

第23回理論懇シンポジウム「林忠四郎先生と天文学・宇宙物理学」

ダークマターと 構造形成

吉田直紀

数物連携宇宙研究機構

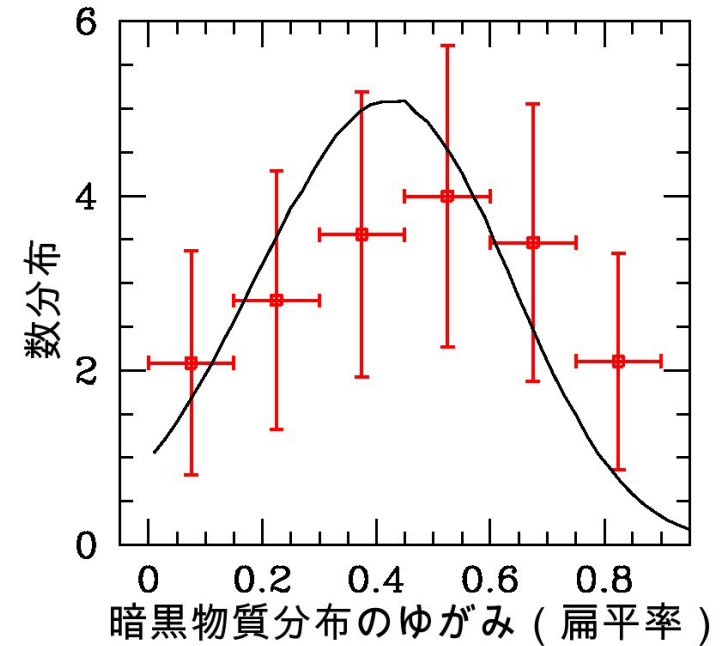
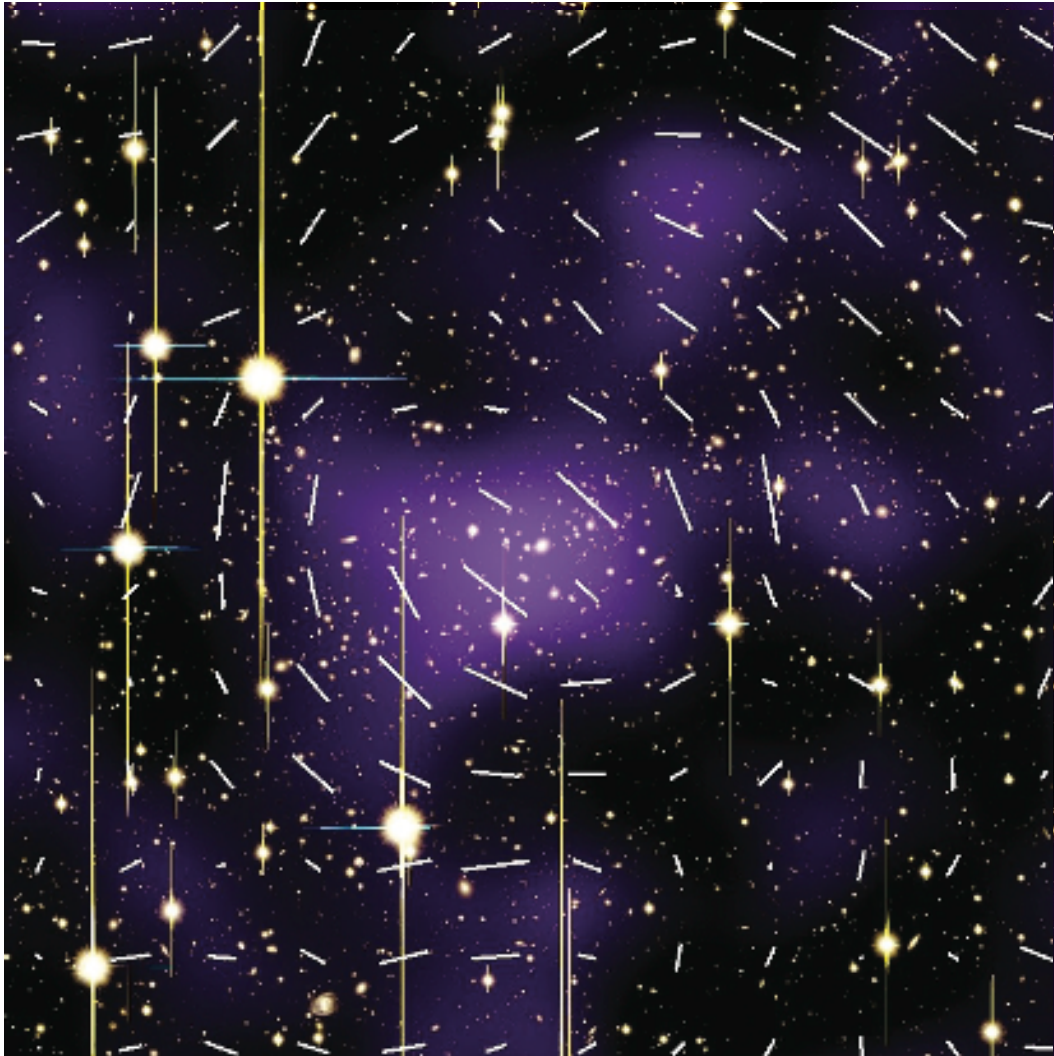
今日の予定

- ✧ 銀河に付随するダークマター
- ✧ 天体形成は全て初期に仕込まれたのか
- ✧ ダークマターの性質
質量、生成機構、散乱断面積、寿命
- ✧ N体計算



Night Sky

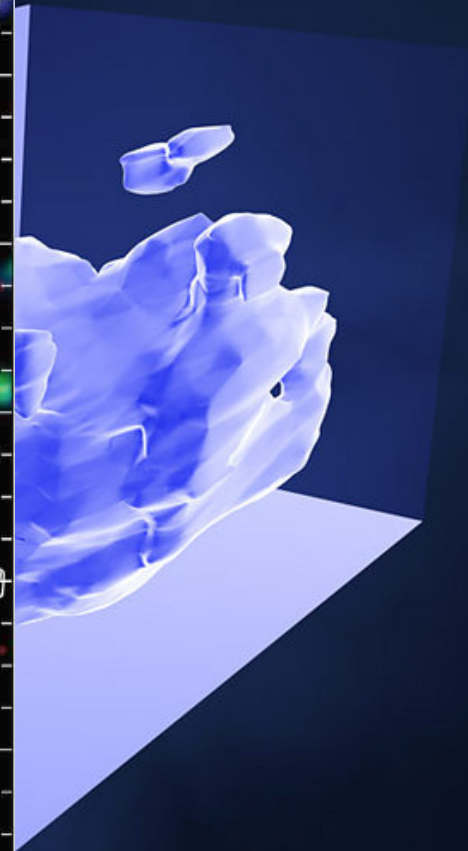
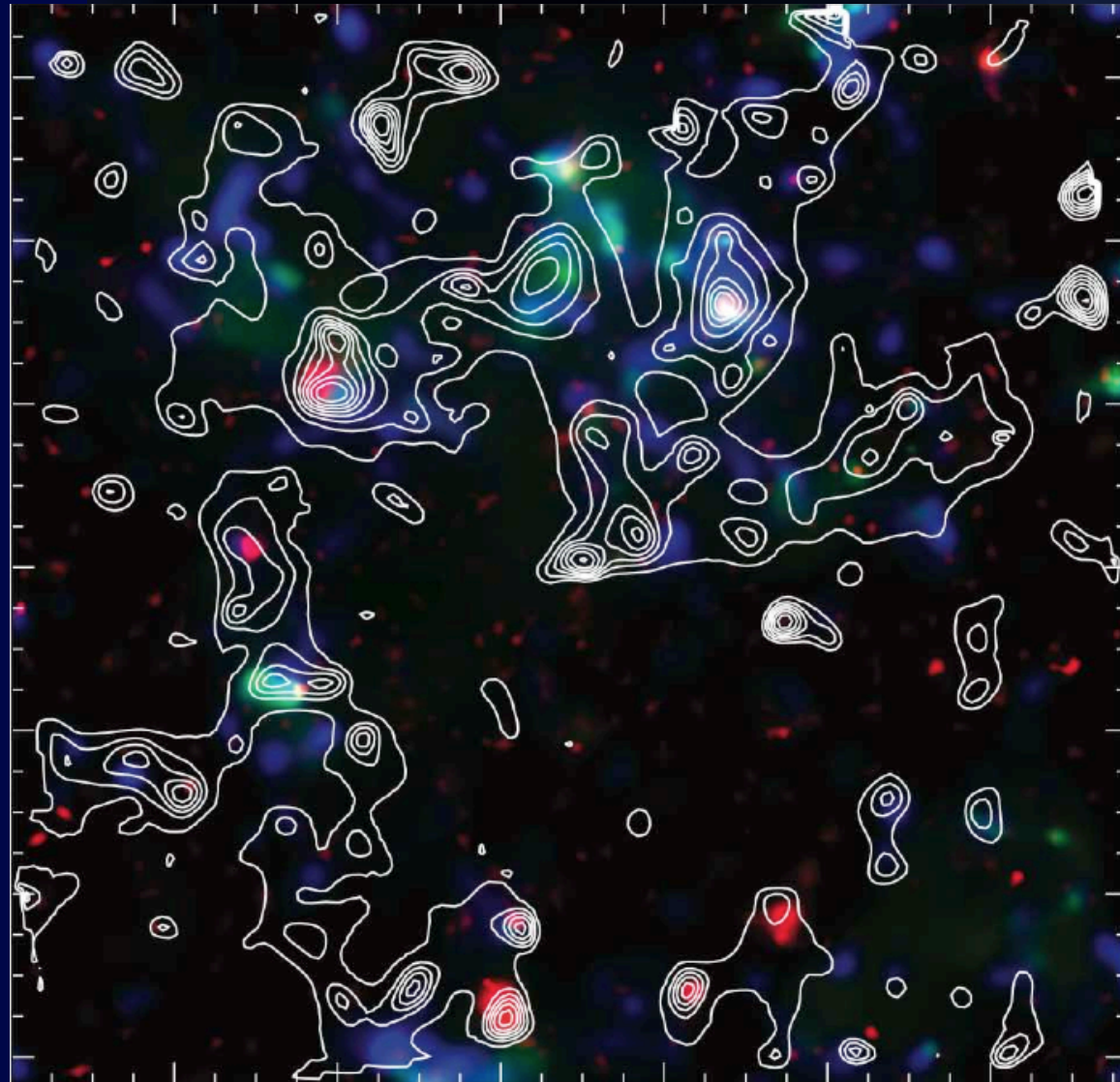
暗黒物質の分布



