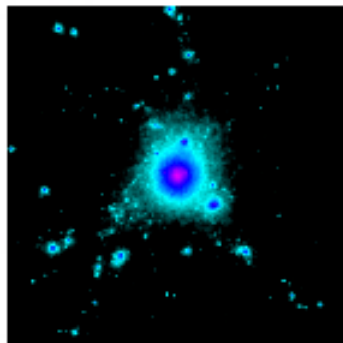
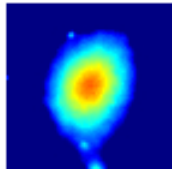
S1Wa

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



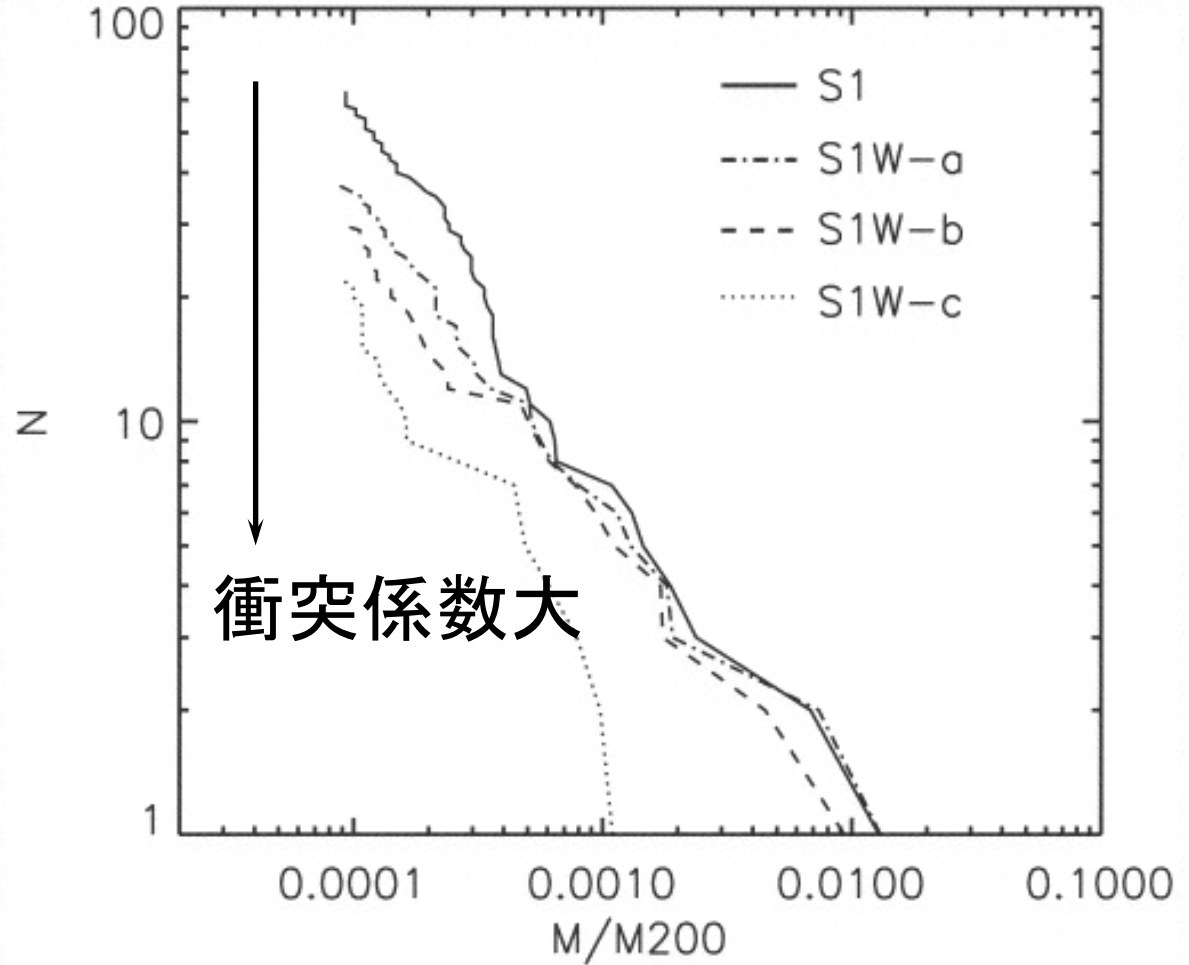
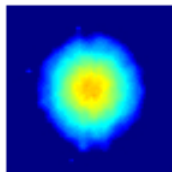
S1Wb

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



S1Wc

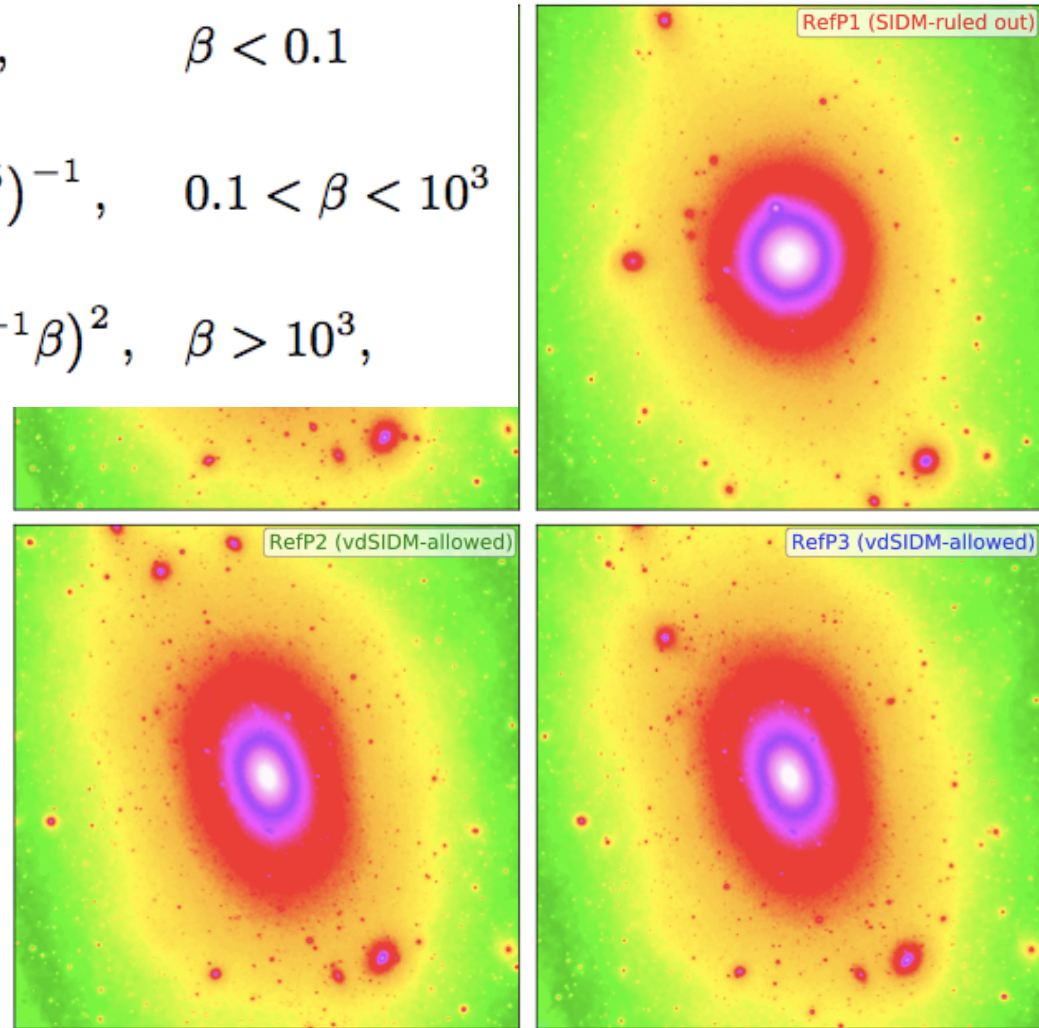
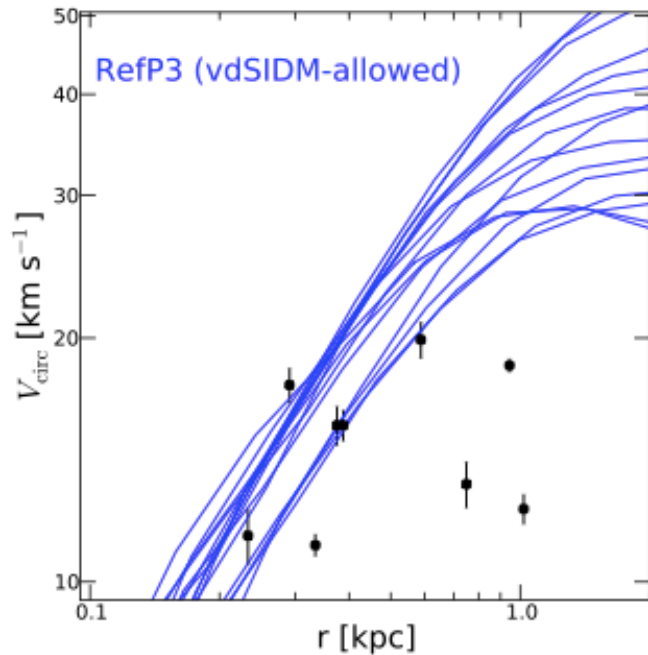
$\sigma^* = 10.0 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$   
 $r_c = 160 h^{-1} \text{ kpc}$   
 1 : 0.98 : 0.89



