

ダークマターの観測的制限

大栗 真宗

(東京大 RESCEU/物理/Kavli IPMU)

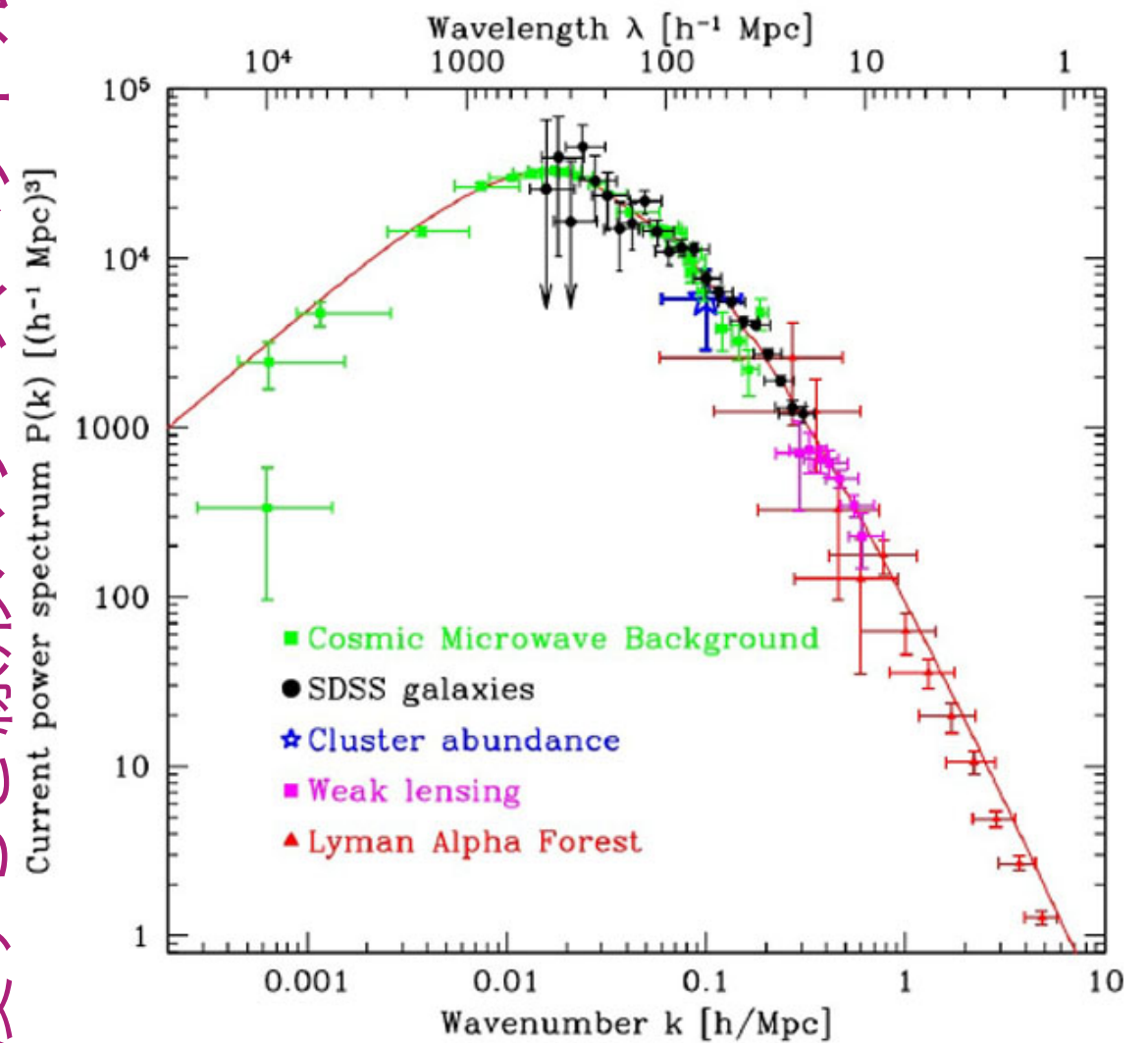
内容

- 冷たいダークマターの成功
- いわゆる「小スケール問題」
- ダークマターはブラックホールか？

ダークマター

- たくさんの状況証拠
(銀河回転曲線、銀河団、
宇宙の大規模構造、、、、)
- 観測から「冷たい」
ダークマター (CDM)
が示唆
- CDMは大規模(=線形)
構造から仮定された
理論、非線形領域で
も正しいかは非自明