**Ellipticity の分布は
CDMの予言(Jing-Suto02)
と整合**

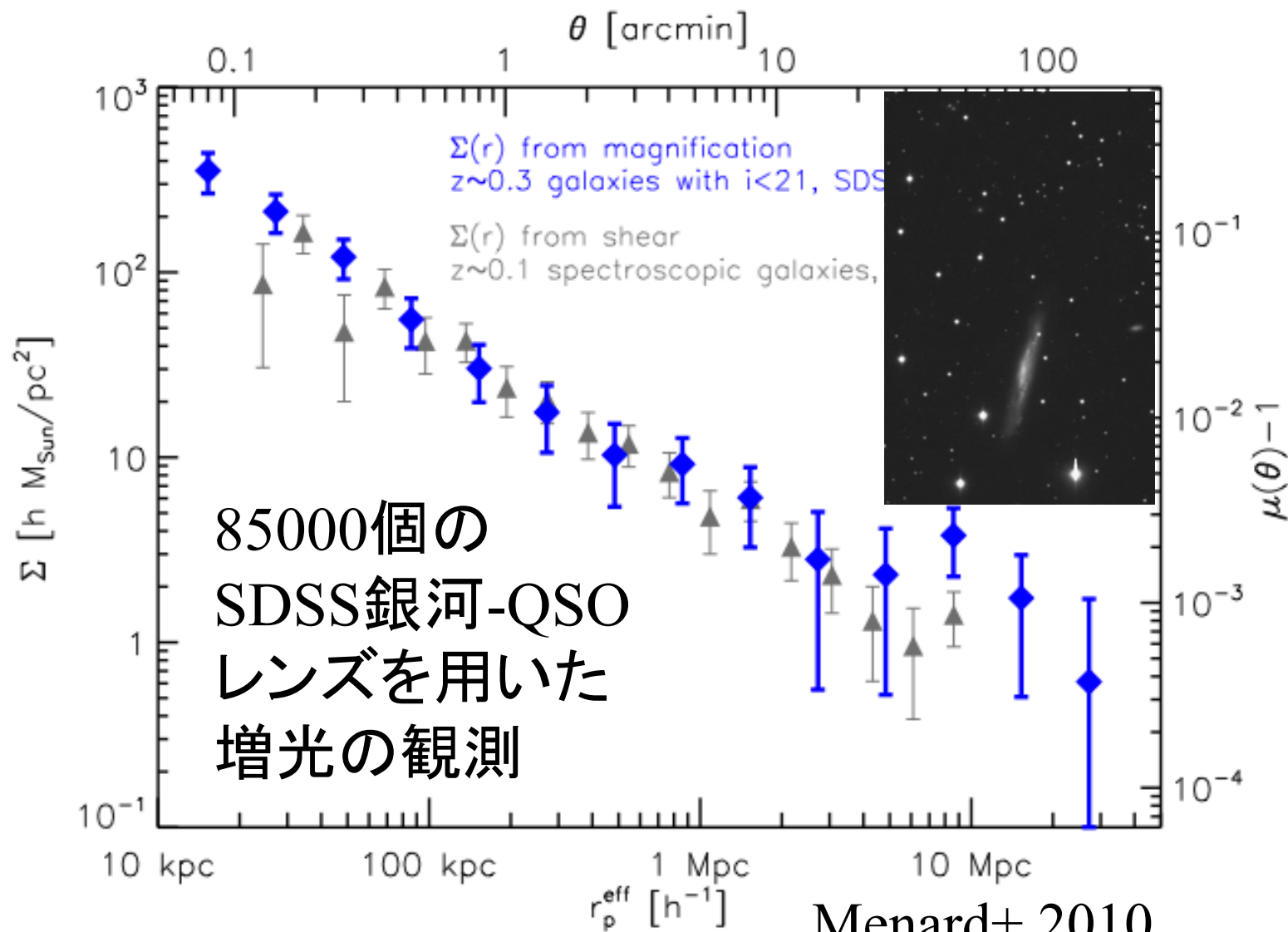
Oguri+10

ダークマターの3次元分布

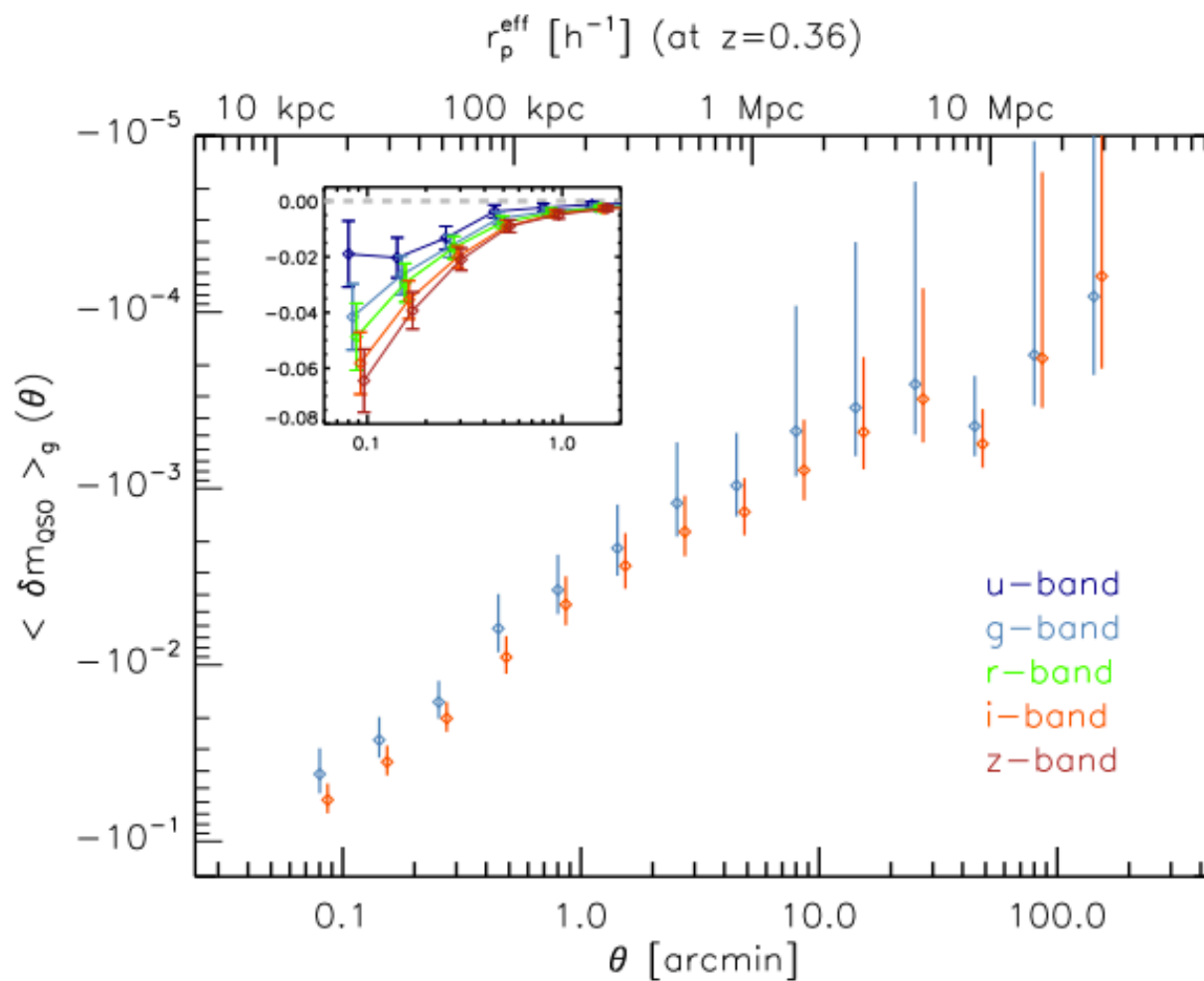


Masse+ 2007

銀河に付随するダークマター

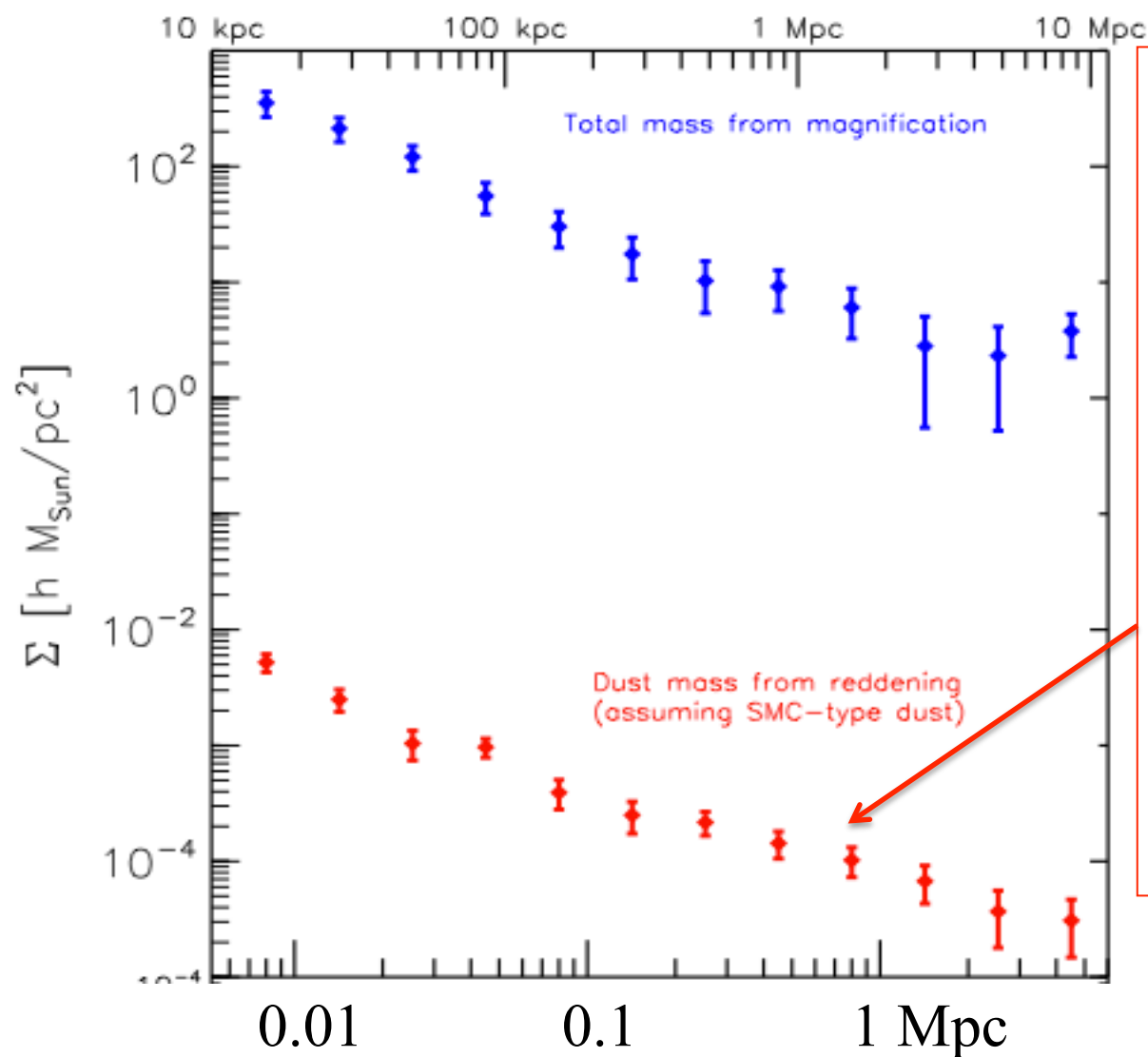


銀河に付随するダークマター



SDSSの
銀河-QSO
レンズを5バンド
で観測し
減光を推定

銀河に付随するダスト

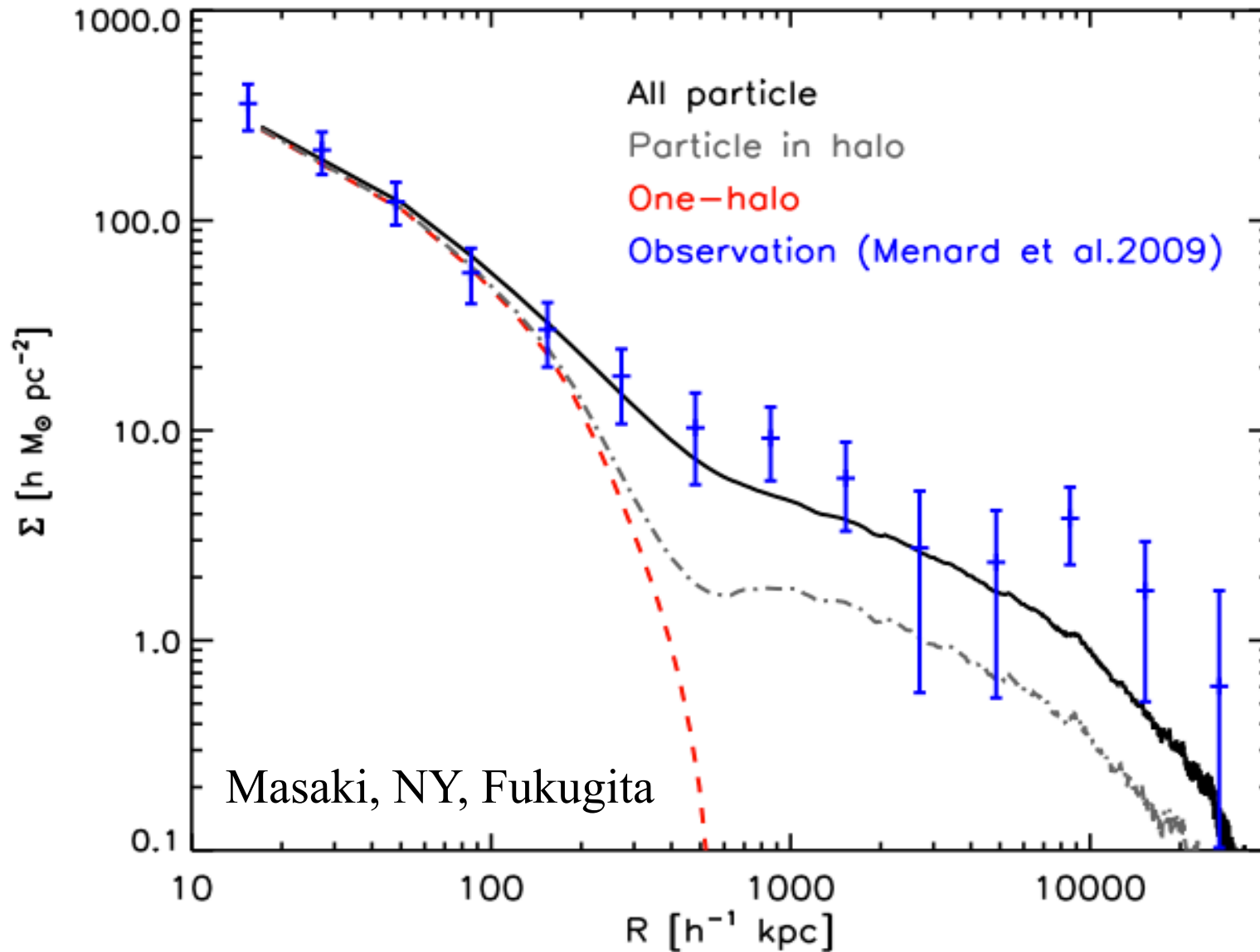


銀河中心から
1Mpc以上も離れた
ところにダストが存在
“ハローダスト”

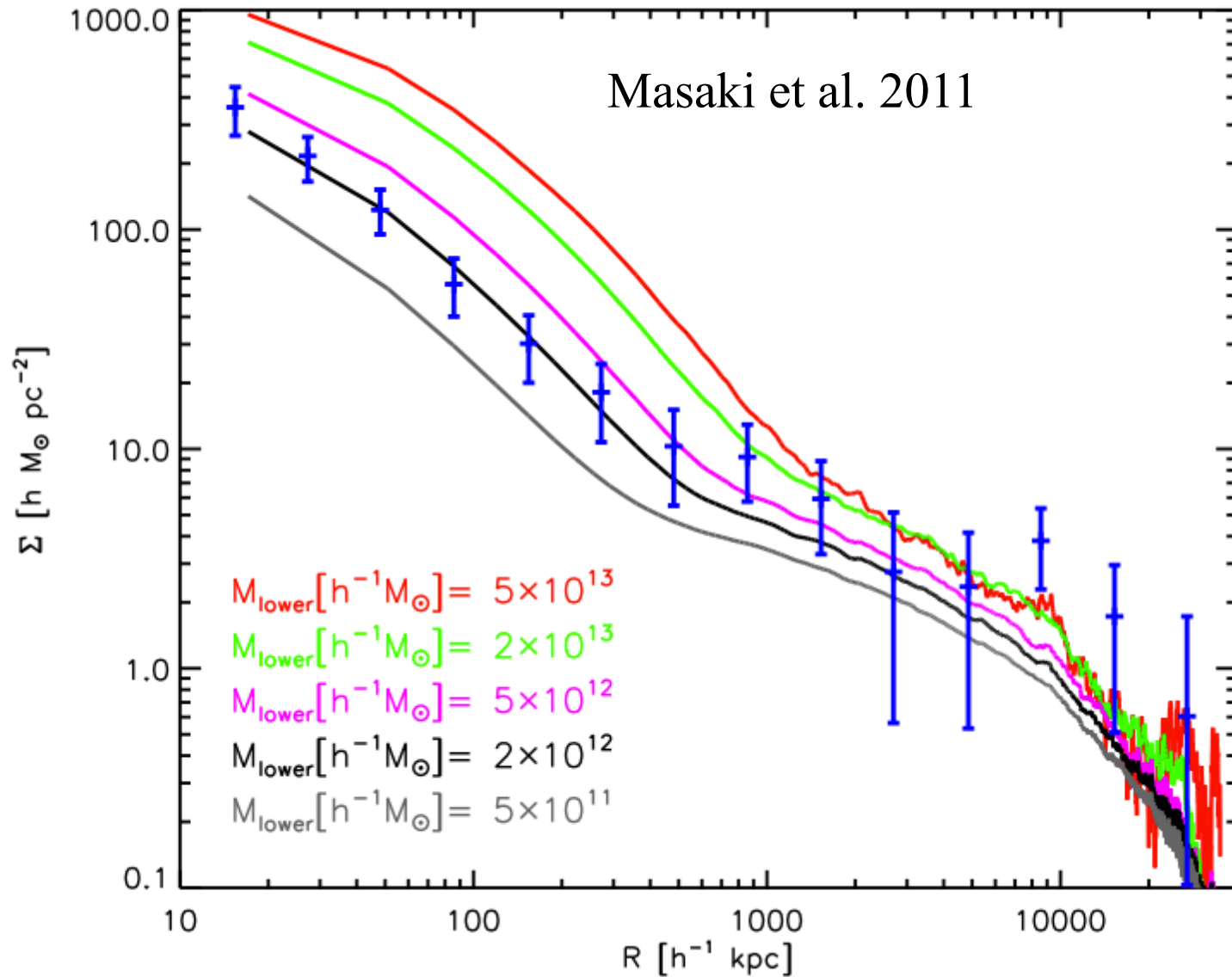
$\Omega_{\text{dust}} \sim 5 \times 10^{-6}$
の半分は
“ディスクダスト”、
半分は
“ハローダスト”

Menard+ 2010

銀河まわりのダークマター：モデル



レンズ銀河の典型的質量



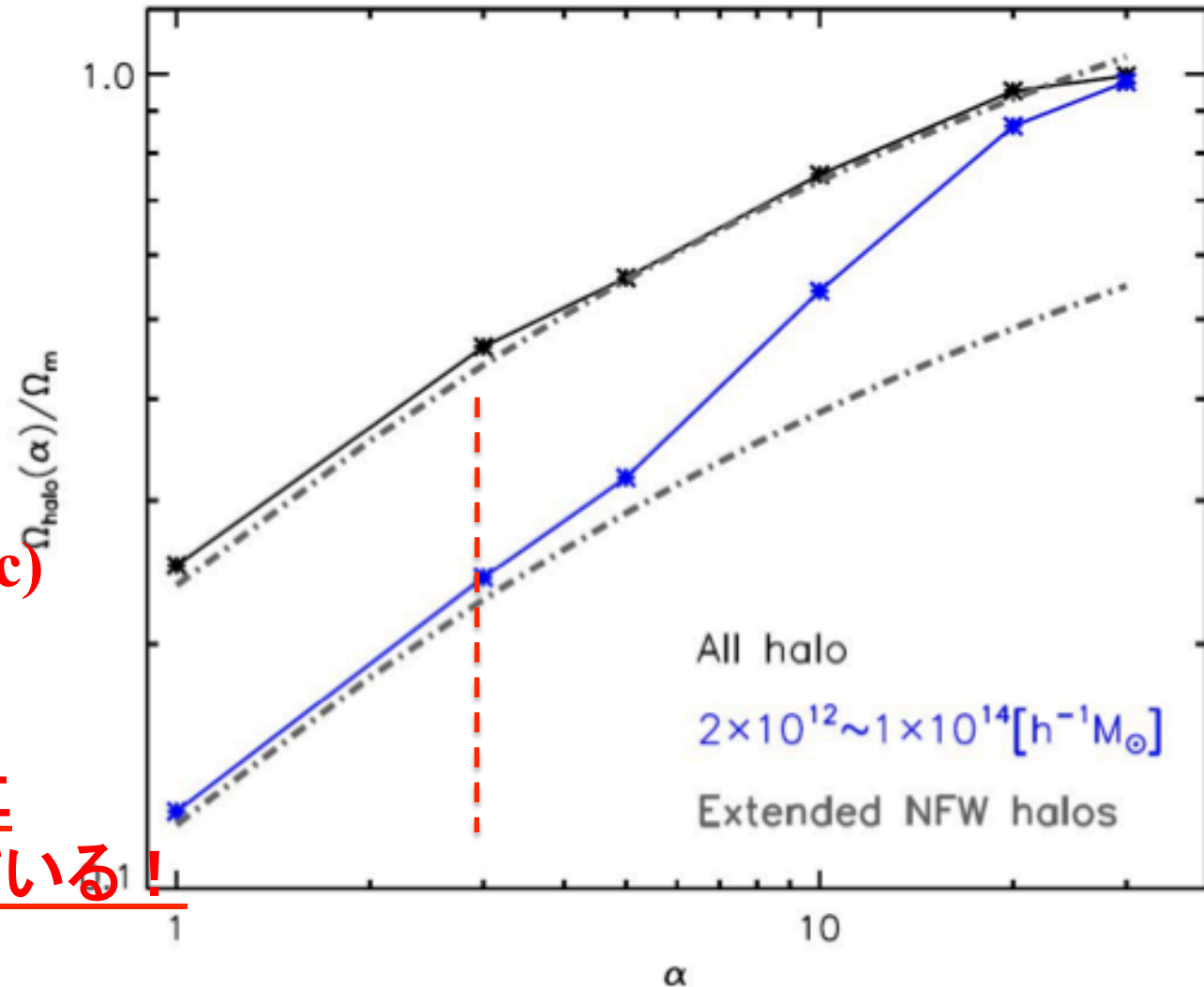
ハローに付随する暗黒質量

Bahcall らによる
M/L比に基づく
推定値

$$\Omega_{\text{halo}} (< 260\text{kpc}) \\ = 0.55\Omega_m$$

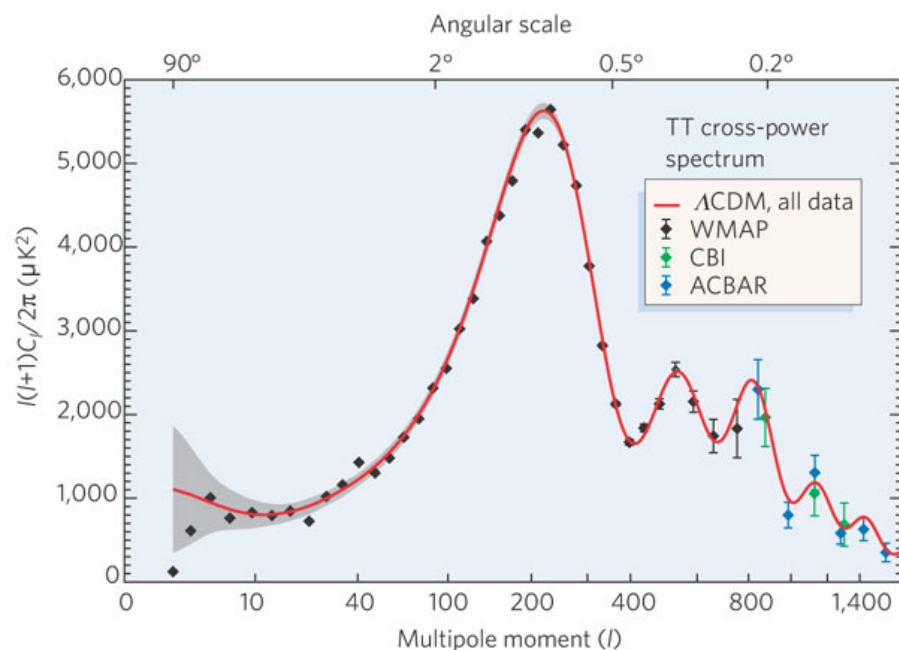
と一致

→ ハローはさらに
外側にひろがっている!