Yoshida+ (2000)

# 湯川型相互作用(最近のモデル)

$$\frac{\sigma_T}{\sigma_{T\max}} \approx \begin{cases} \frac{4\pi}{22.7} \beta^2 \ln(1 + \beta^{-1}), & \beta < 0.1 \\ \frac{8\pi}{22.7} \beta^2 (1 + 1.5\beta^{1.65})^{-1}, & 0.1 < \beta < 10^3 \\ \frac{\pi}{22.7} (\ln\beta + 1 - \frac{1}{2}\ln^{-1}\beta)^2, & \beta > 10^3, \end{cases}$$



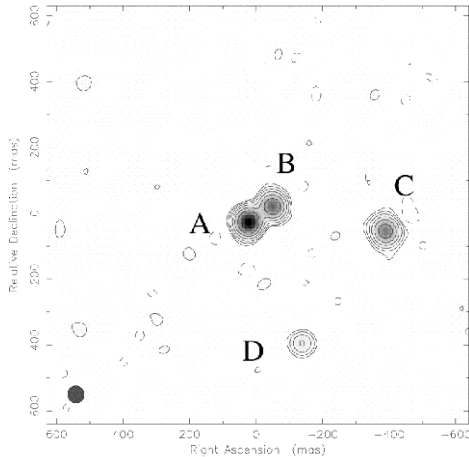
Vogelsberger et al. 2012

# 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 $\gamma$ 線
- ・ 銀河系やM31の星の形成史と運動

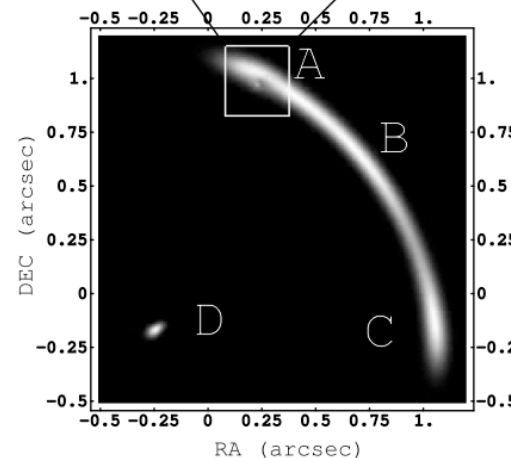
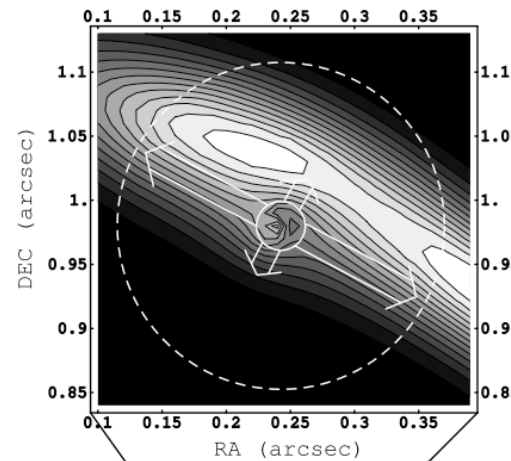
# 重力レンズをつかった検出

Inoue&Chiba (2003,2005a,b)



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

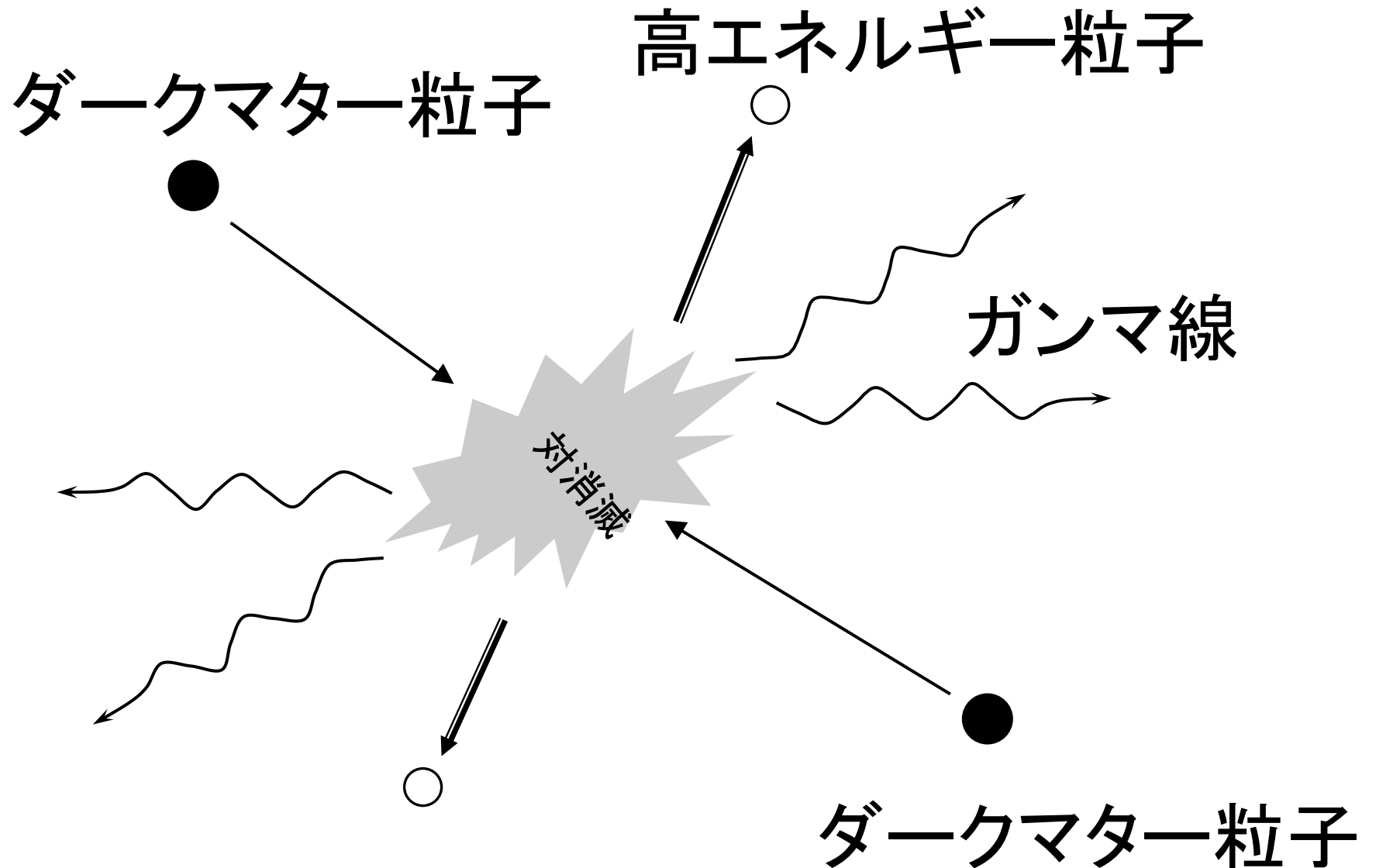
大きなサブハローの寄与  
が卓越。  
視線方向の偶然の重なり  
と区別できない