密度ゆらぎ線形パワースペクトル

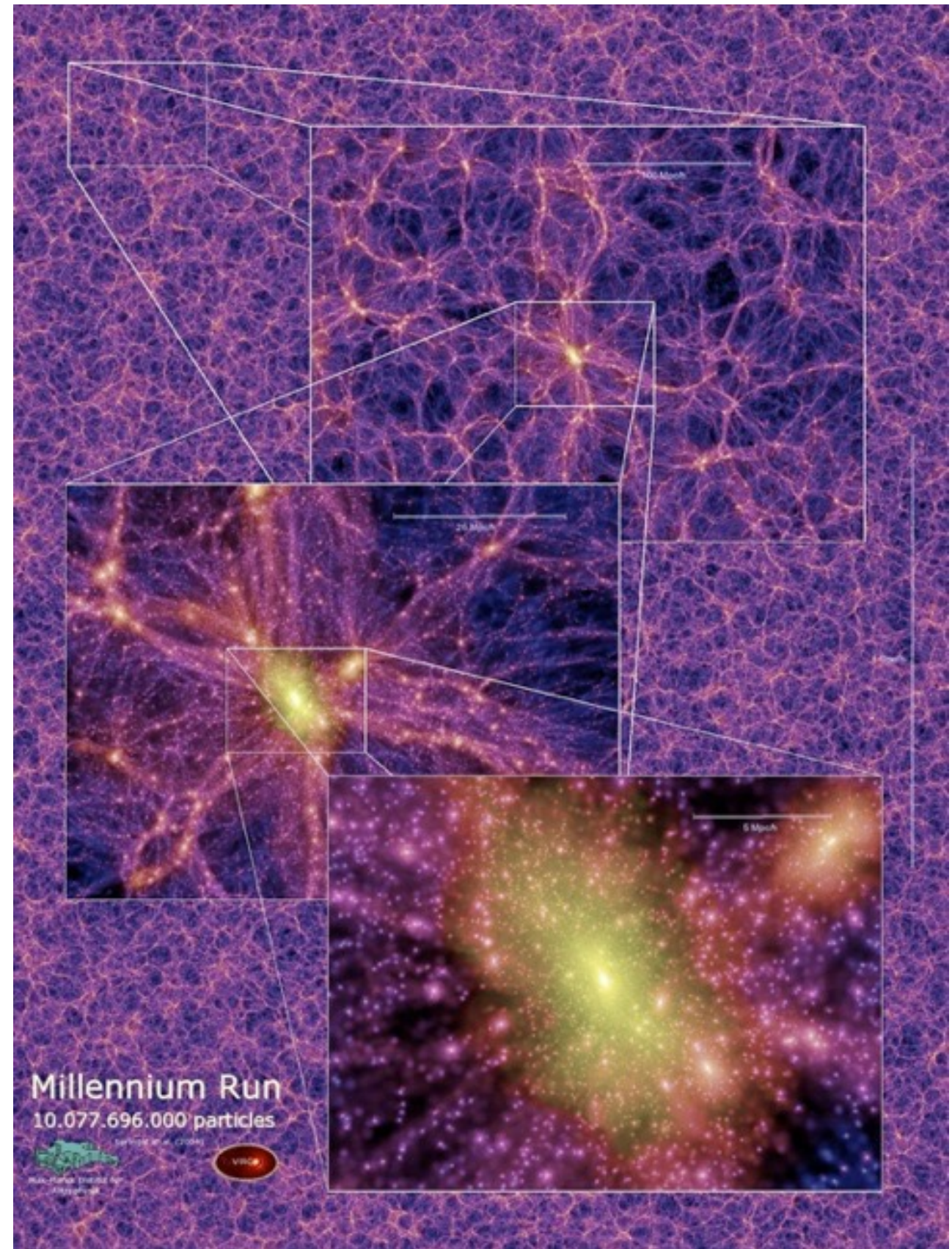


ゆらぎの波数

Tegmark+2004

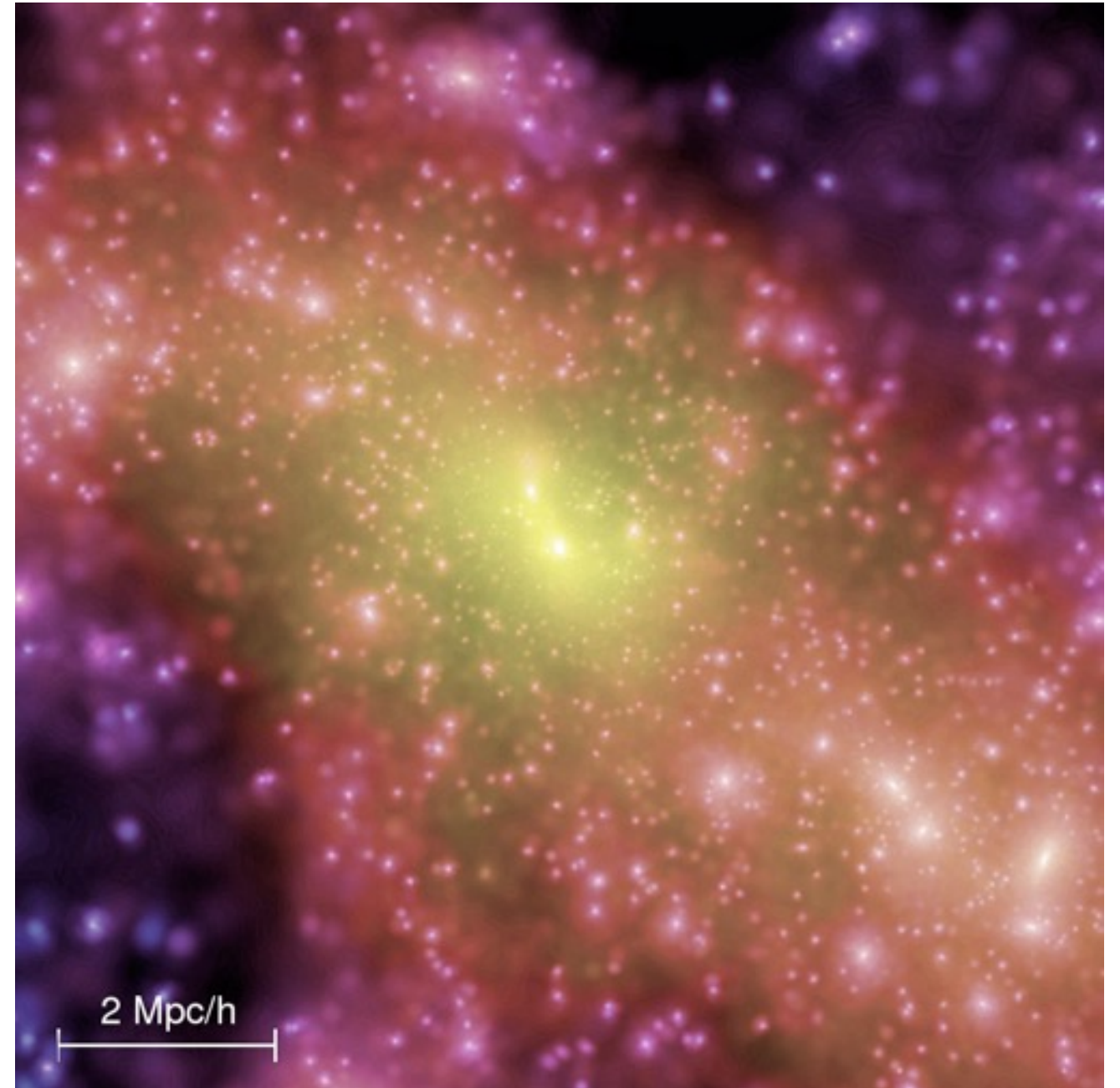
ダークマターハロー

- ダークマターが自己重力により集まってビリアル平衡
- 強非線形密度ゆらぎ ($\delta\rho/\rho \gg 1$)
- 銀河、銀河団に対応
- N体シミュレーションによってその構造が詳細に予言される



CDMが予言するハローの性質

- **cuspy**な動径密度分布
いわゆるNFW分布
$$\rho(r) \propto r^{-1}(r+r_s)^{-2}$$
- **大きな非球対称性**
銀河団で軸比 $\sim 1:2$
- **サブストラクチャ**
「ぶつぶつ」が沢山