銀河は重力不安定性でできた

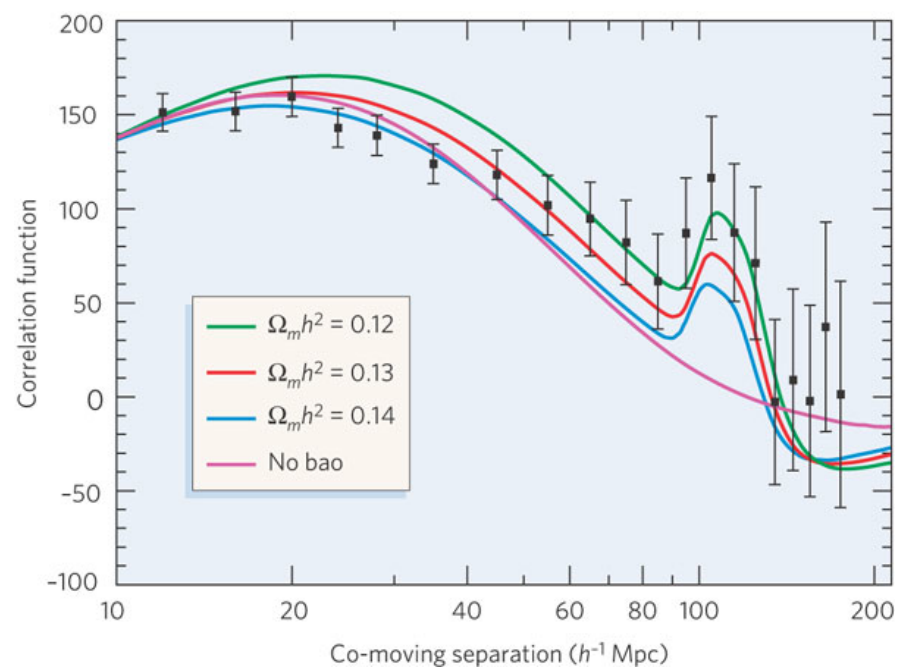
CMBの揺らぎ



137億年前

宇宙初期の揺らぎ

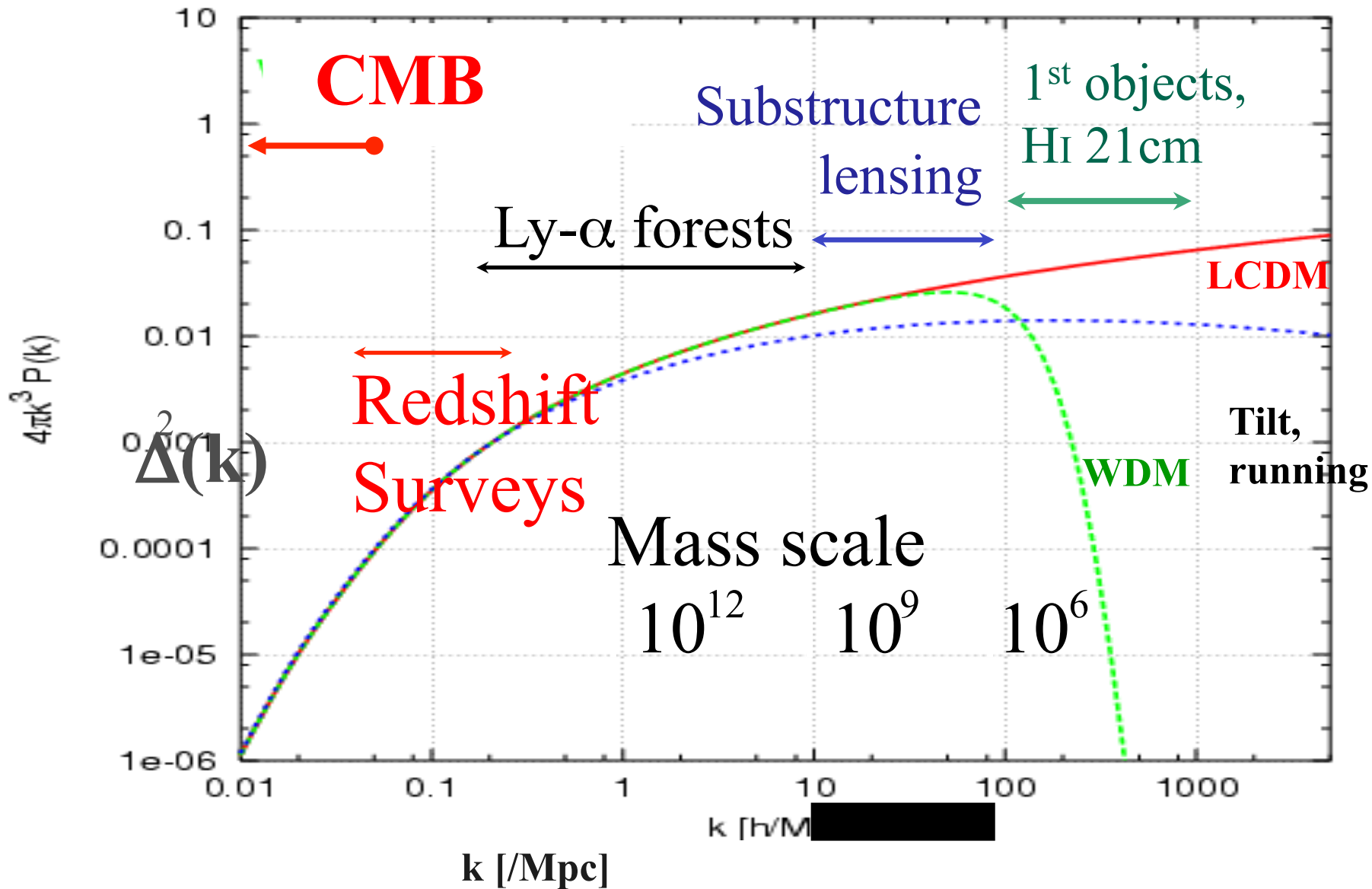
銀河の相関関数



現在

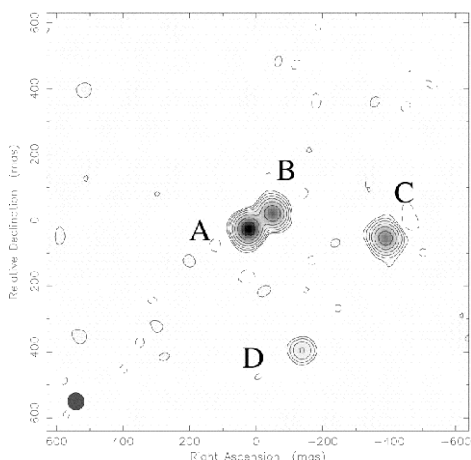
まとめ1

密度揺らぎはどこまで分かっているか



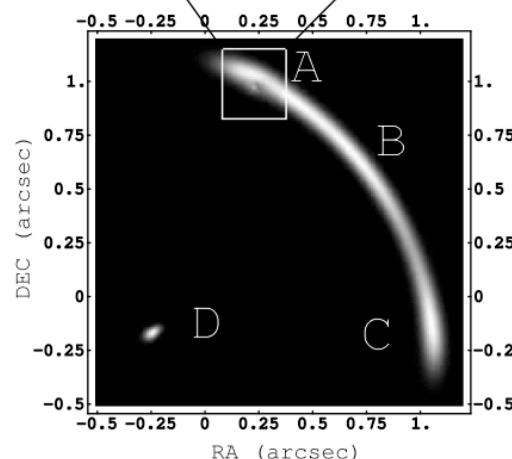
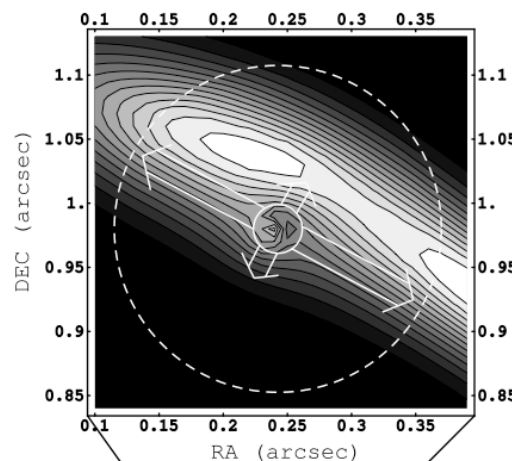
サブハローの検出

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

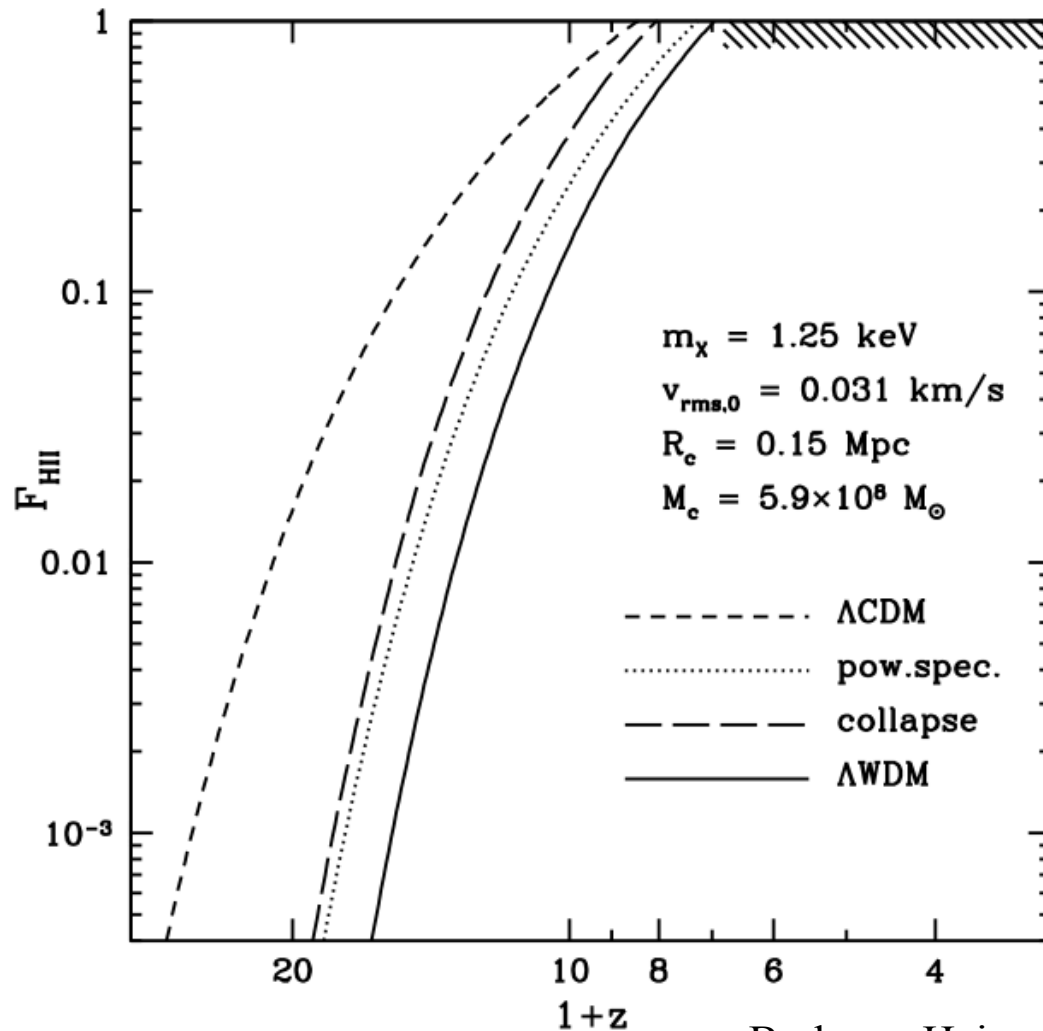


電波、
サブミリ観測

0.01秒角の
高分解能で
 $10^8 M_{\text{sun}}$ のハ
ロー検出可能

ALMAで数時
間！！

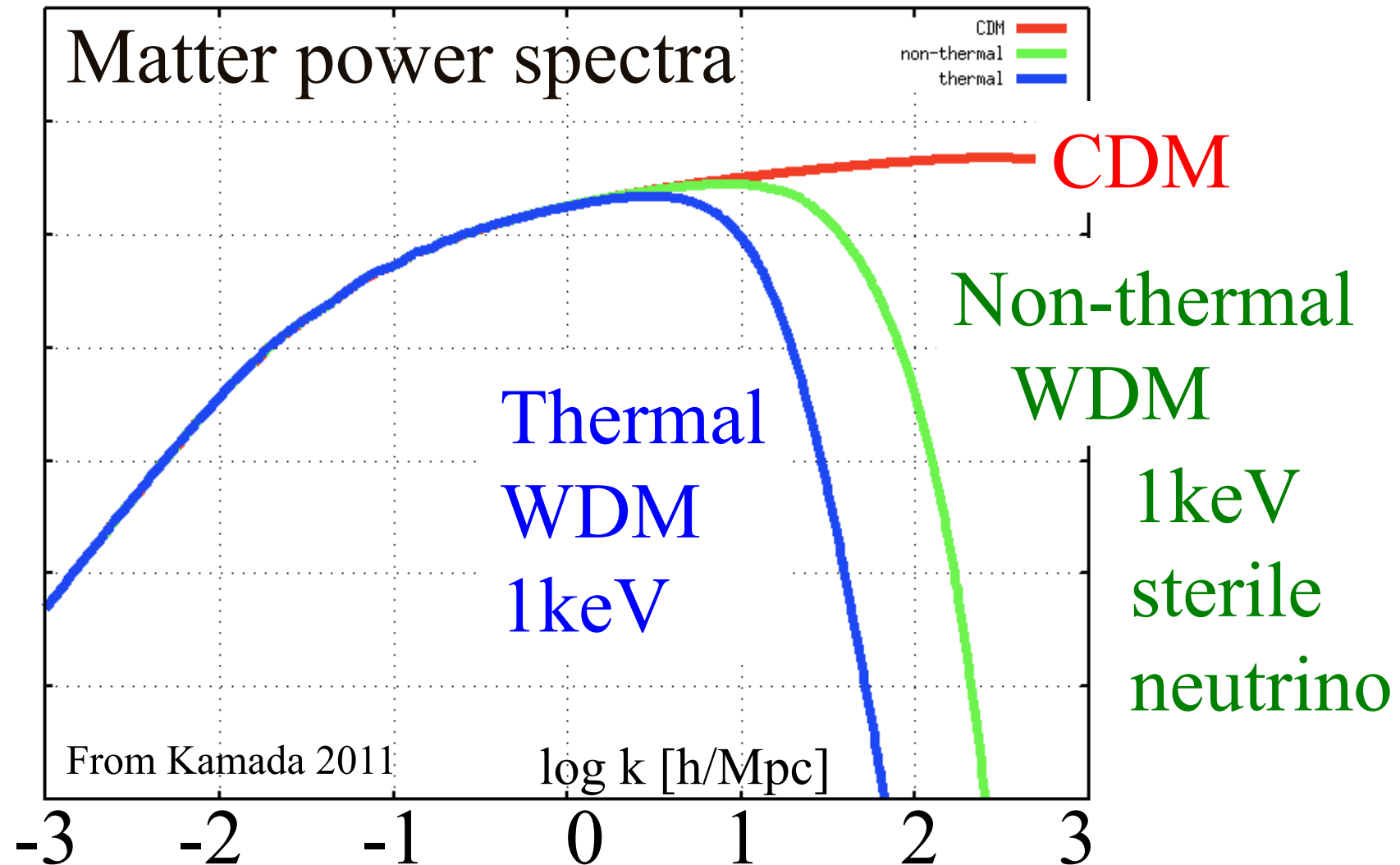
Warm dark matter への制限



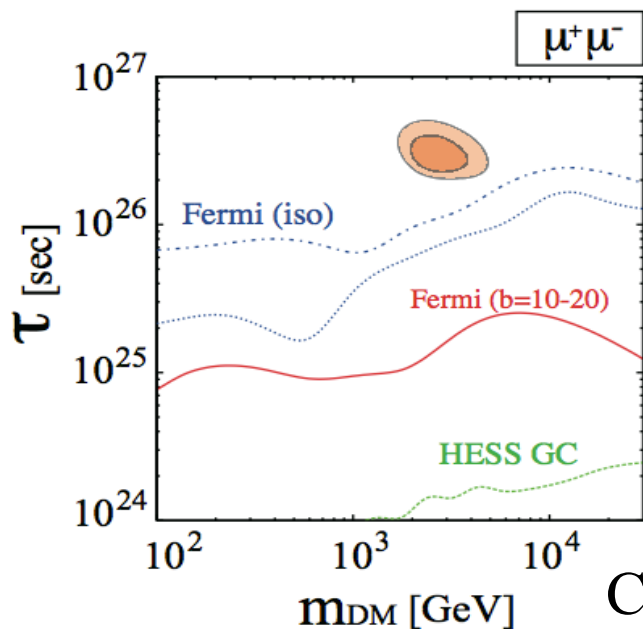
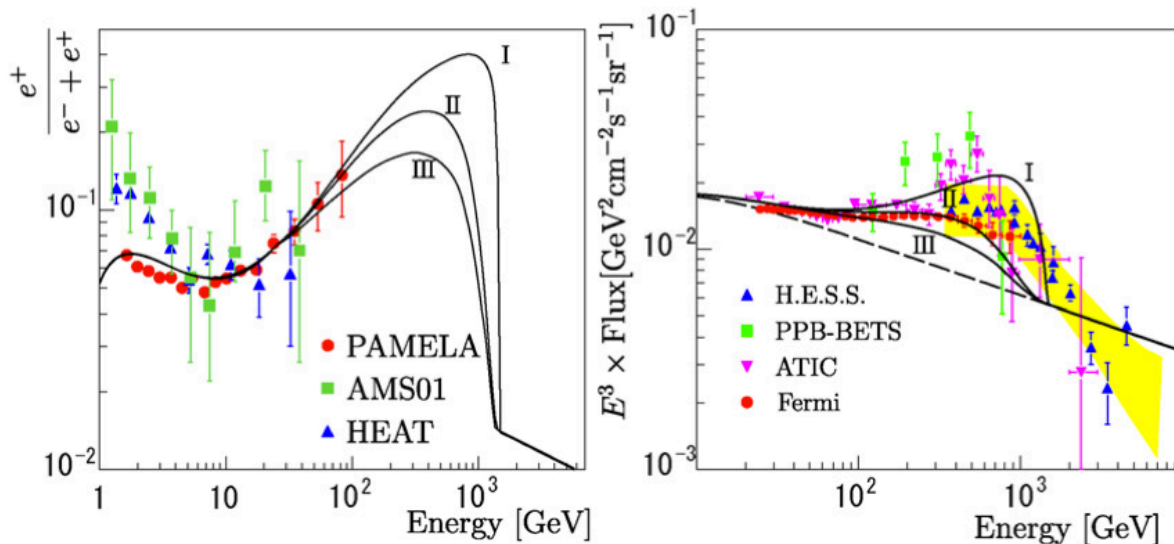
再電離が $z \sim 6$
に完了するには
そもそもなんらかの
"天体"が必要。
あまり軽いWDM
ではこれは難しい。