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

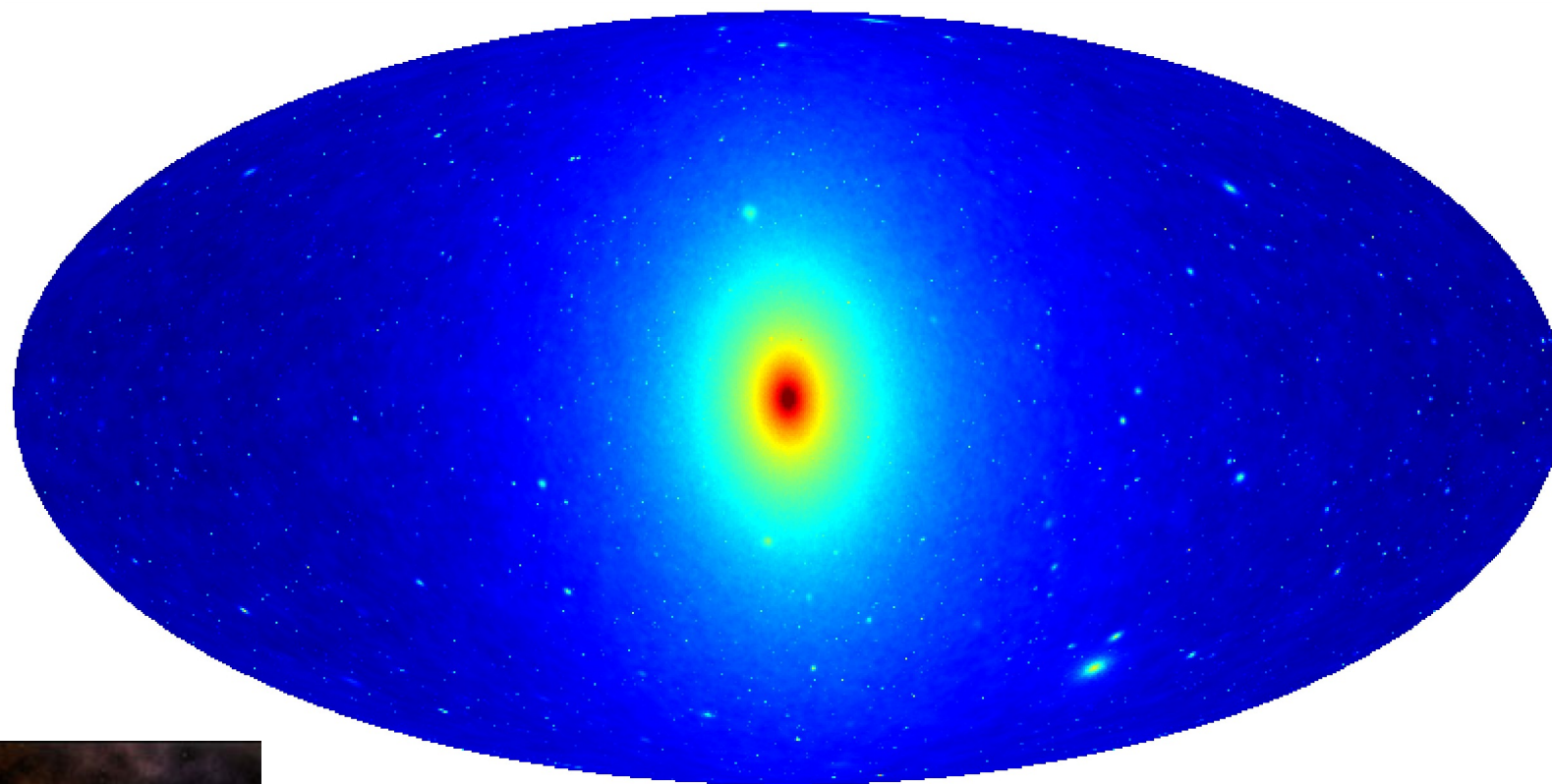
ALMAで数時  
間！！


# 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  
 $\log S (M_{\text{sun}}^2 \text{kpc}^{-5} \text{sr}^{-1})$



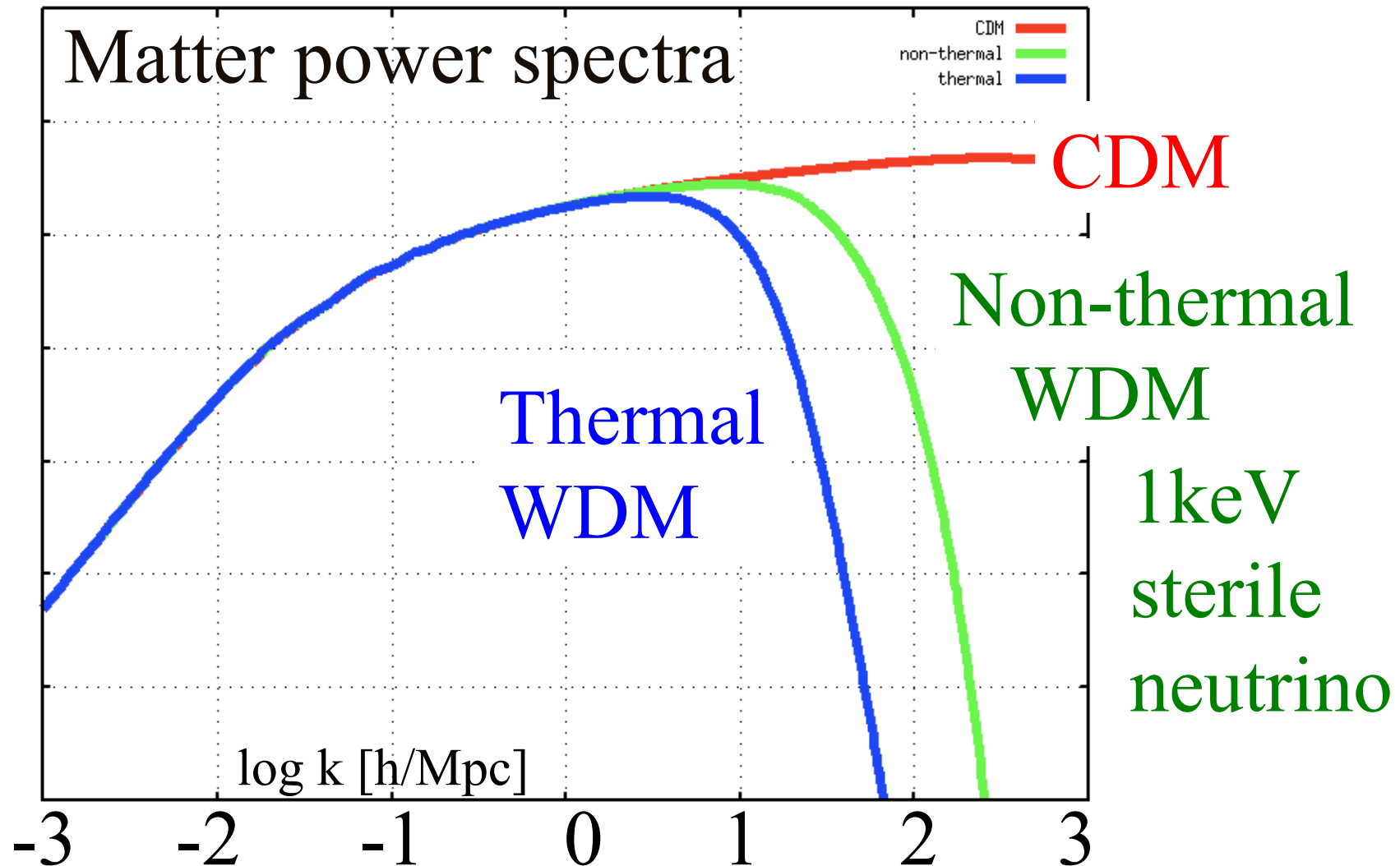
Fermi ガンマ線望遠鏡

# 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  $\rho \sim r^{-1.5}$

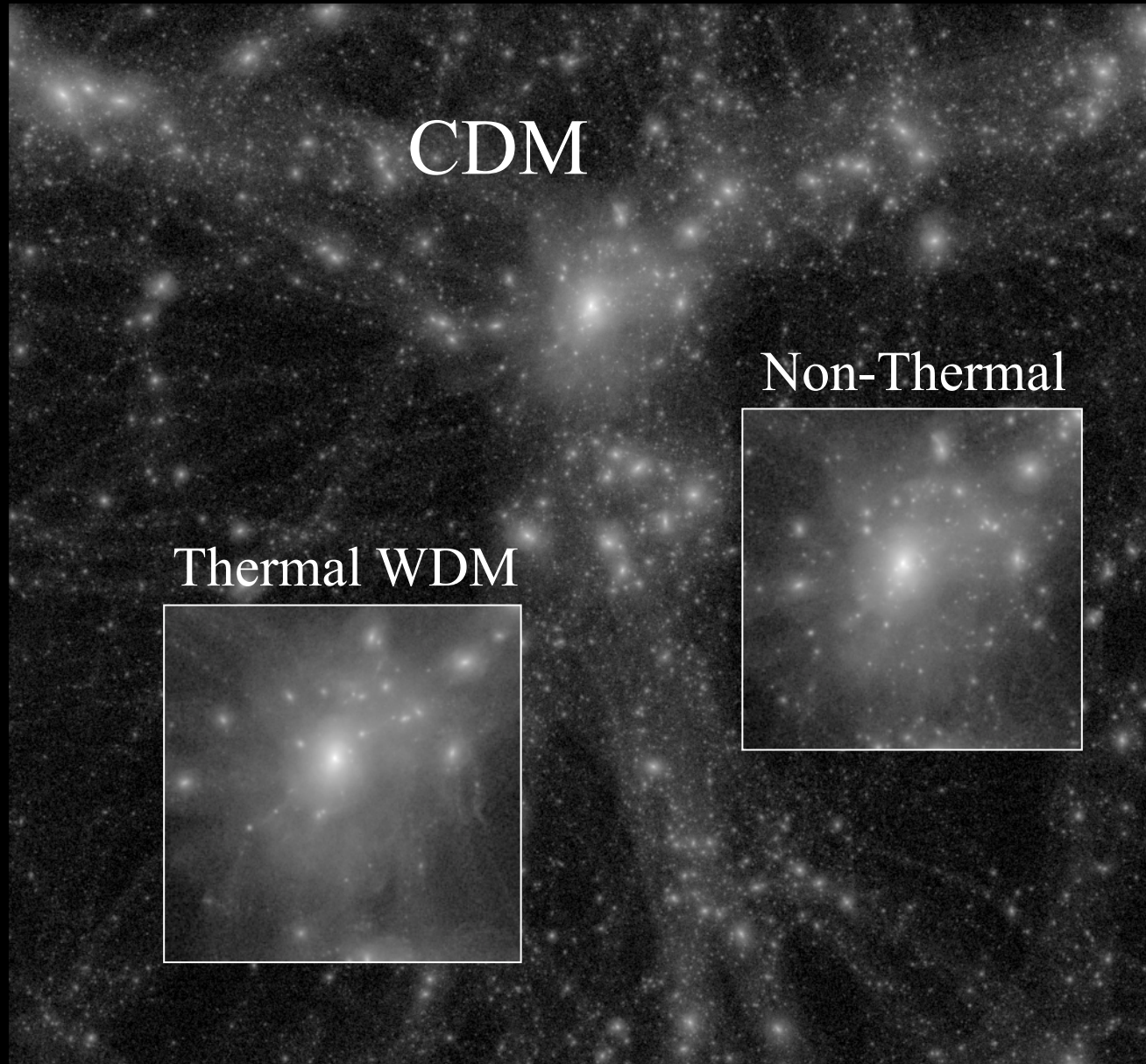
# Warm Dark Matter Revisited: Petraki-Kusenko-Boyanovski model