$m > 1 \text{ keV}$
Ly-a雲の分布の解析
からも同様の制限

Warm Dark Matter Revisited: Petraki-Kusenko-Boyanovski model



崩壊するDMモデル

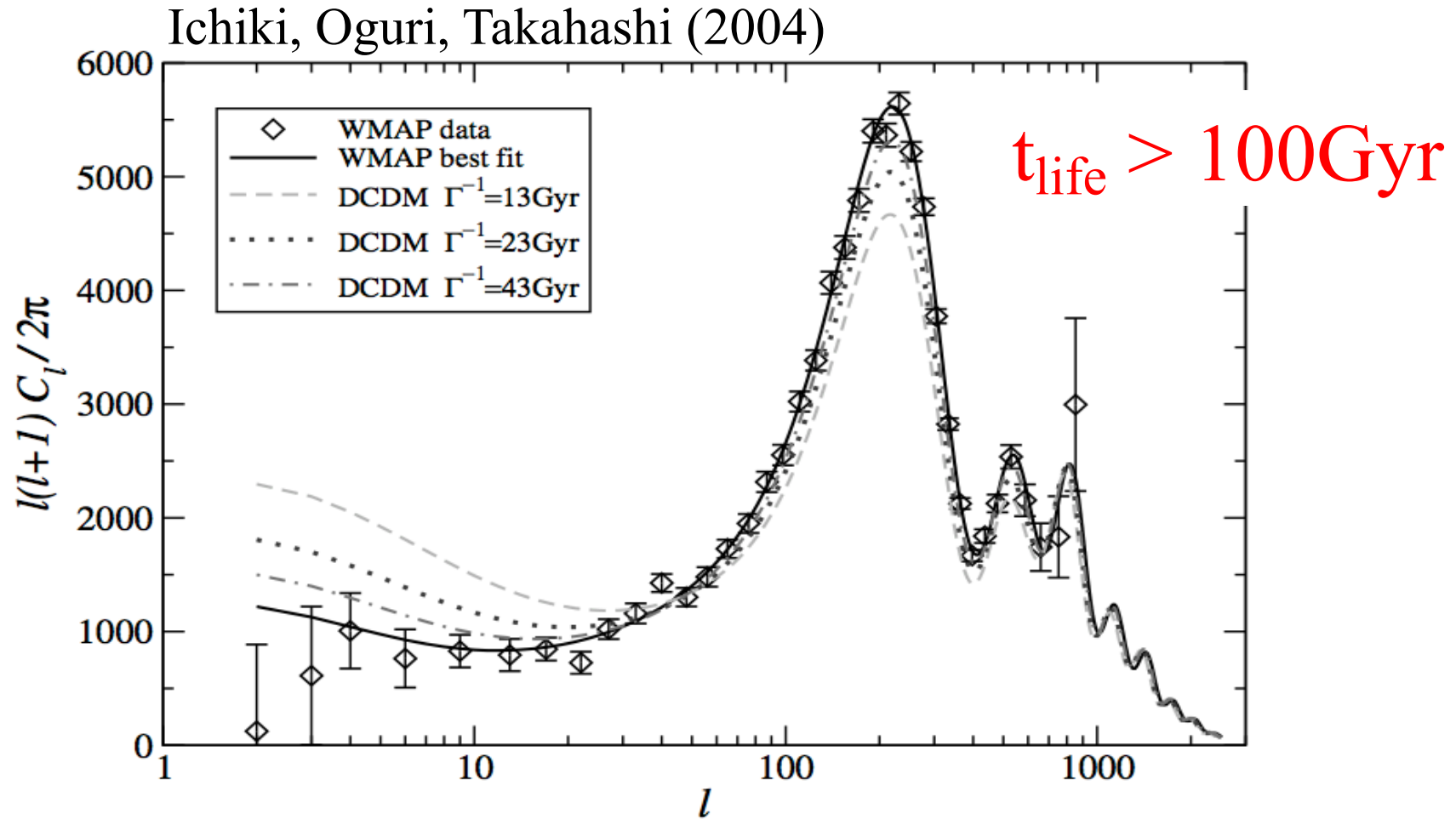


PAMLA & Fermi

$t_{\text{life}} \sim 10^{26}$
で説明がつく

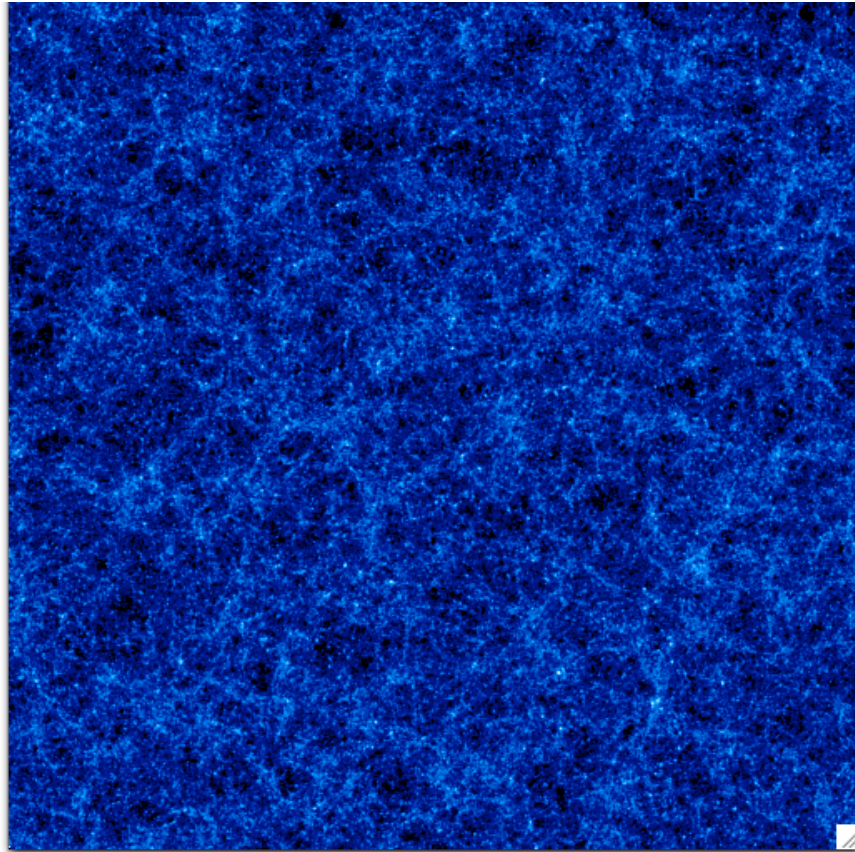
Chen, Takahashi, Yanagida (2010)

DMはそもそもどれくらい長生きか



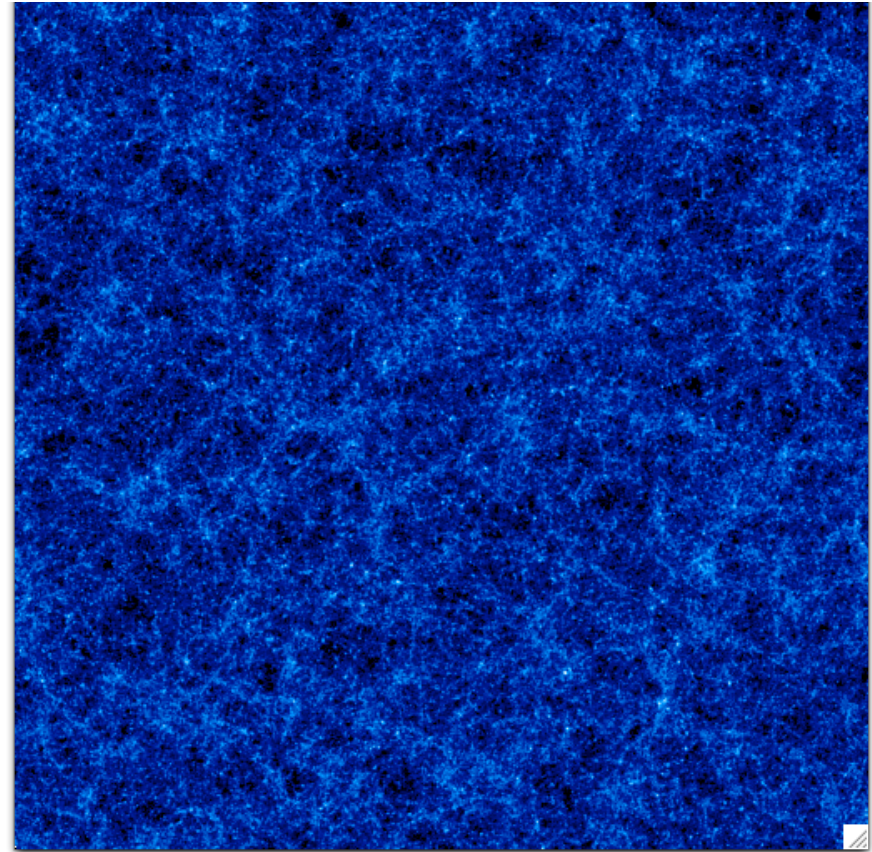
Structure formation in DDM models

CDM



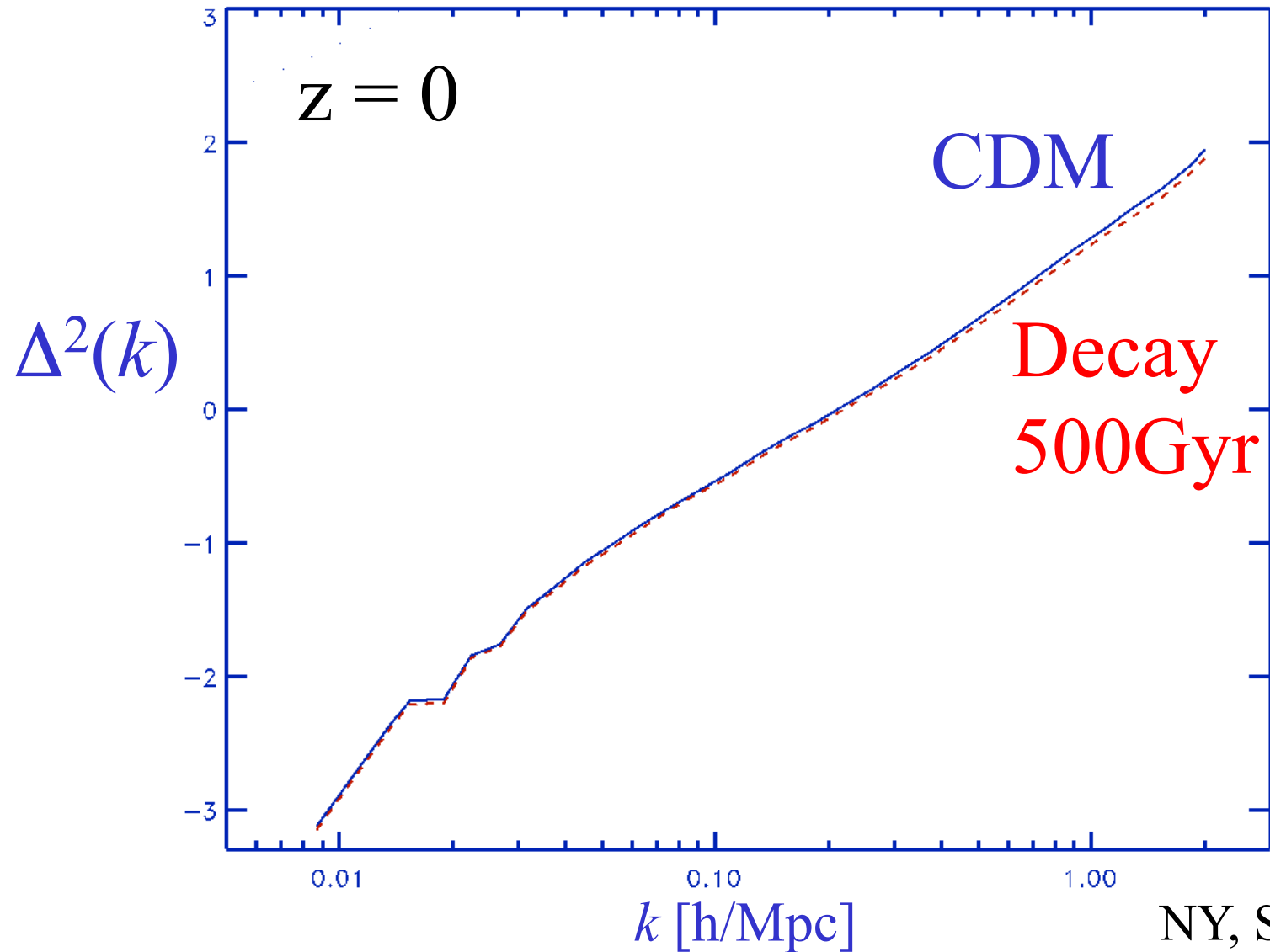
1 Giga parsecs

Decay 500Gyr



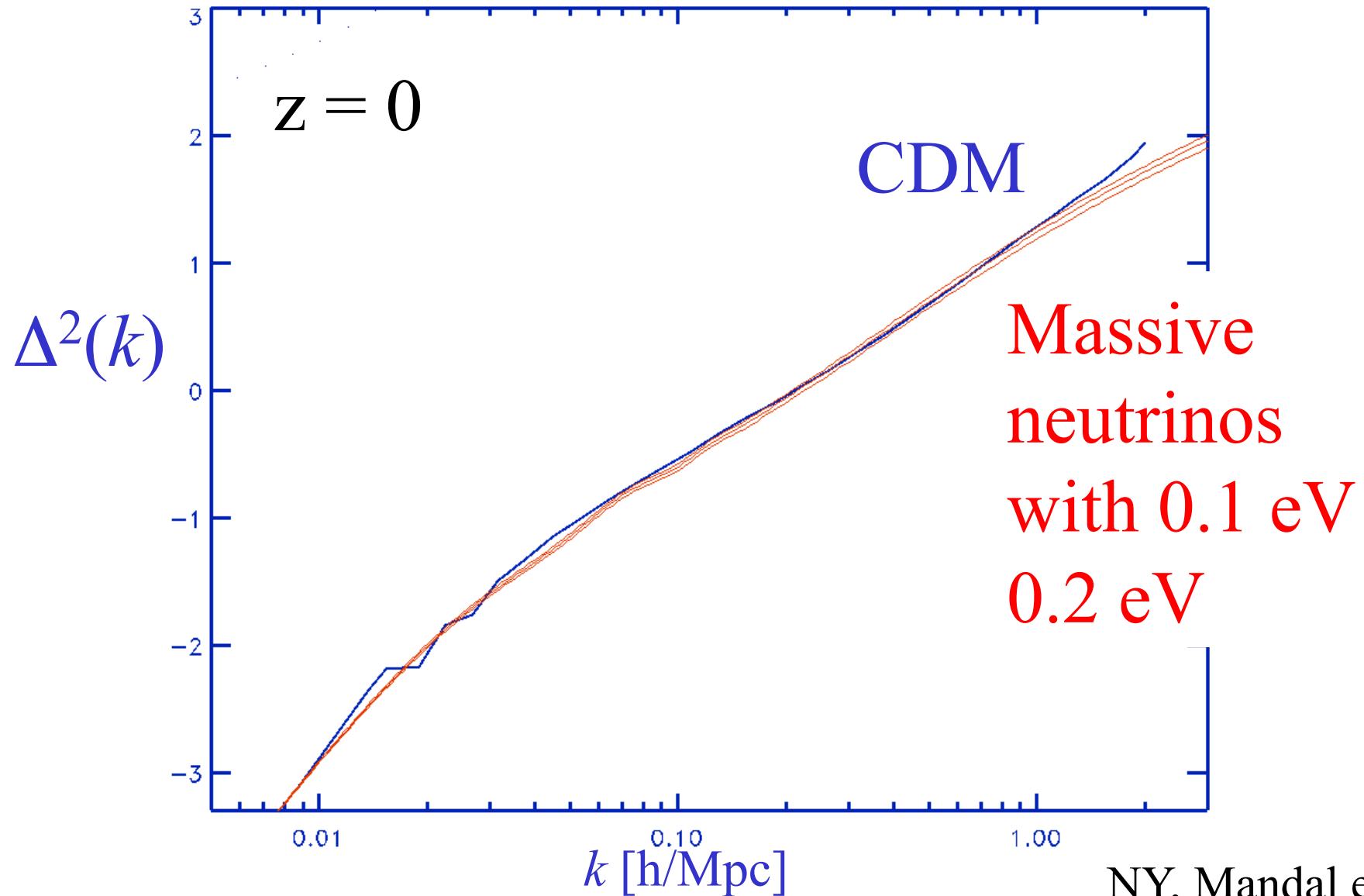
NY, Mandal et al.