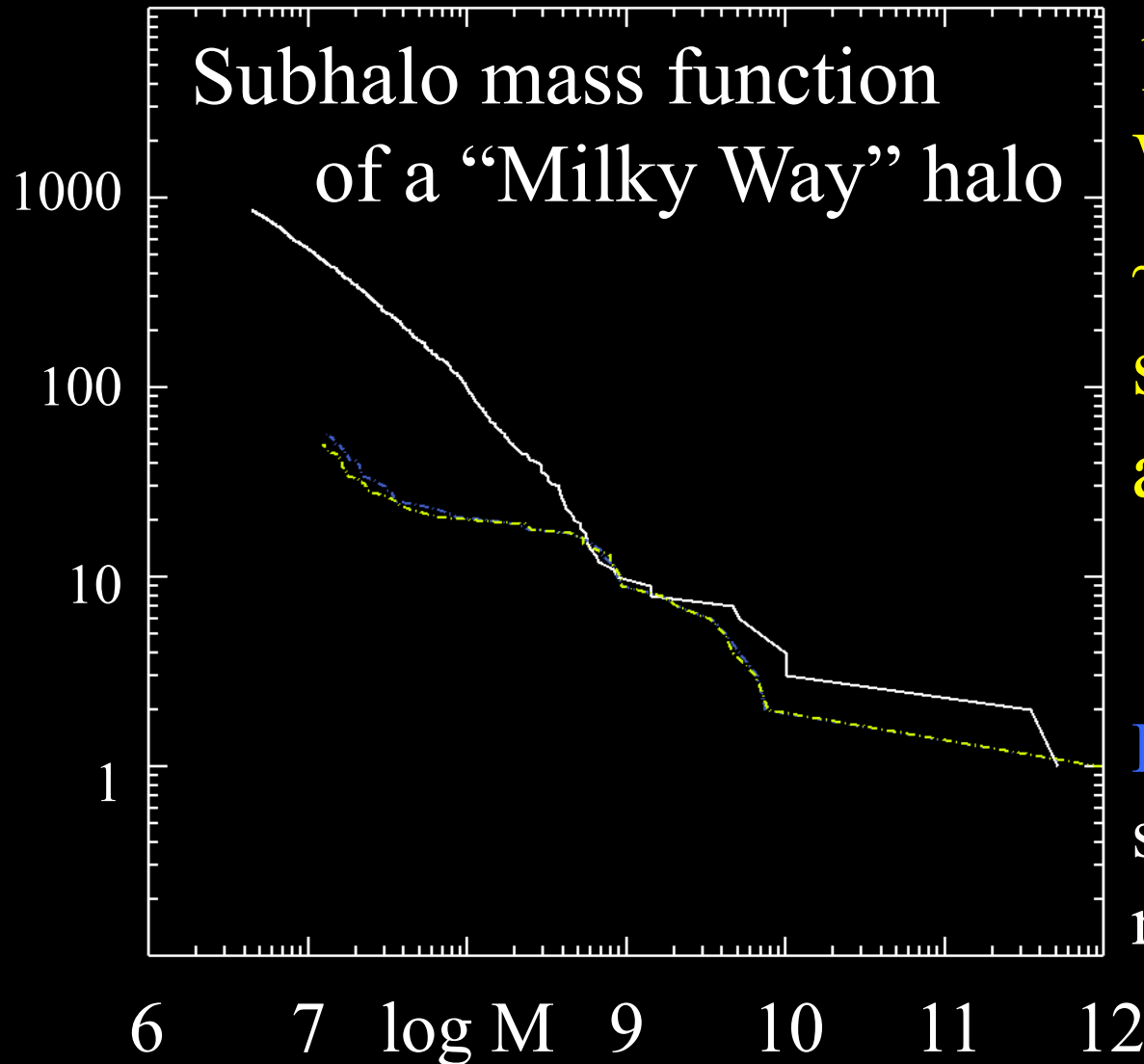
# Structure of dark halos



# Structure of dark halos



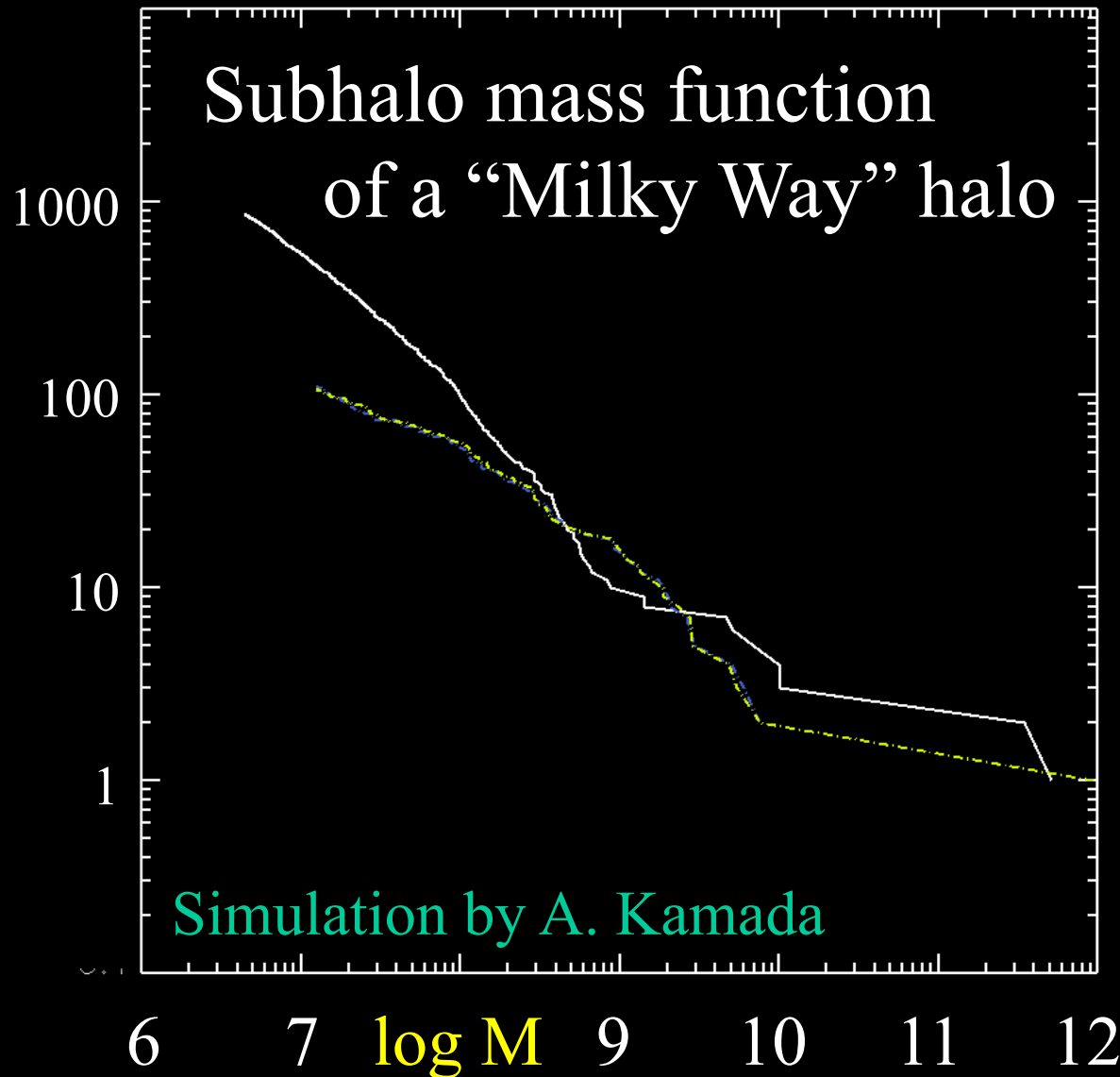
# Substructure in tWDM models



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

Blue/yellow lines  
show ICs with/without  