The DDM power spectrum



NY, S. Mandal et al.

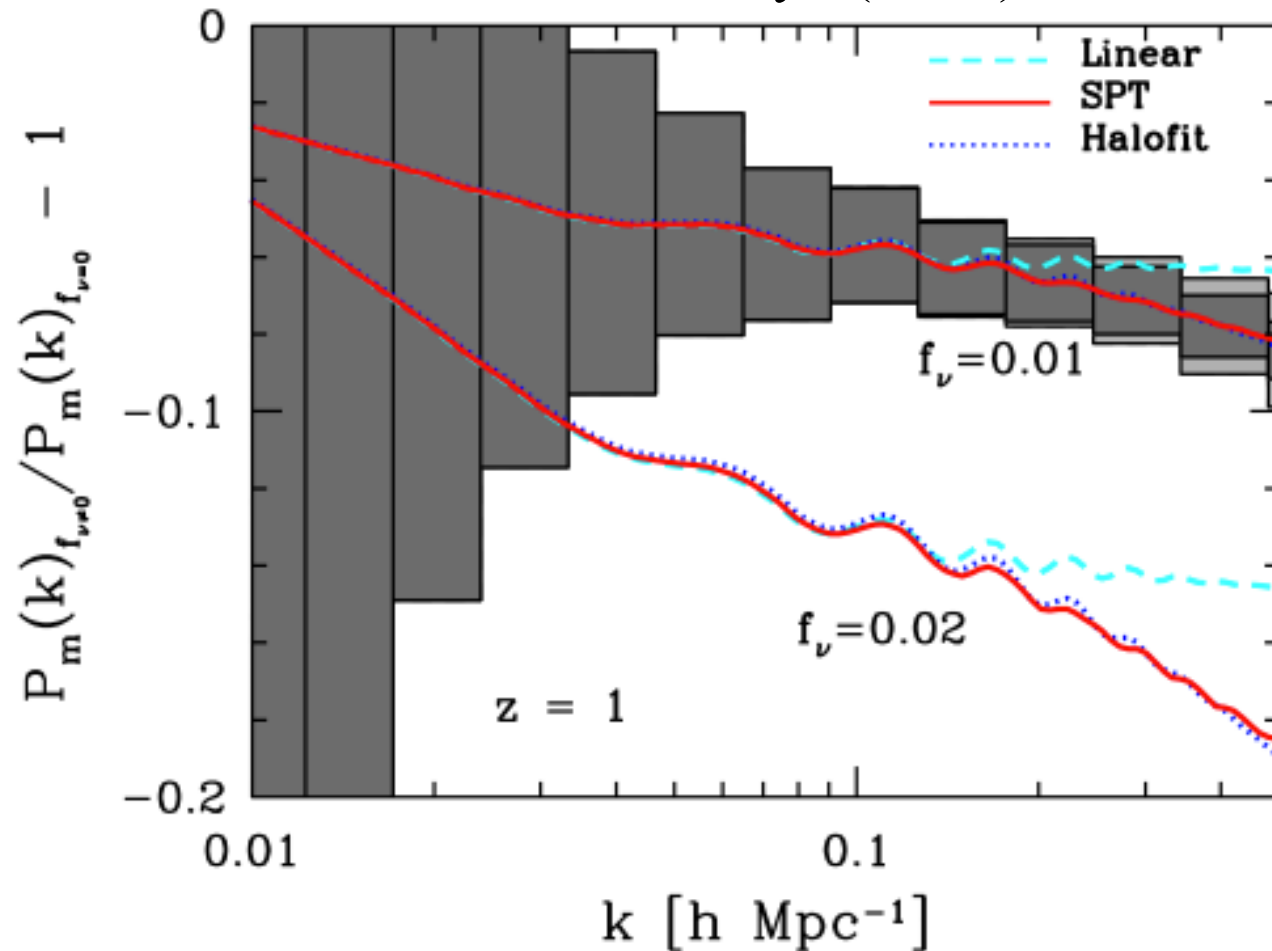
The effect of massive neutrinos



NY, Mandal et al.

Matter $P(k)$ and neutrino mass

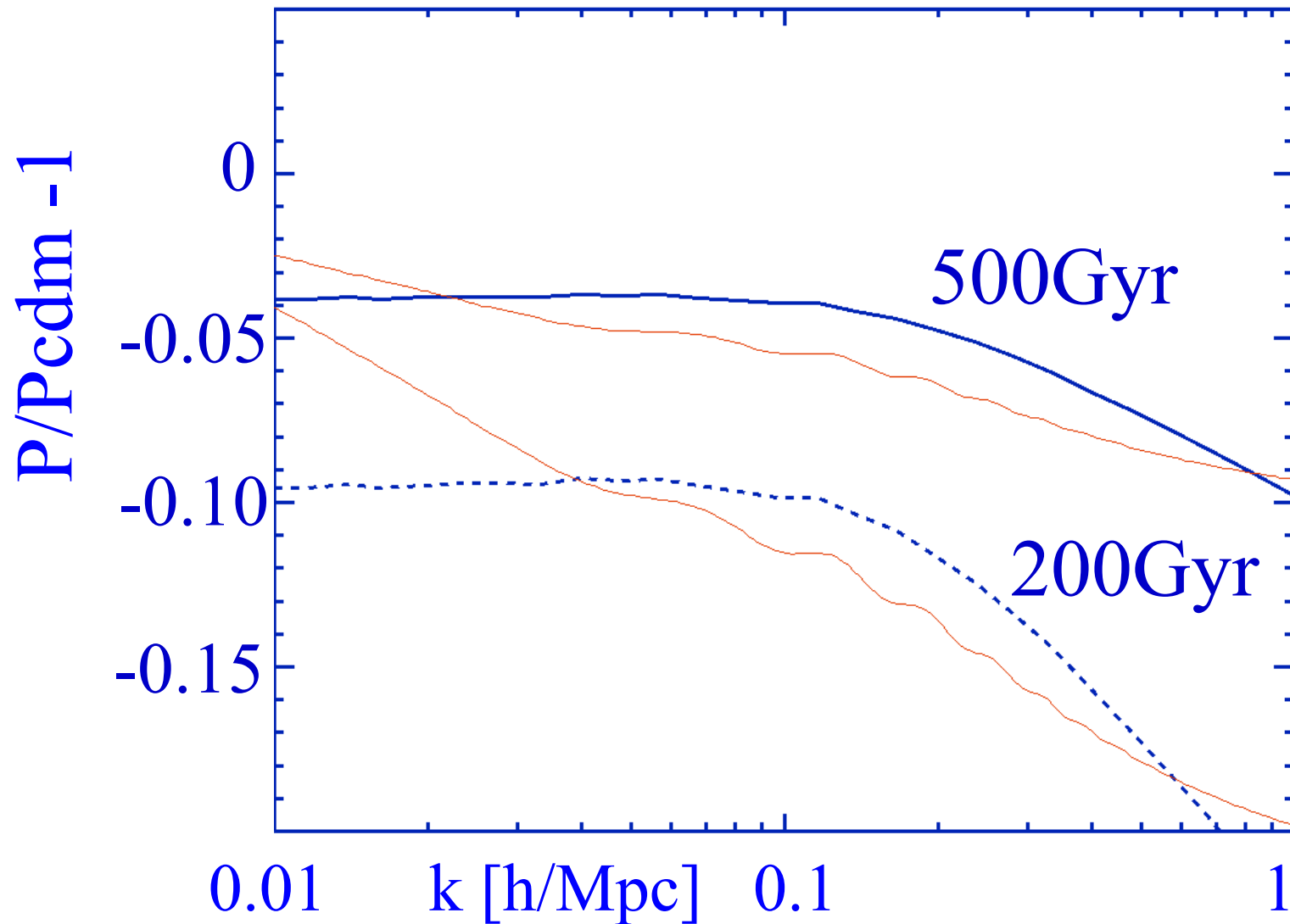
Saito, Takada, Taruya (2009)



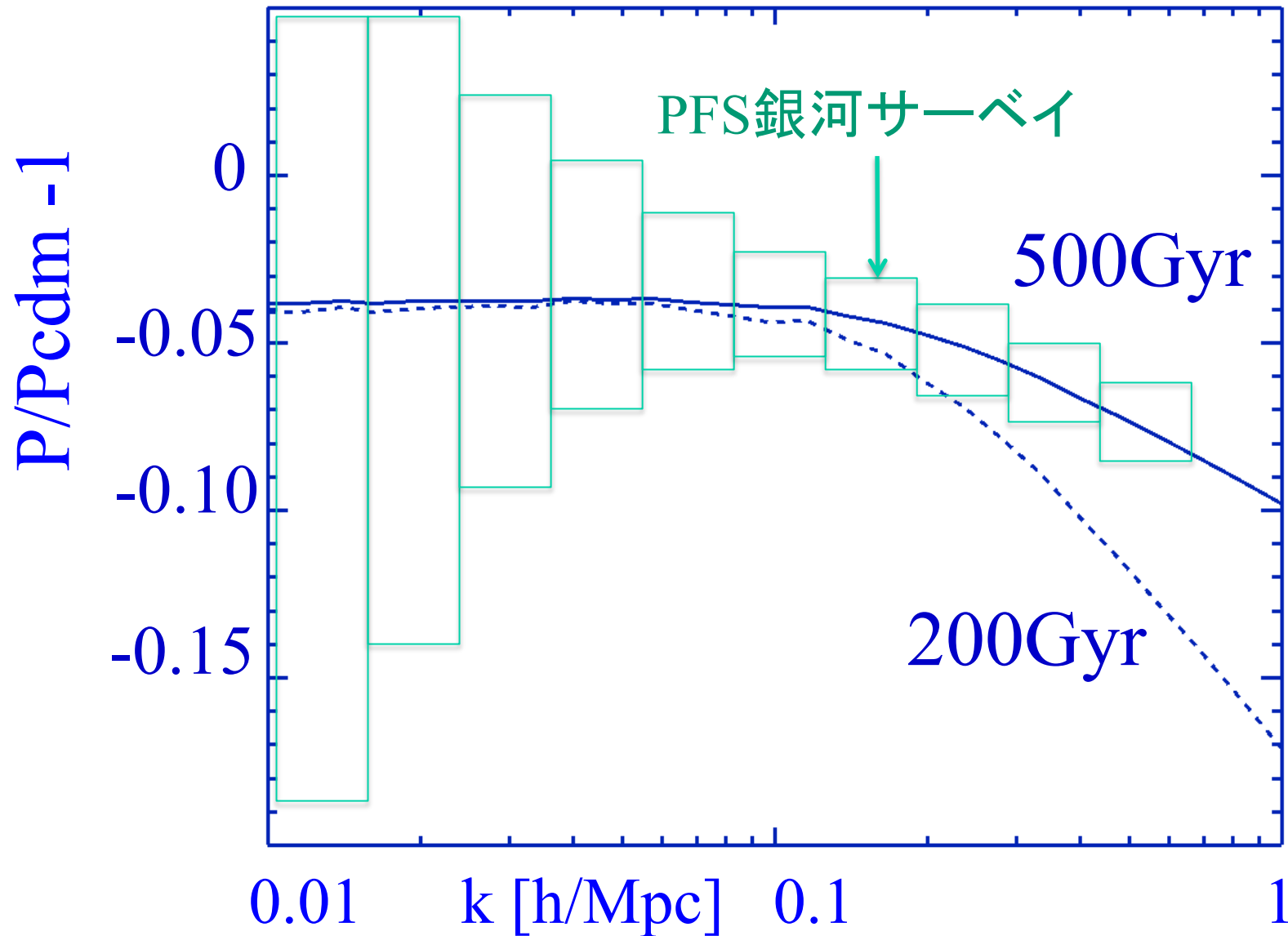
Future surveys
of galaxies and
IGM can *measure*
the neutrino mass

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

Lifetime and matter $P(k)$



Lifetime and matter $P(k)$



CDMハローの構造

(ここから先はダークマターは
冷たく、安定であると仮定)