random velocities

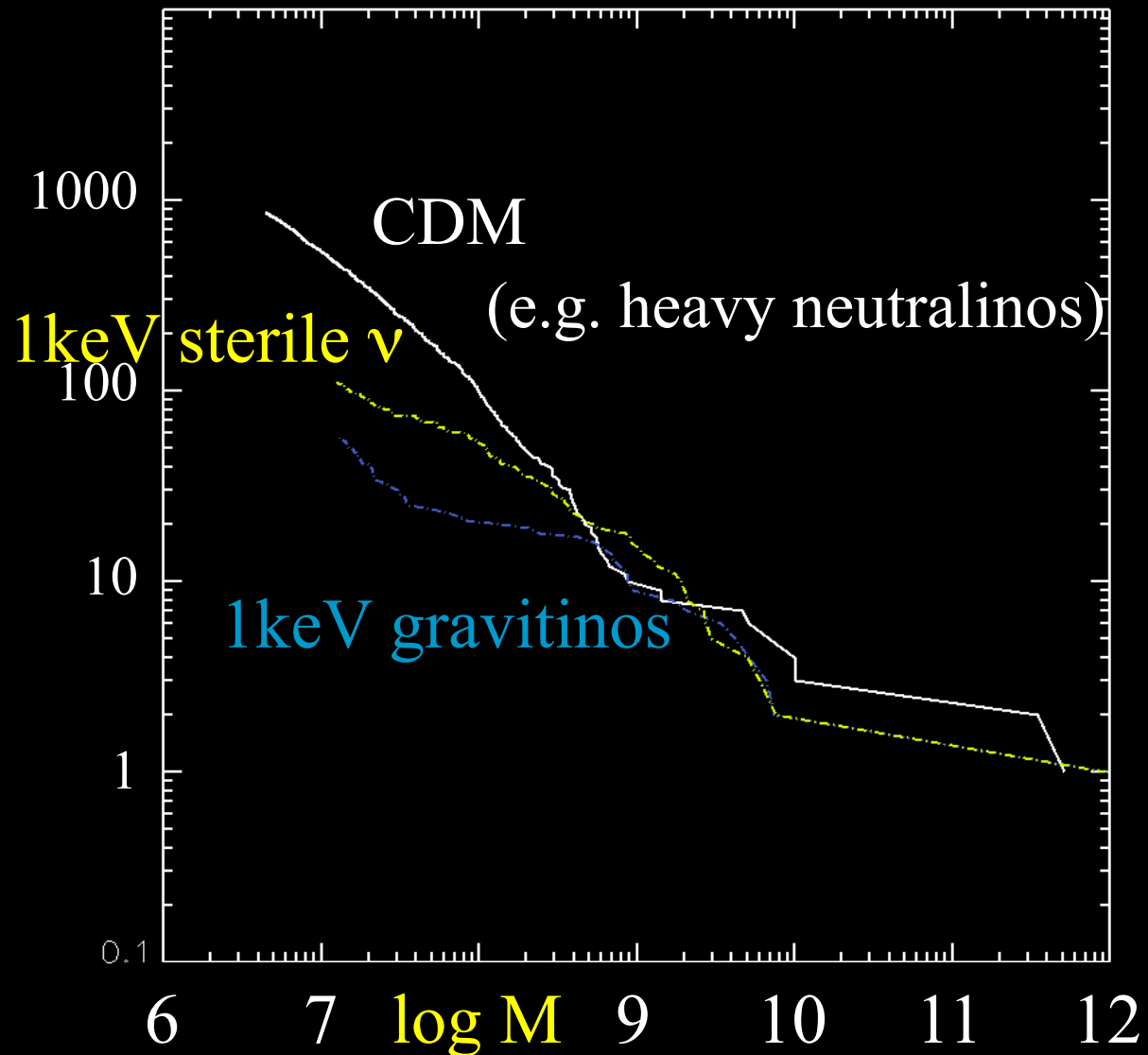
# Substructure in non-thermal models



1keV sterile  $\nu$   
WDM predicts  
slightly larger  
abundance  
at  $M < 10^8 M_{\odot}$

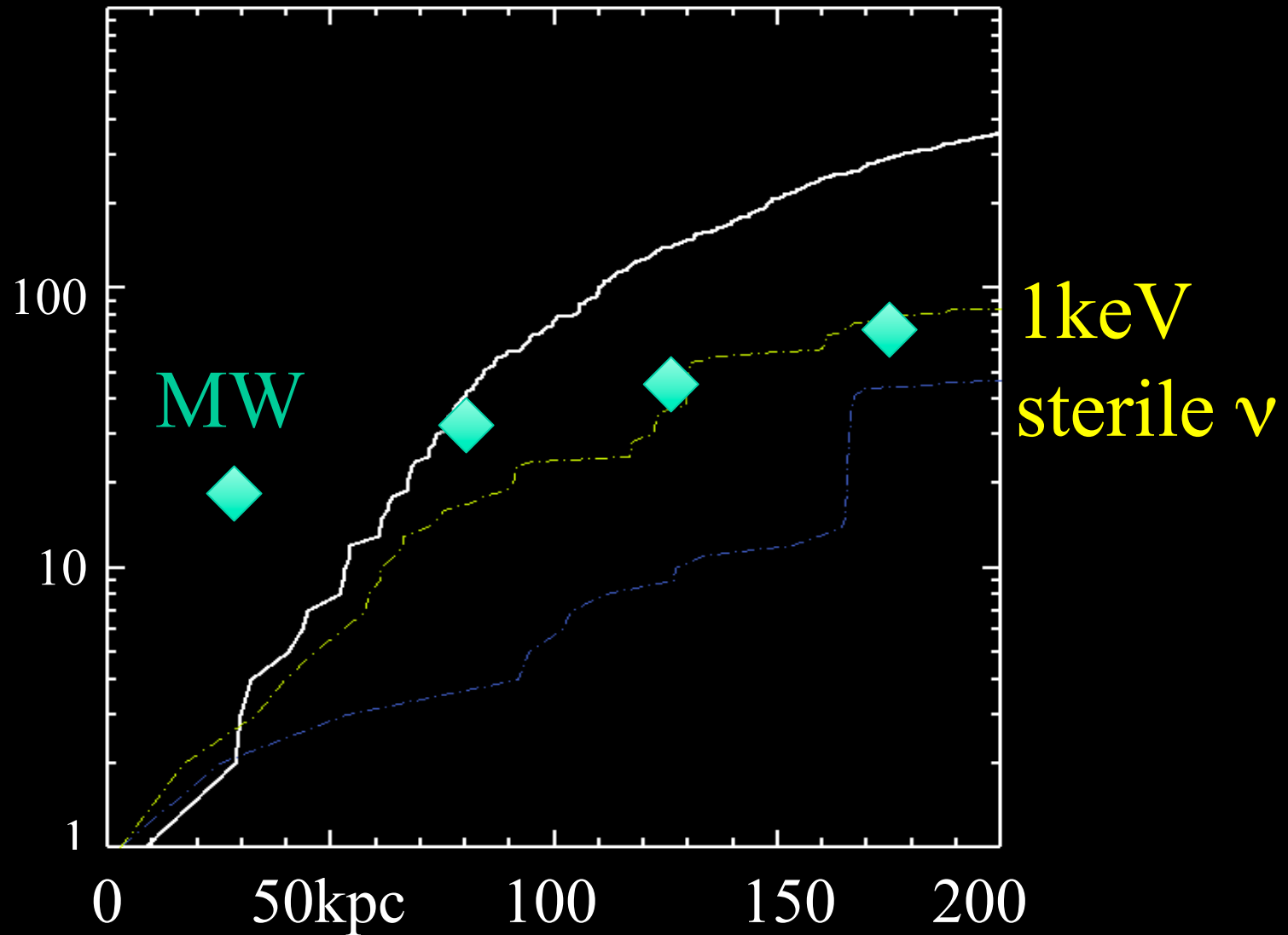
100 subhalos  
within the virial  
radius