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

1996-97 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し、
中心に近くなるほど緩やかになる。

Einasto プロファイル

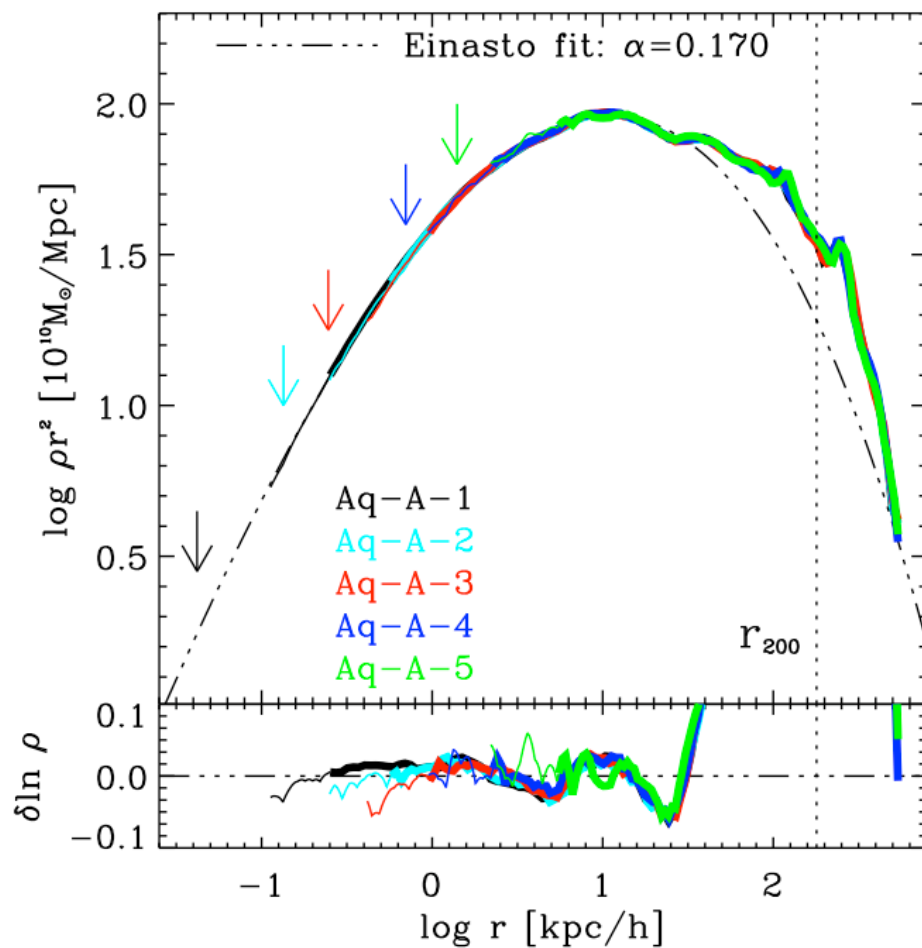
The Einasto profile

$$\rho(r) = \rho_s e^{-\frac{2}{\alpha} [(r/r_s)^\alpha - 1]},$$

α は新たなパラメータ

α

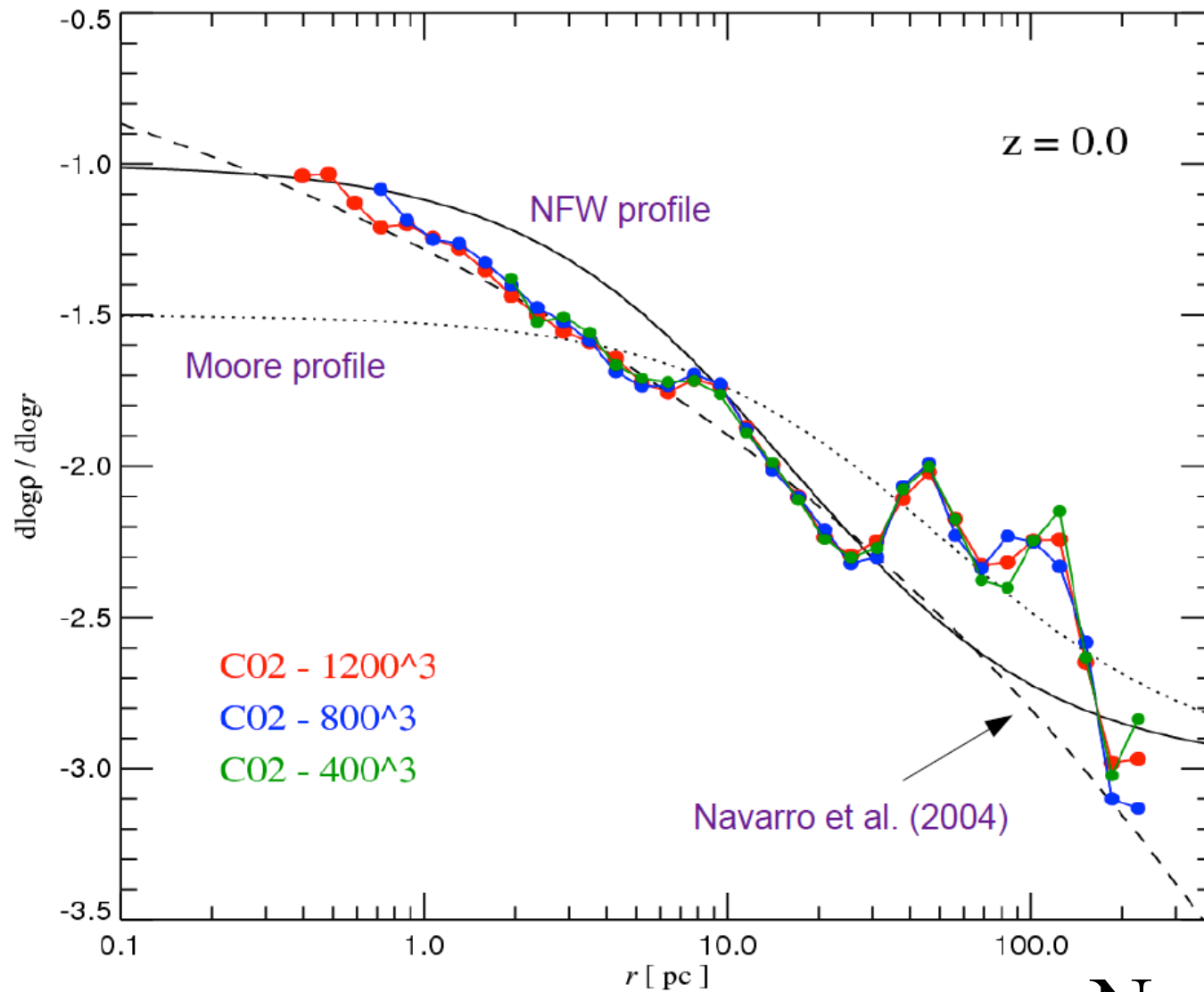
Einasto プロファイルフィット



$$\rho(r) = \rho_s e^{-\frac{2}{\alpha} [(r/r_s)^{\alpha} - 1]},$$

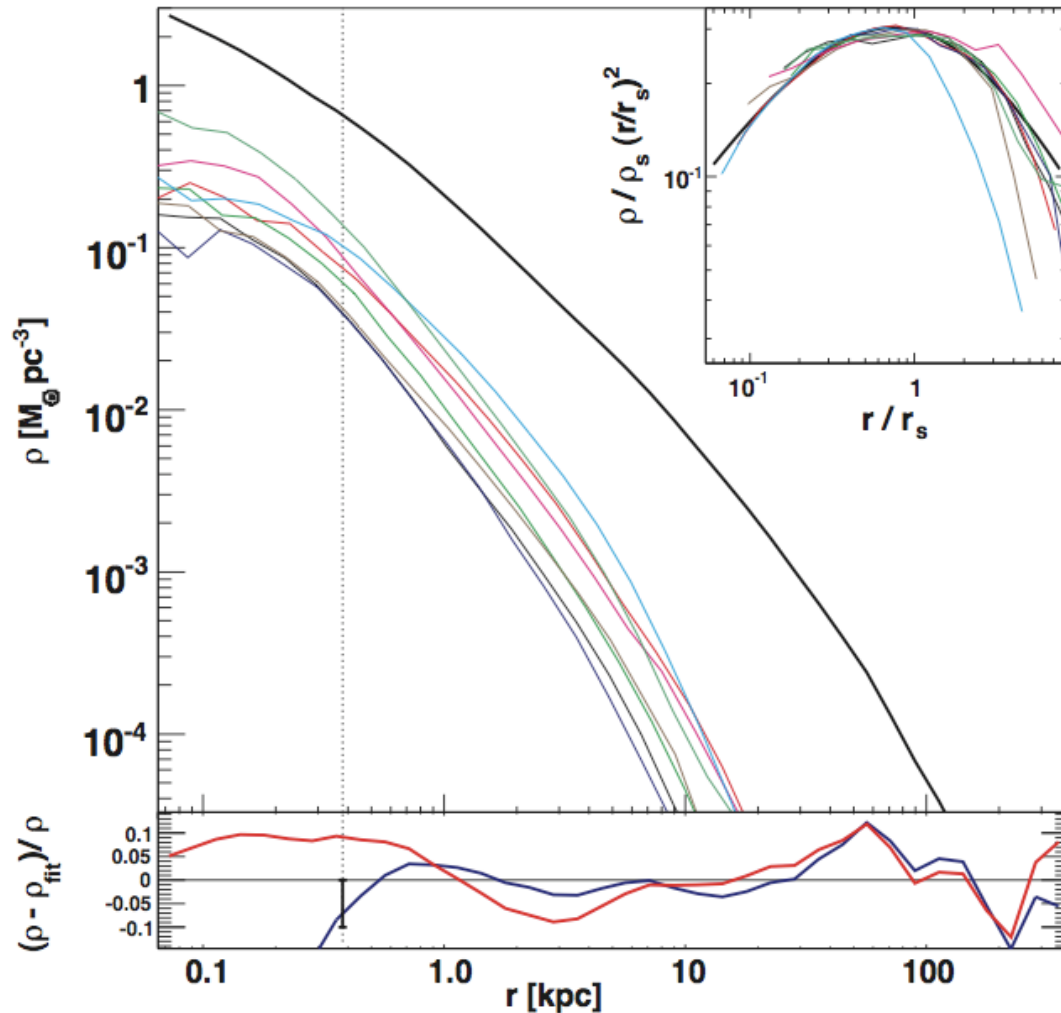
$$\alpha = 0.17$$

プロファイルのべき



もうみんな納得してるのかと
いえば...

ハローの密度プロファイル



Diemand & Moore 2009

1kpc 以内では Einasto
Profileよりも傾きがきつい

サブハローについても同様

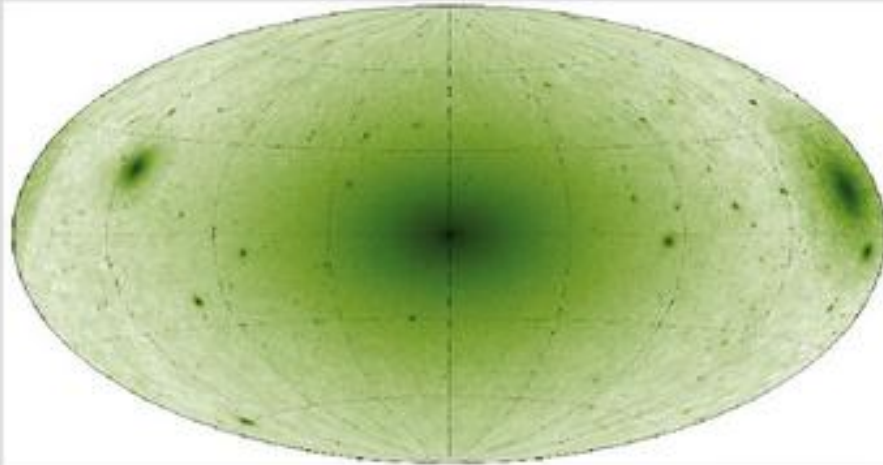
密度プロファイルとDM消滅率

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

- フラックスが中心で発散するのは $\rho \sim r^{-1.5}$
- 高密度領域からの寄与大
(銀河中心、衛星銀河の中心)

Substructure in the dark halo

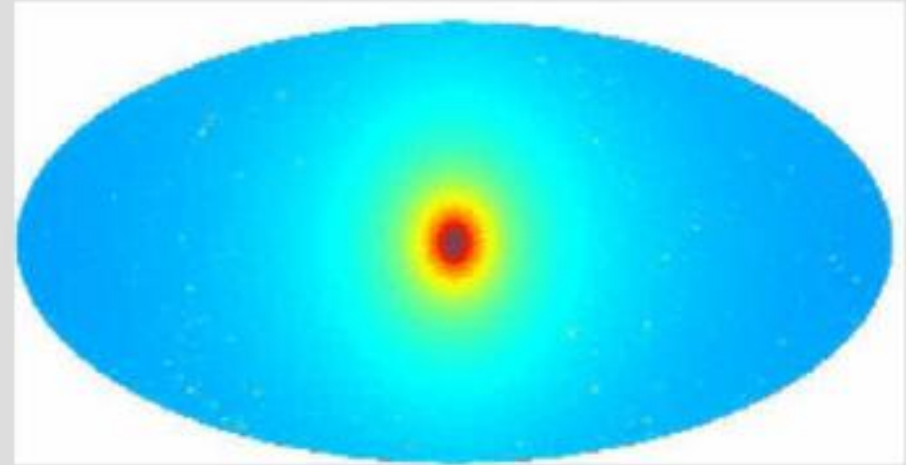
- annihilation radiation from WIMP dark matter may be observable by *GLAST/Fermi*



Kuhlen et al. (2008)

Kuhlen

- strongest signal from the sub-halos
- detectable sub-halos resolved by Fermi
- most prominent sub-halo typically has $d \sim 20\text{-}40$ kpc and $M \sim 10^7\text{-}10^9 M_{\odot}$



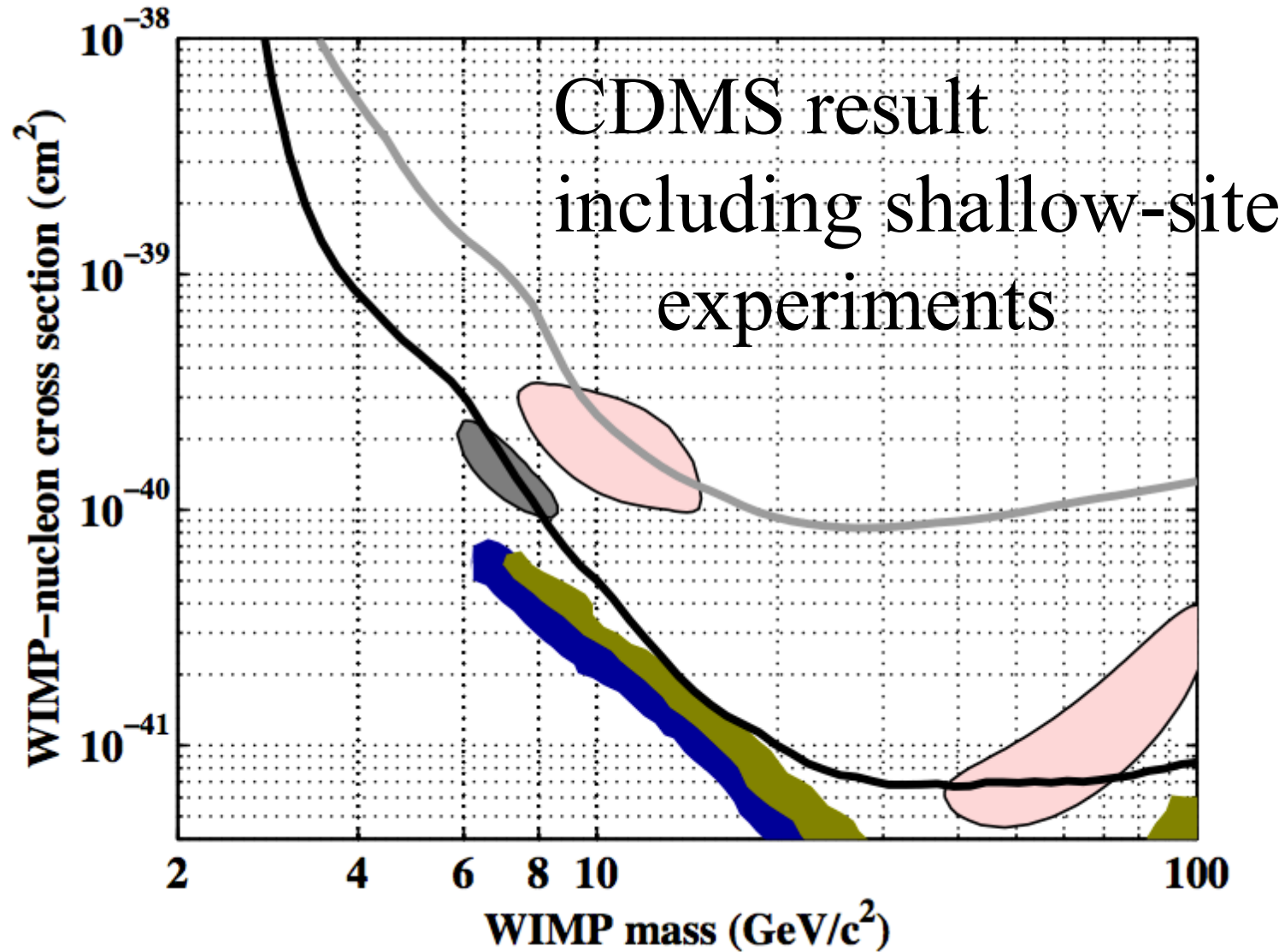
Springel et al. (2008)

Frenk

- strongest signal from the smooth main halo
- detectable sub-halos unresolved by Fermi
- most prominent sub-halo typically has $d \sim 3\text{-}30$ kpc and $M \sim 10^6\text{-}10^7 M_{\odot}$

M. Kuhlen のスライドより

直接検出実験の現況



XMASS@神岡

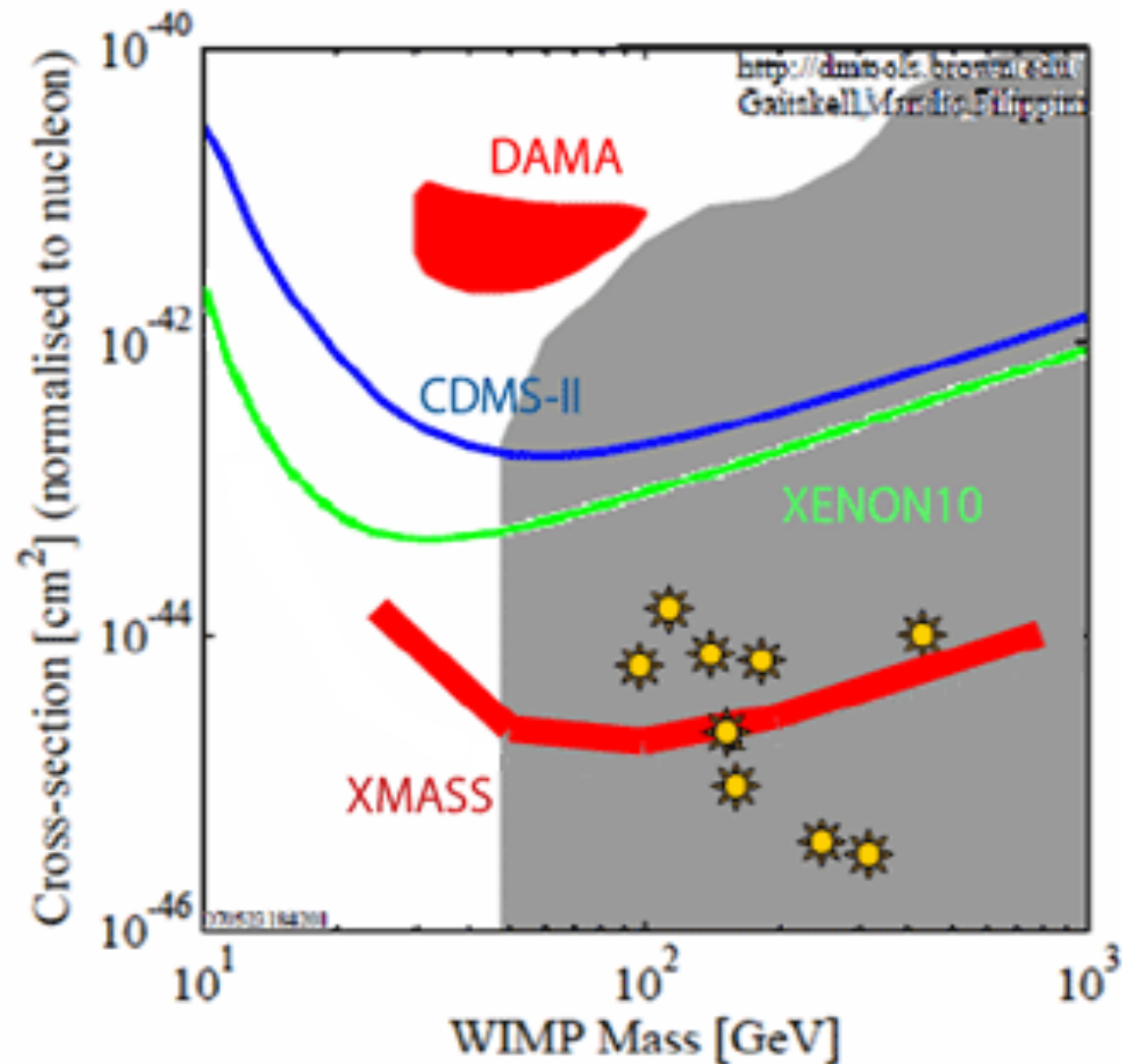
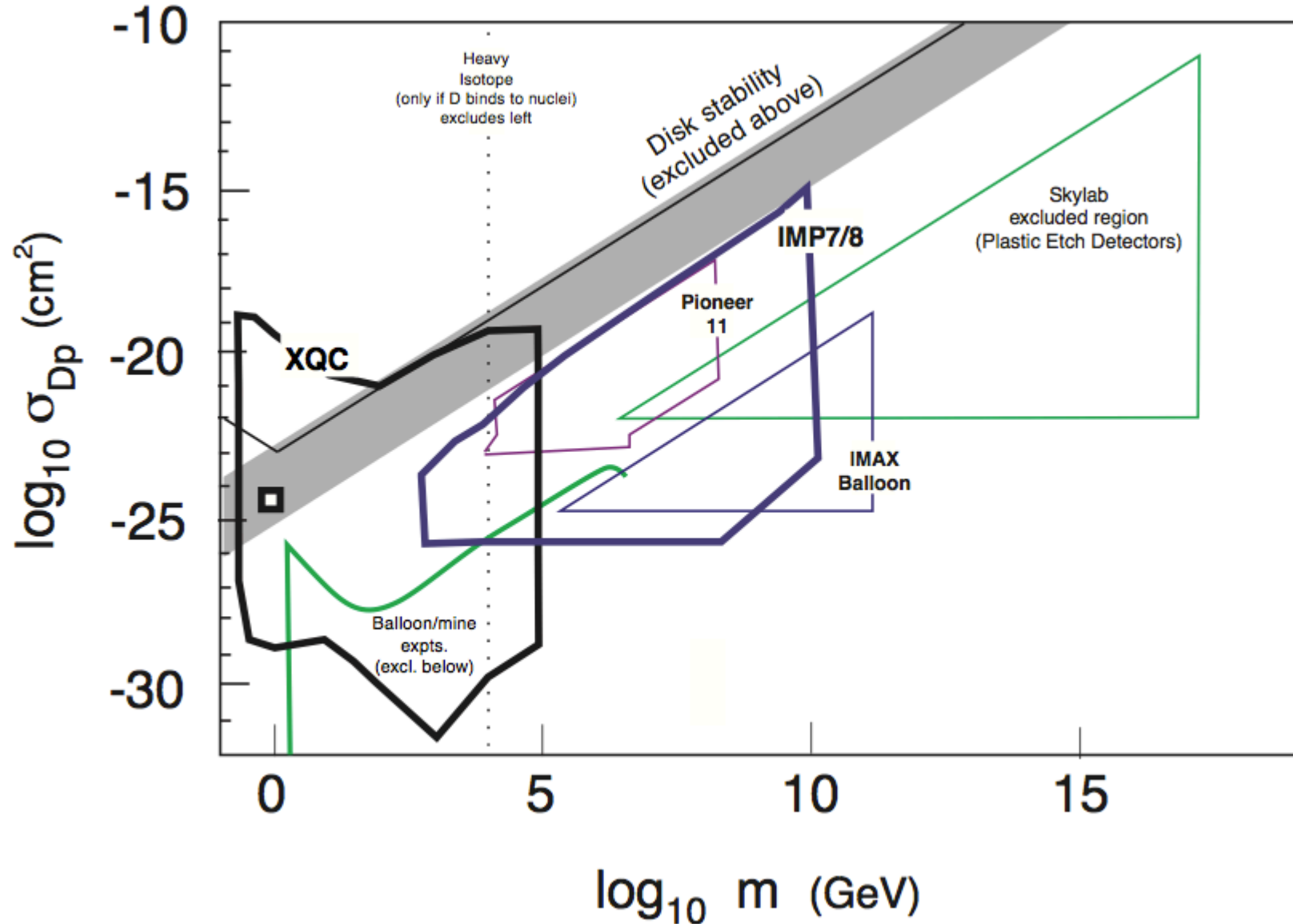


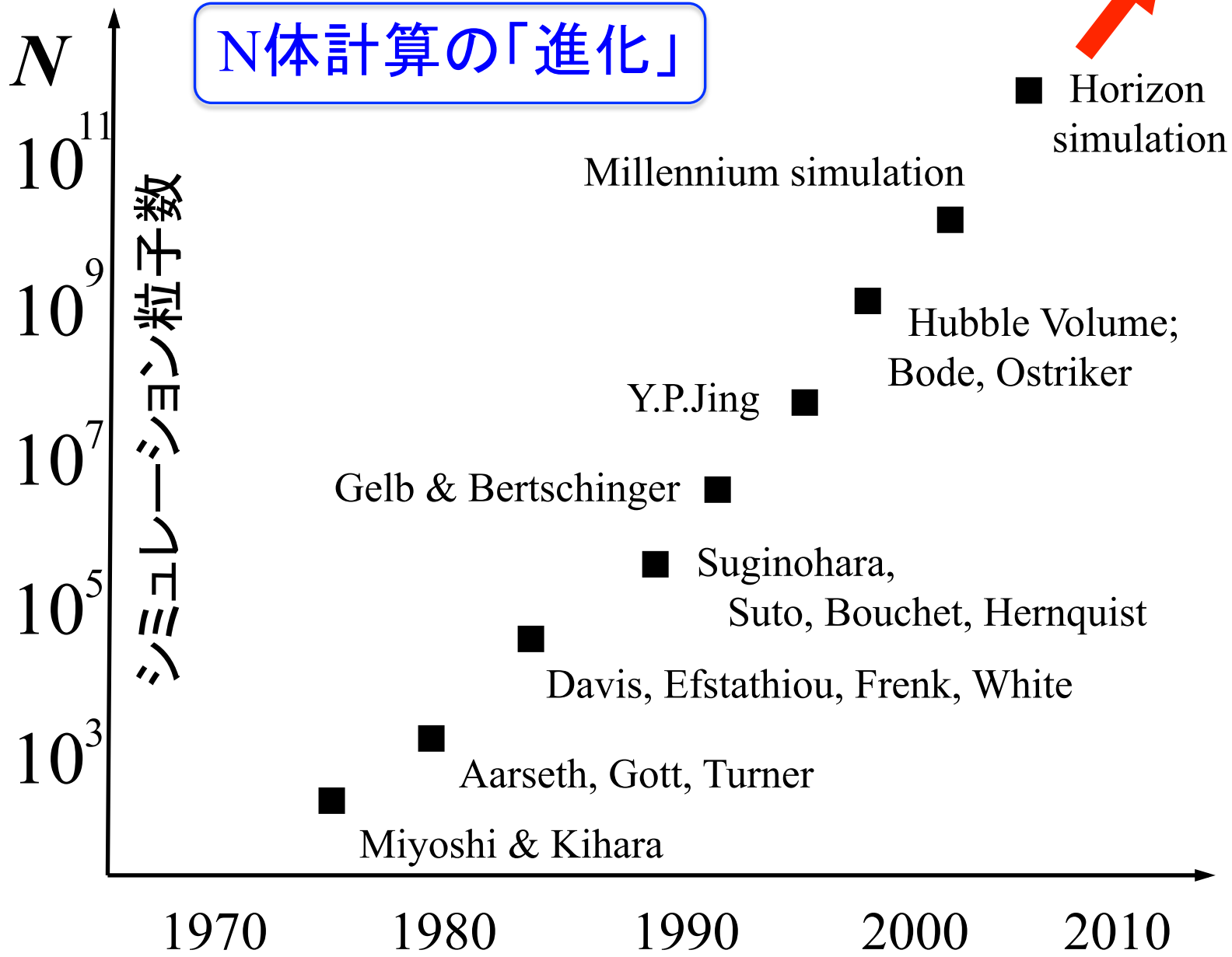
図6: ダークマター探索実験の検出感度

DM-バリオンの散乱断面積



構造形成シミュレーション

N体計算の「進化」



このままいくと...

2013年には $N=1$ 兆個

2020年までに $N=10$ 兆個

...

2053年にはアボガドロ数！

観測できる宇宙の中の星すべてを

追う「全宇宙シミュレーション」が可能

アボガドロ数の粒子の軌跡を追って楽しいか？

THE COLLISIONLESS BOLTZMANN EQUATION

N 体計算はCBEのモンテカルロ的表現に過ぎない。本来は

Vlasov-Poisson 方程式系

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} - \nabla \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} = 0$$

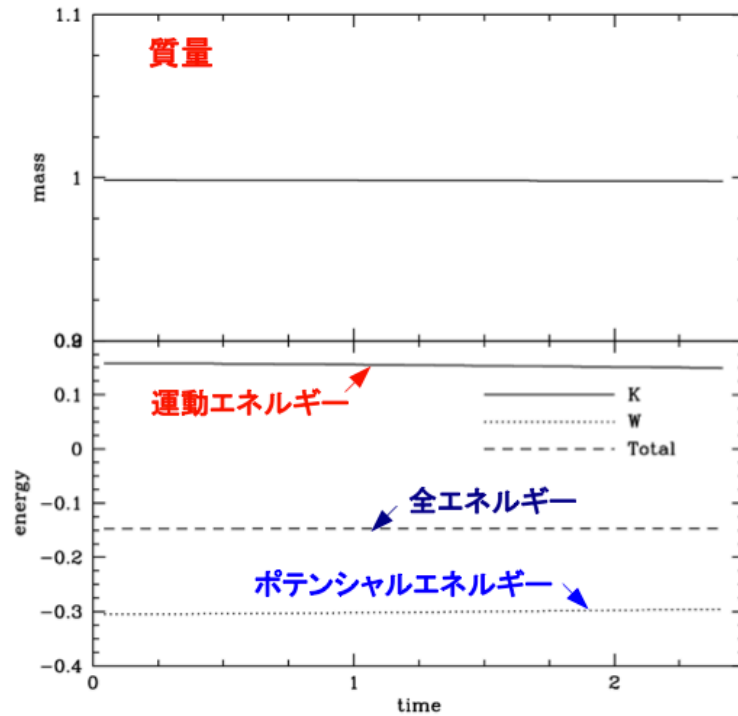
$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho = 4\pi G \int f d^3 \vec{v}$$

6次元位相空間内での $f(x, y, z, u, v, w)$ の進化を知りたい

6次元CBE計算手法

- 位相空間を座標・運動量空間それぞれで3次元の regular mesh に分割
- Vlasov 方程式自体は方向分割で1次元移流方程式に帰着させて解く
Positive Flux Conservative method :
正值性・保存性・無振動を保証
- 重力ポテンシャルはFFTを用いたグリッド法
(孤立境界条件・周期的境界条件)

テスト計算: King 球



時間 [dynamical time]

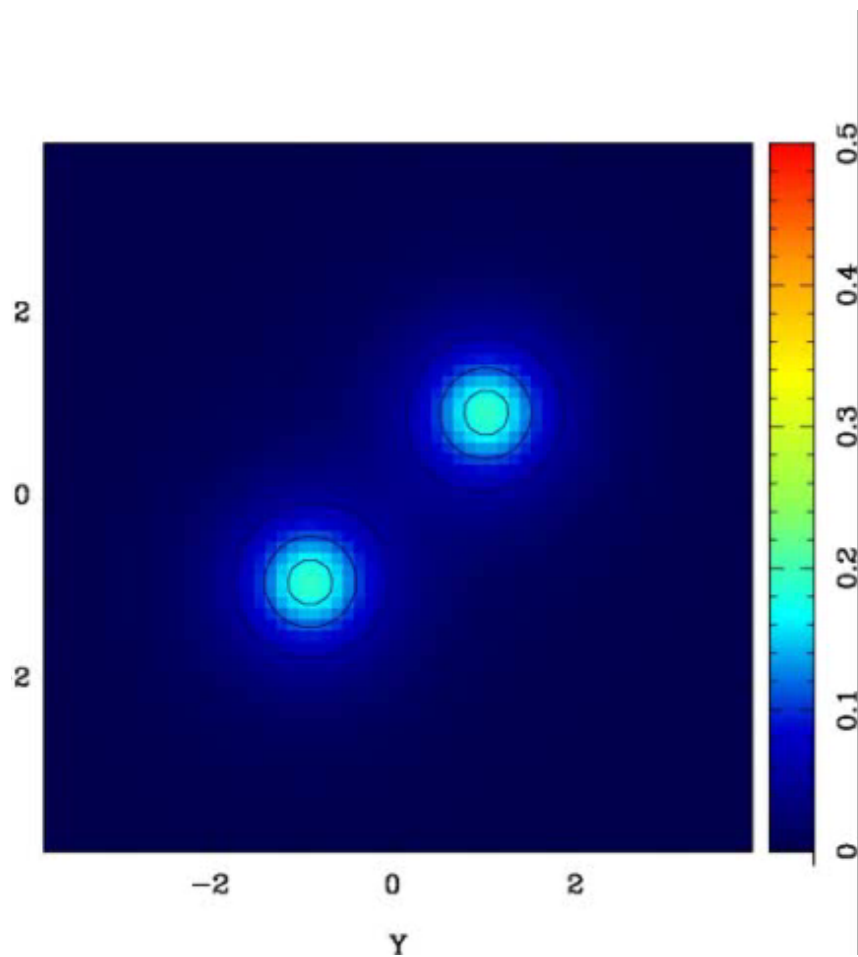
初期条件

$$f_K(\mathcal{E}) = \frac{\rho_0}{(2\pi\sigma^2)^{3/2}} [\exp(\mathcal{E}/\sigma^2) - 1]$$

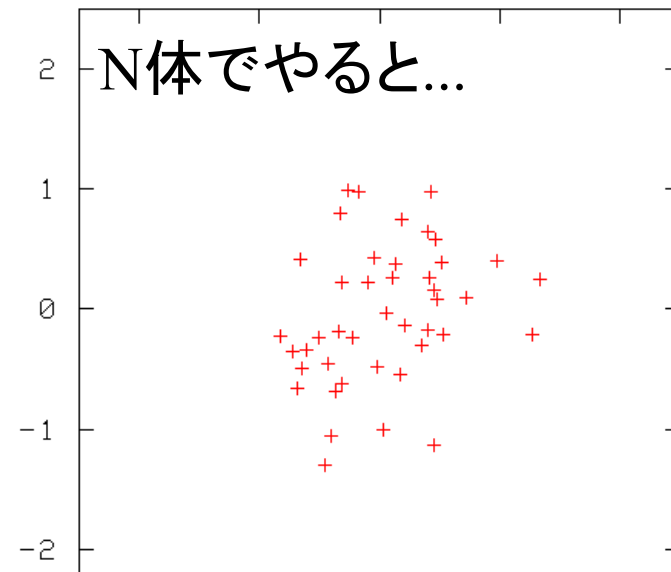
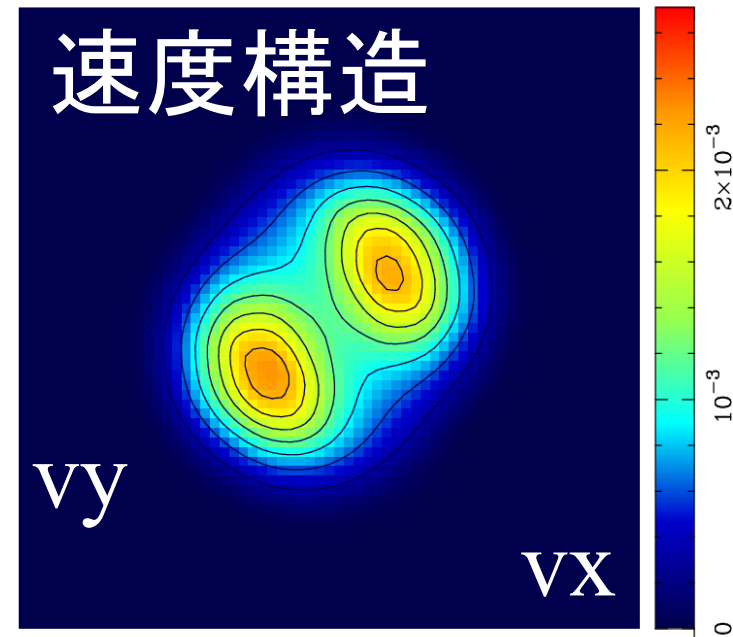
Vlasov方程式の定常解

6次元計算で安定に保たれるかは非自明

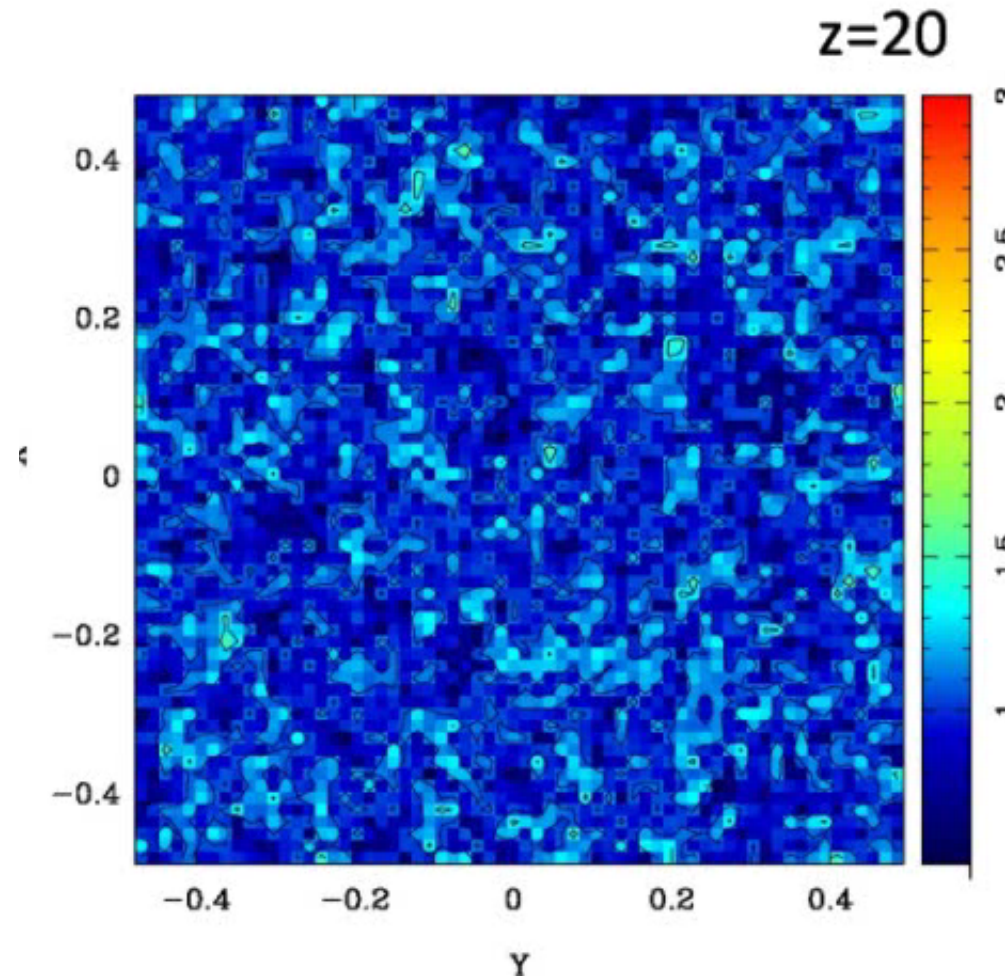
テスト計算: King 球の衝突



Yoshikawa, NY, Umemura, in prep.