# Thermal WDM vs Non-thermal



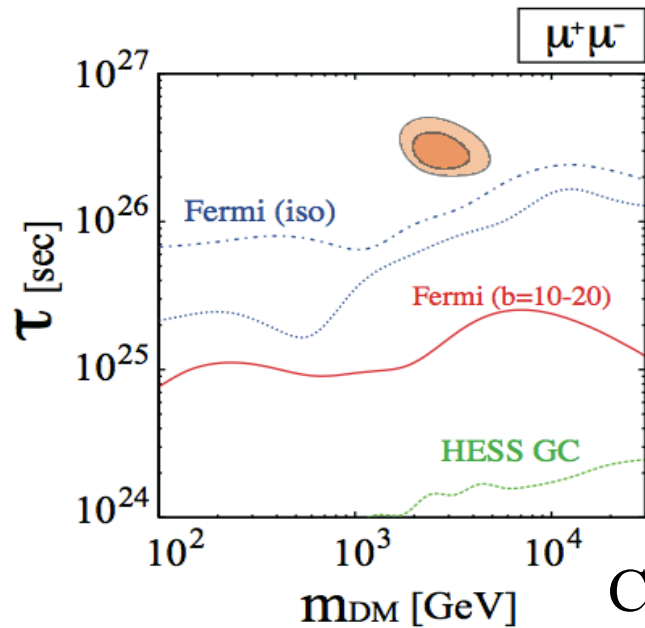
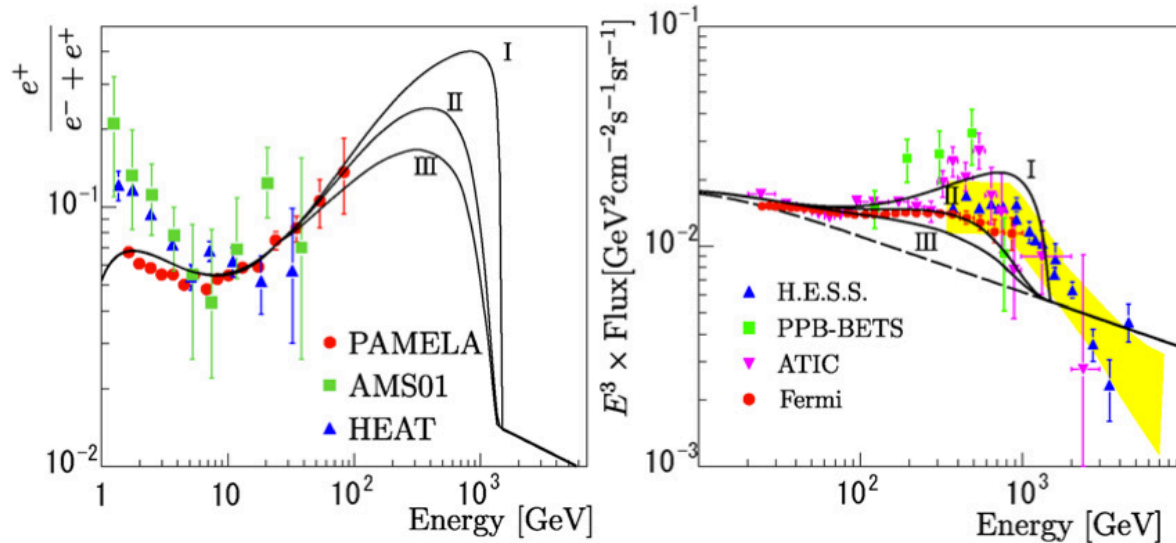