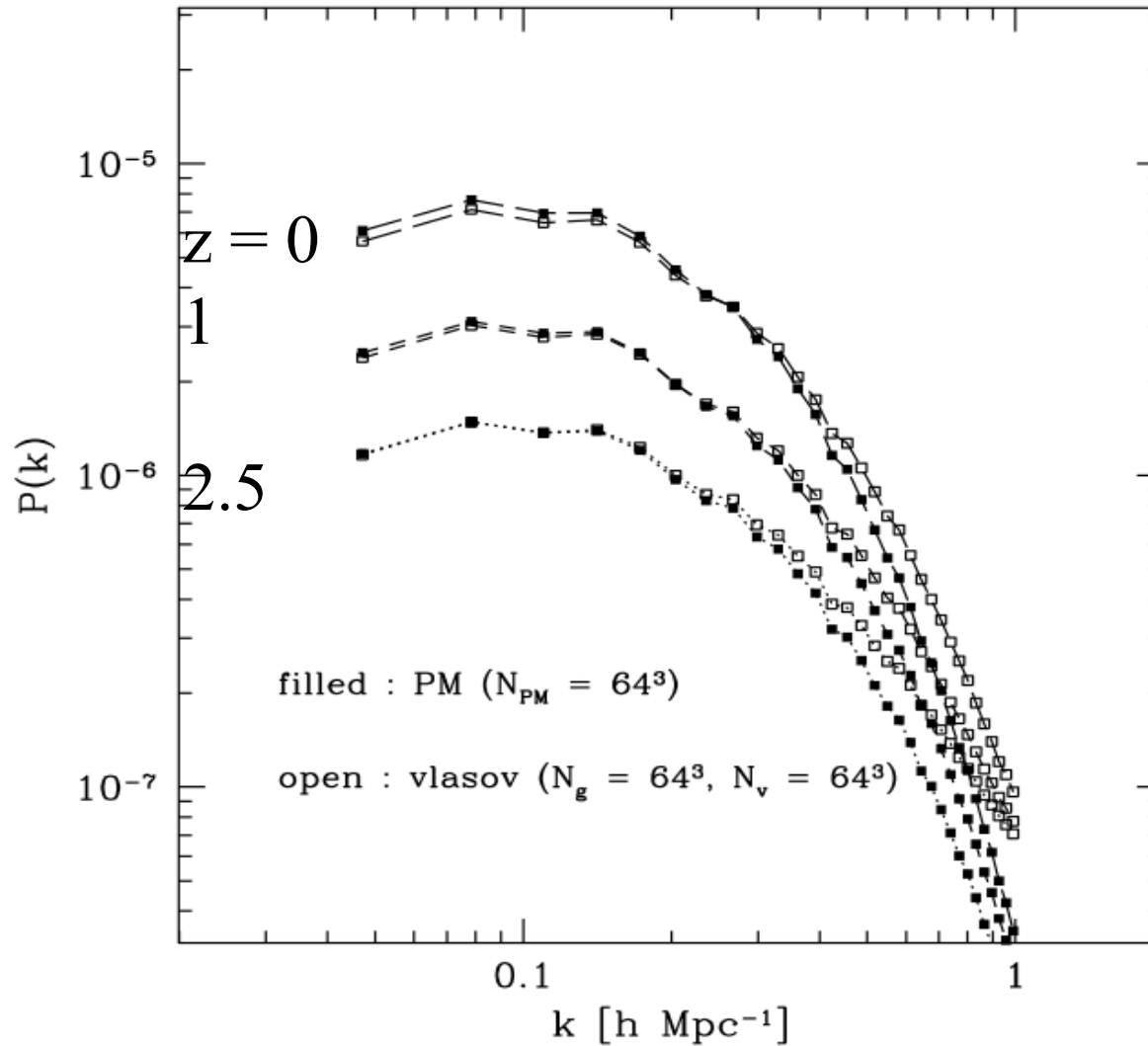


$N=0$ の宇宙論的シミュレーション



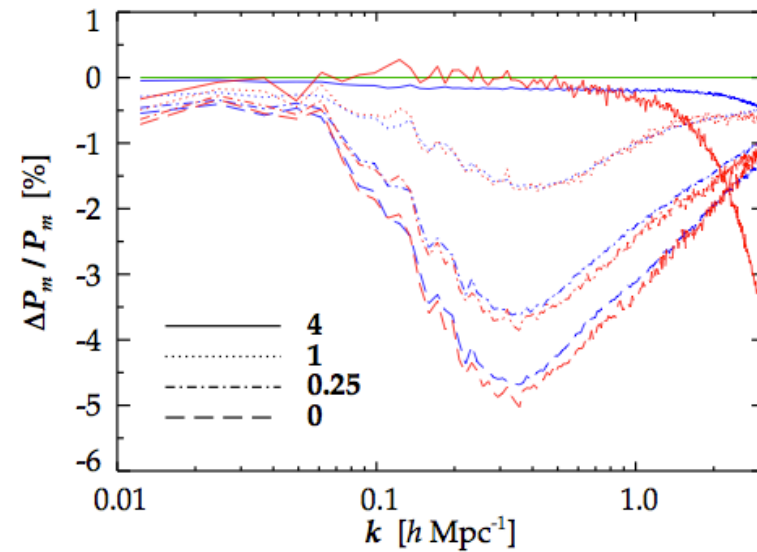
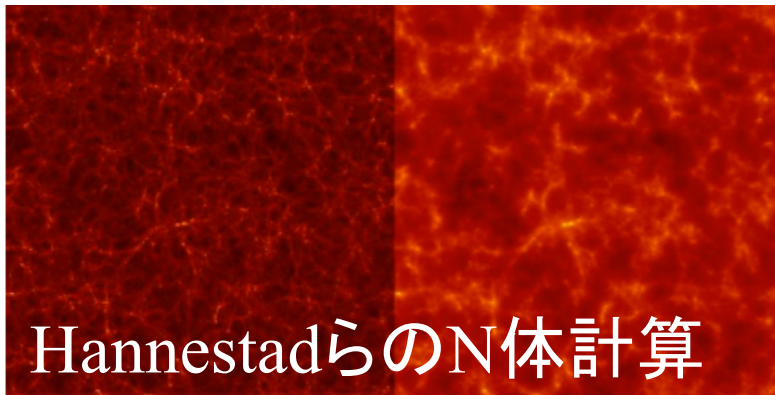
Simulation by K. Yoshikawa

密度揺らぎの進化



今後の展望

熱速度をもつ成分、特にニュートリノの構造形成に有効



銀河円盤の安定性など、離散粒子によるノイズが問題となる系に適用

まとめ

ダークマターの局所的な分布を観測的に探れるようになってきた

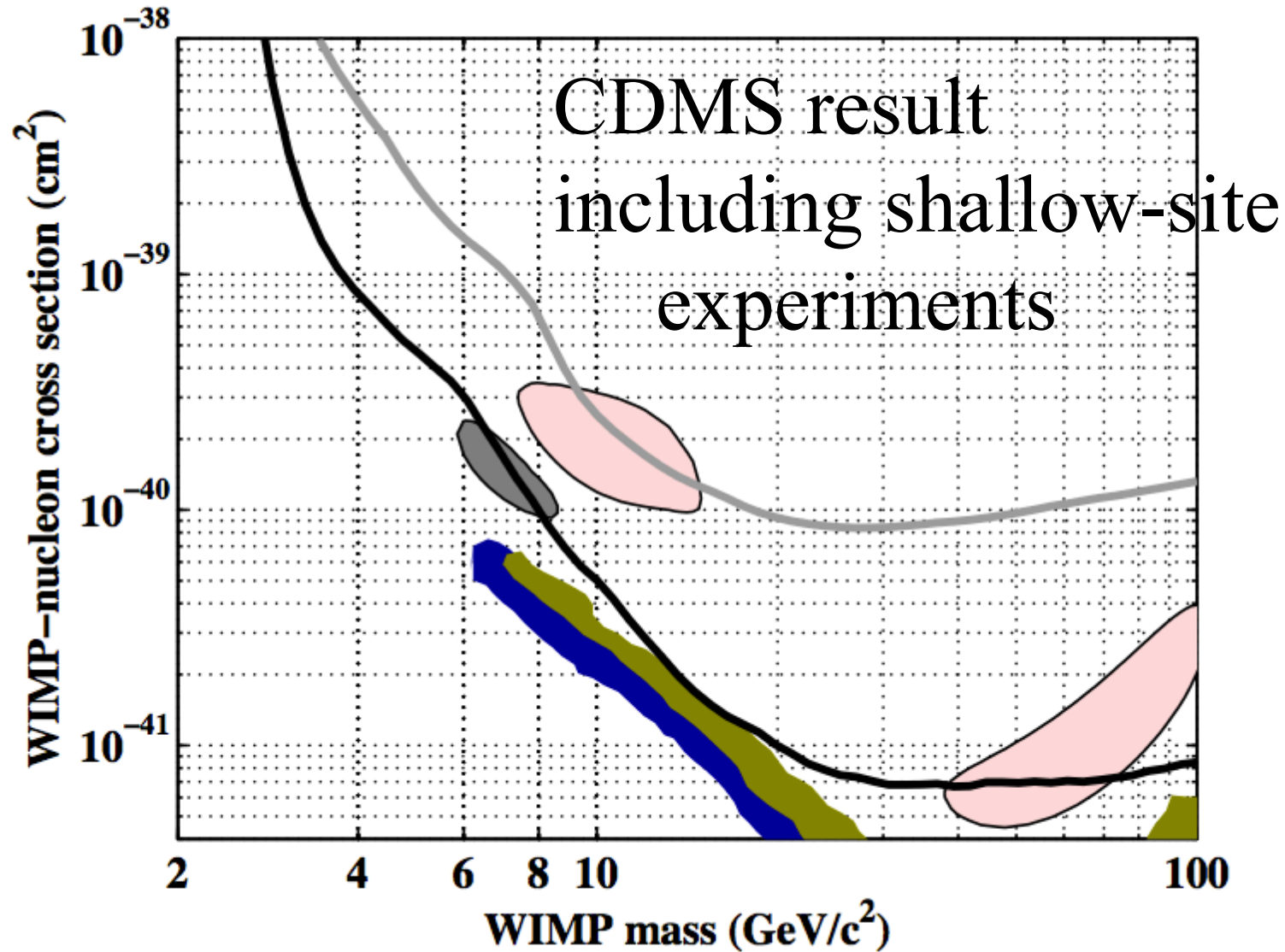
モデル:

ダークマターはおおむね冷たく ($m > 1\text{keV}$)

安定 ($> 100\text{Gyr}$)

構造形成シミュレーションの新たな展開

直接検出実験の現況



XMASS@神岡!

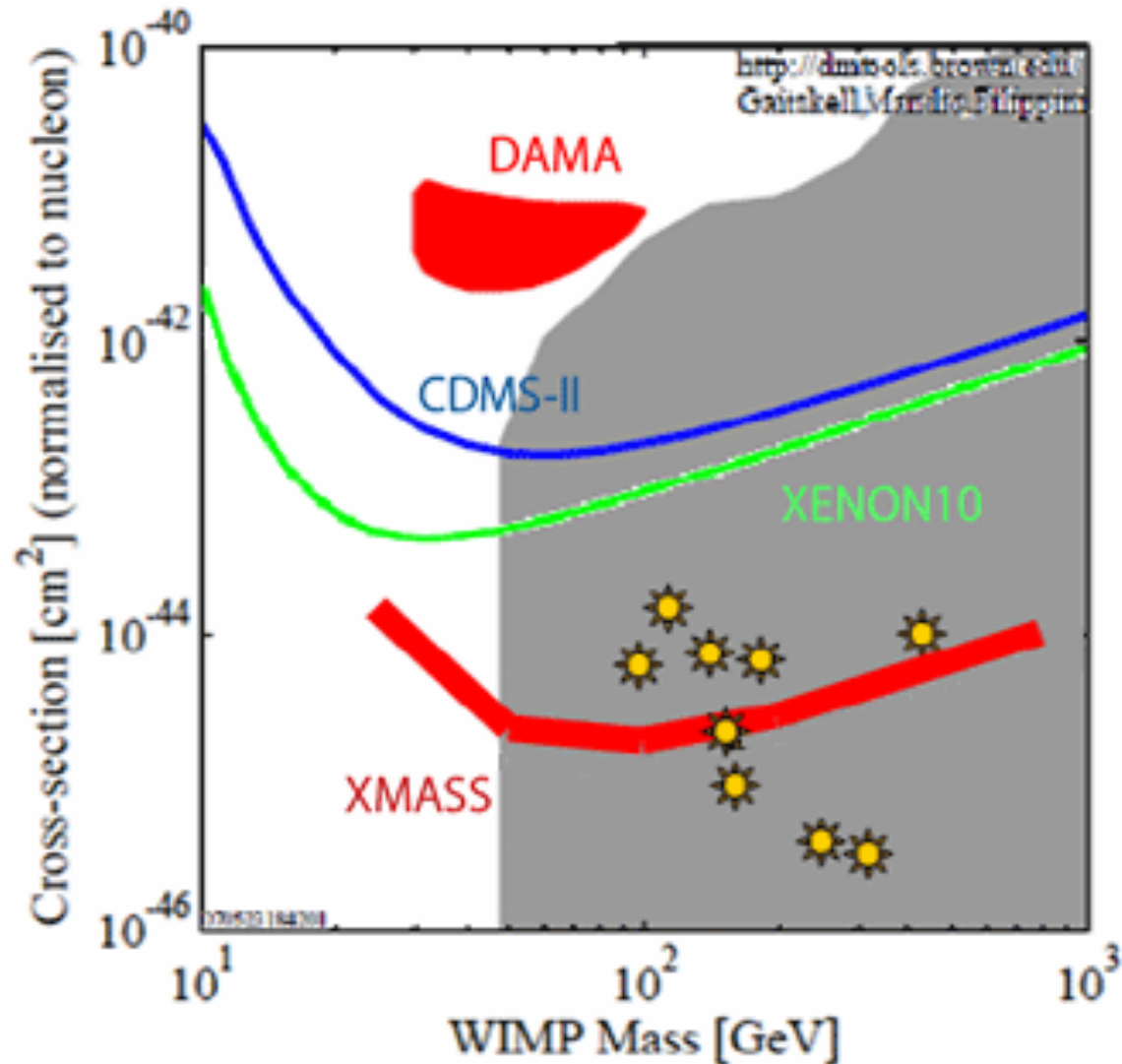
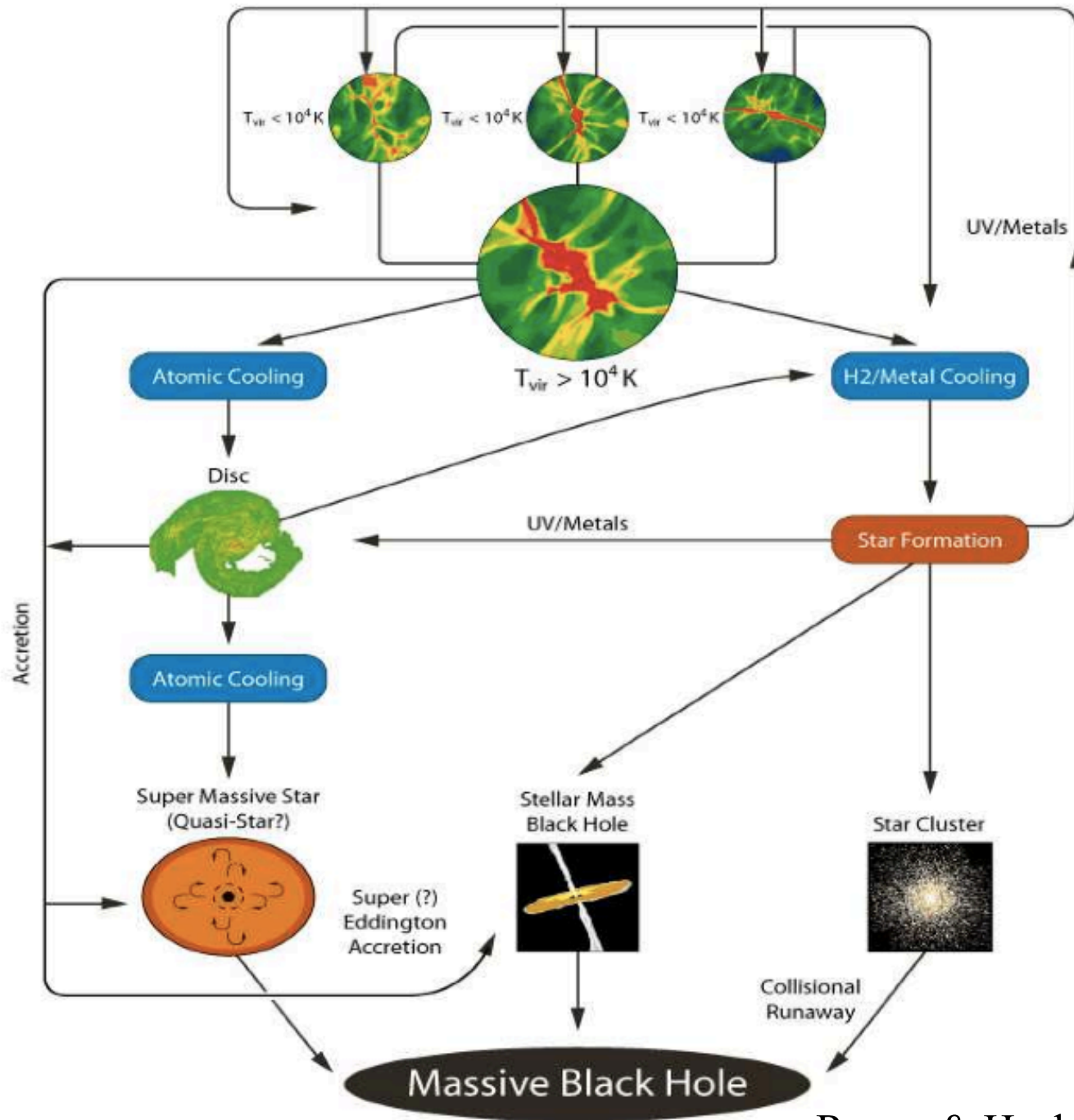


図6: ダークマター探索実験の検出感度

大質量 ブラックホール 形成チャート



Regan & Haehnelt 2009