# Radial distribution



# Lifetime of dark matter

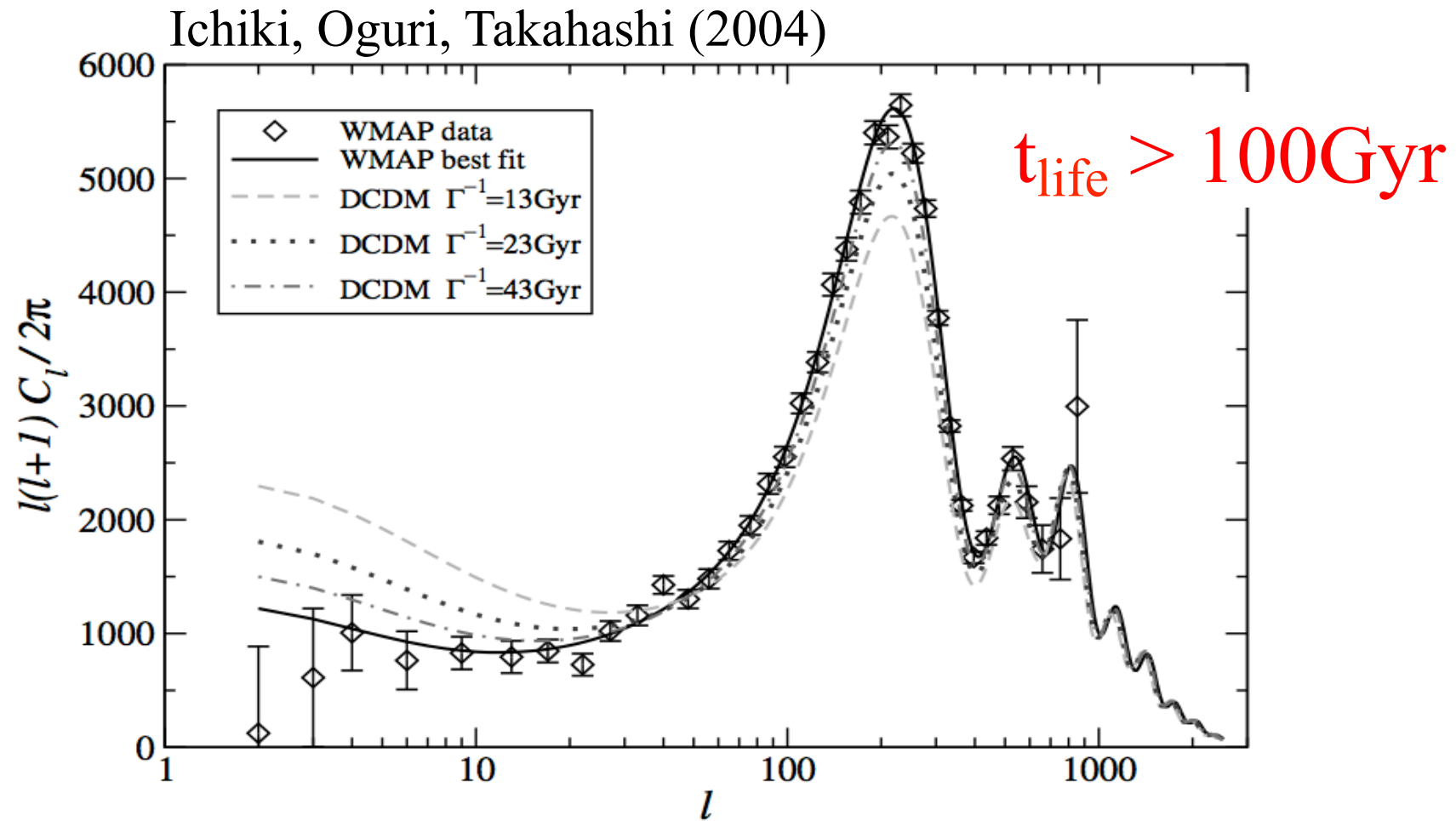
# Decaying DM after PAMELA/Fermi



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

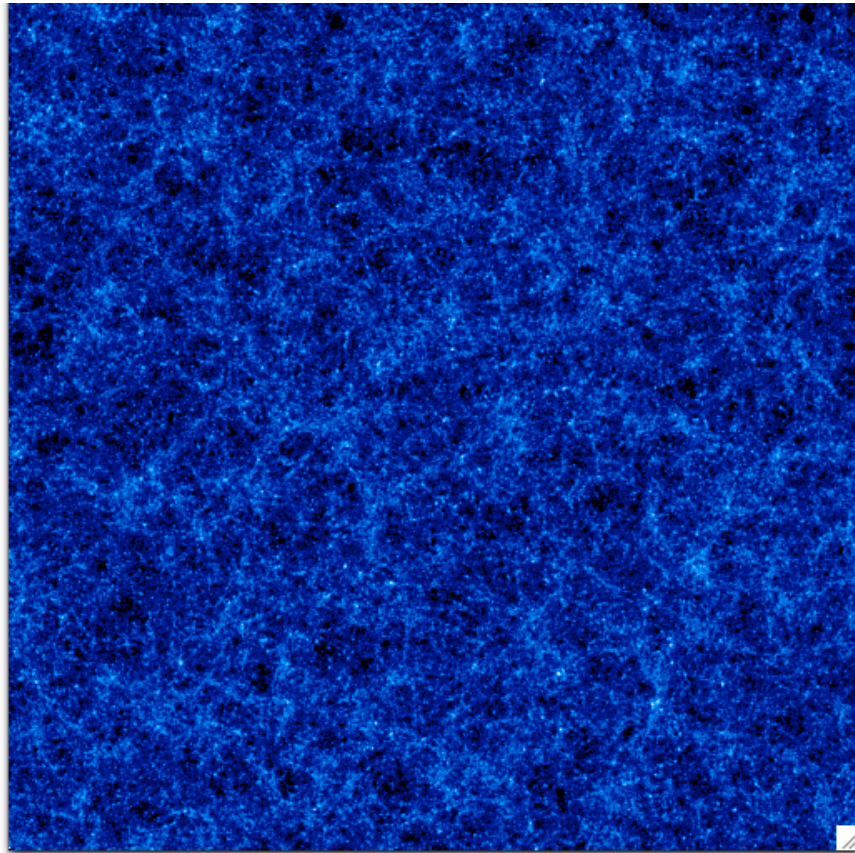
Chen, Takahashi, Yanagida (2010)

# How stable is a dark matter particle ?

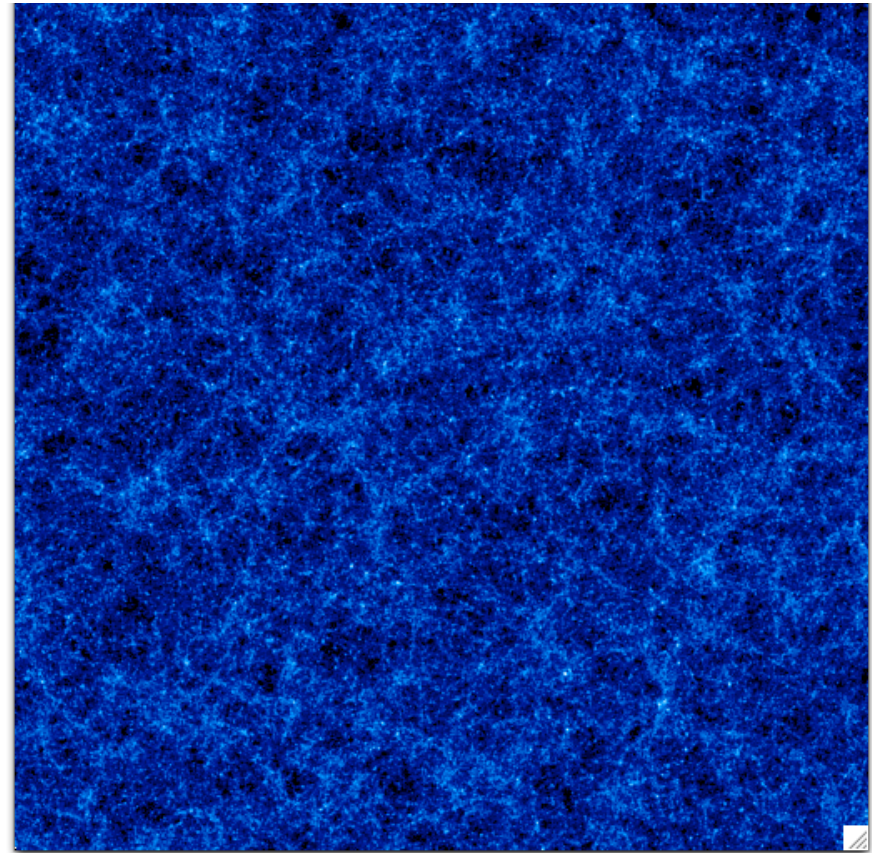


# Structure formation in DDM models

CDM

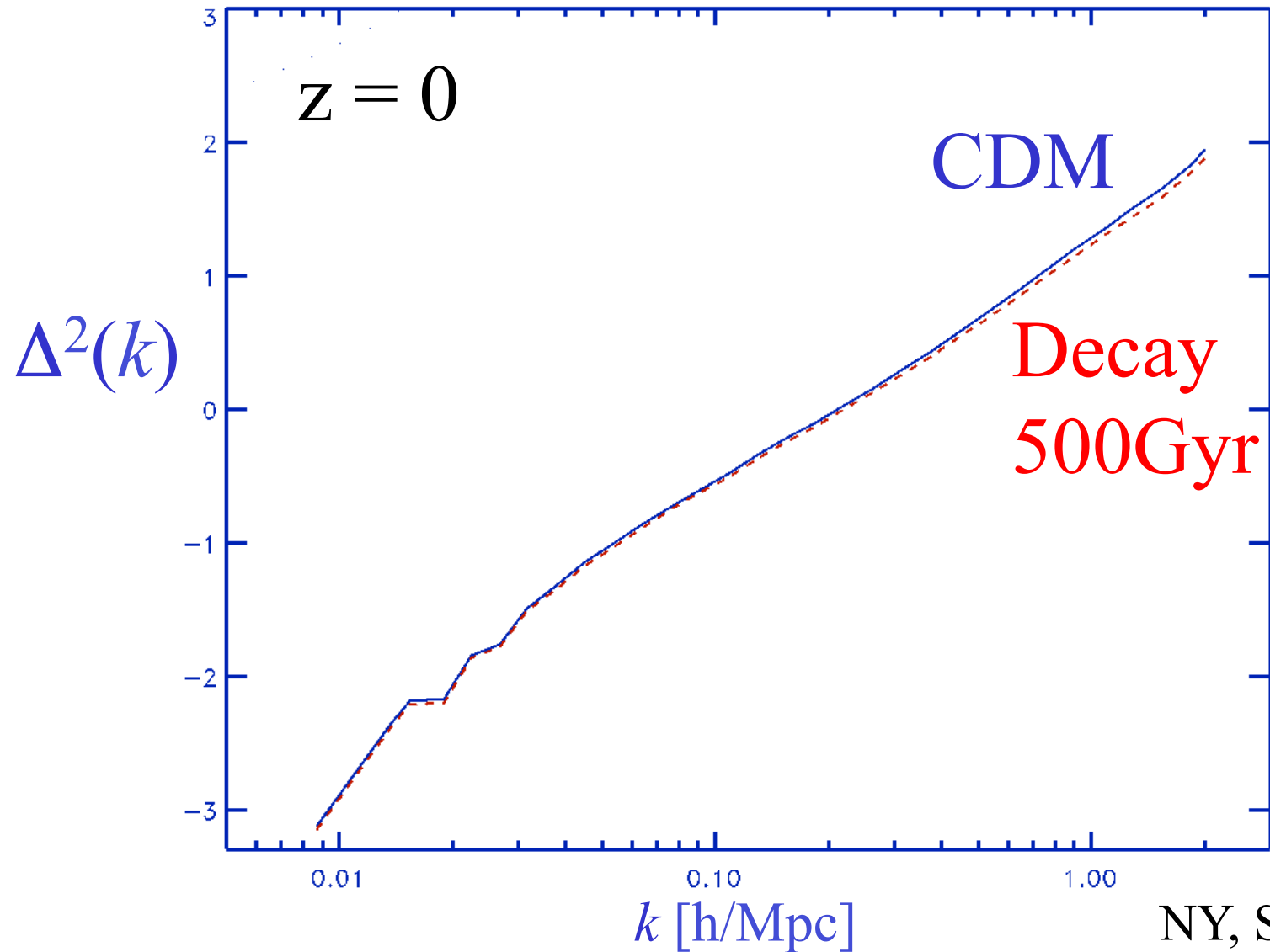


Decay 500Gyr



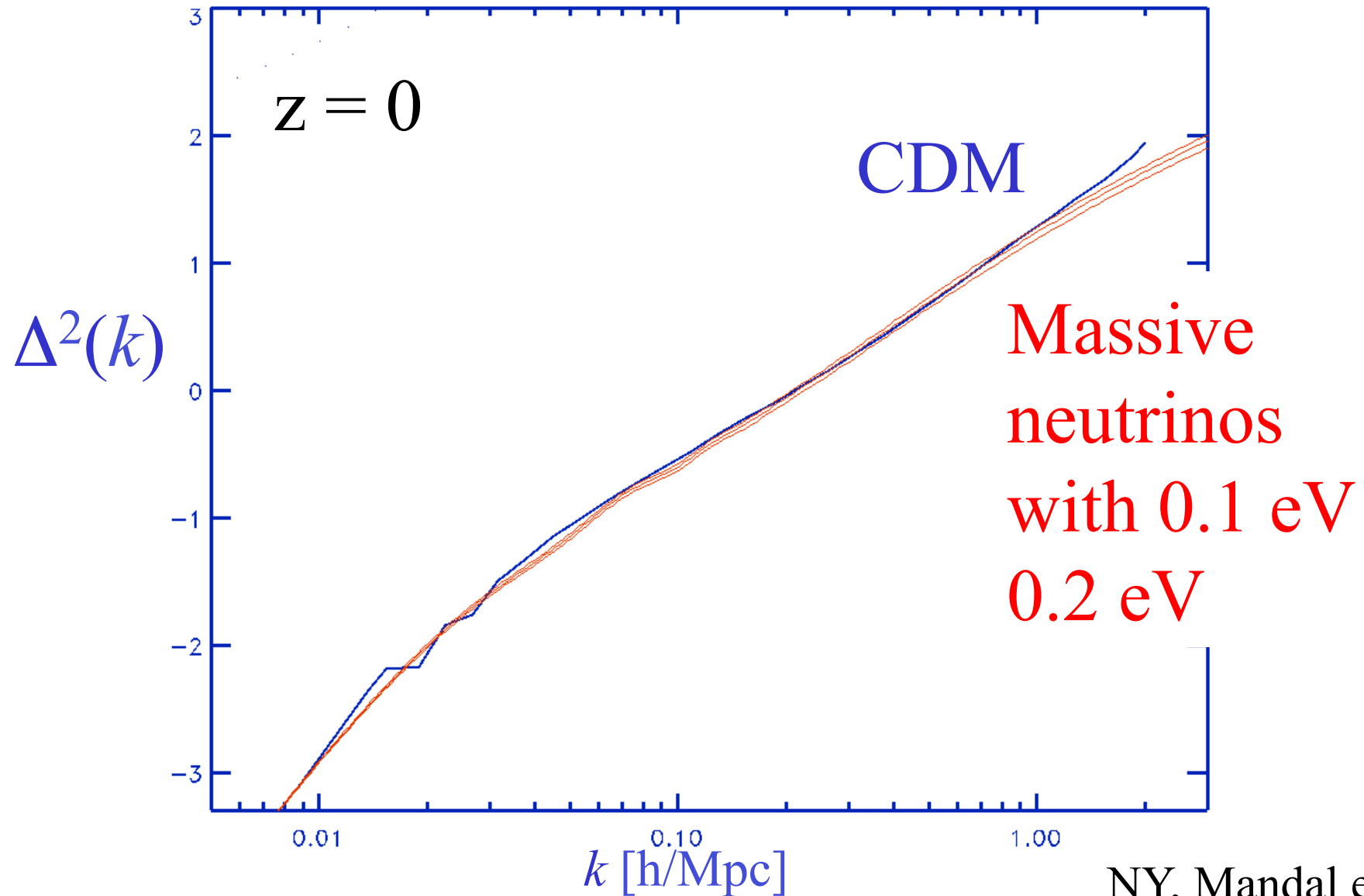
1 Giga parsecs

# The DDM power spectrum



NY, S. Mandal et al.

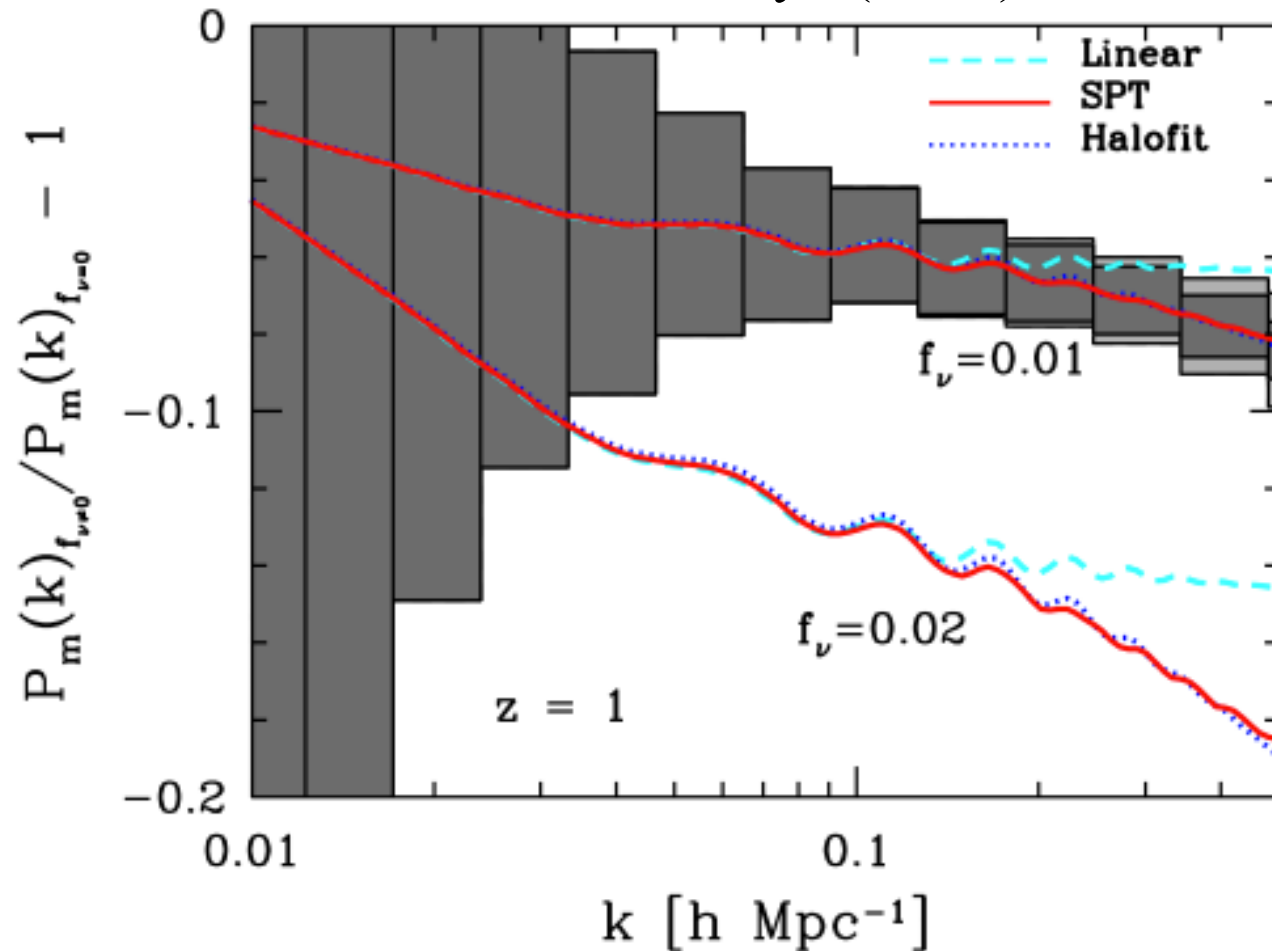
# The effect of massive neutrinos



NY, Mandal et al.

# 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 $P(k)$