<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>

ダークマターの性質と密接な関係

ダークマター性質との関連の一例

- **self-interacting dark matter**

CDMの「小スケール問題」

を解決するために導入

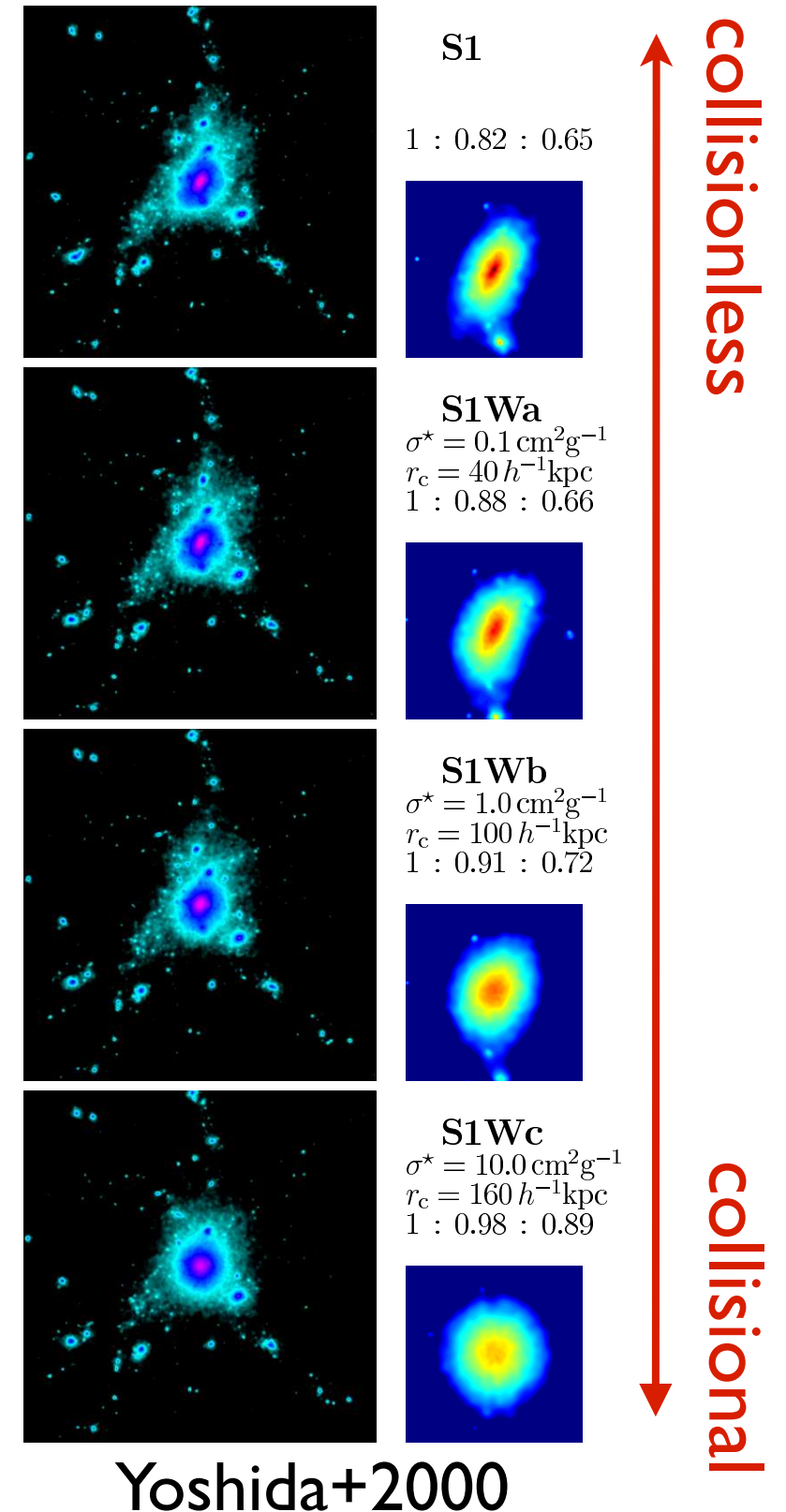
(Spergel, Steinhardt 2000)

- CDM粒子同士の弾性散乱は

ハロ－の密度分布を変更

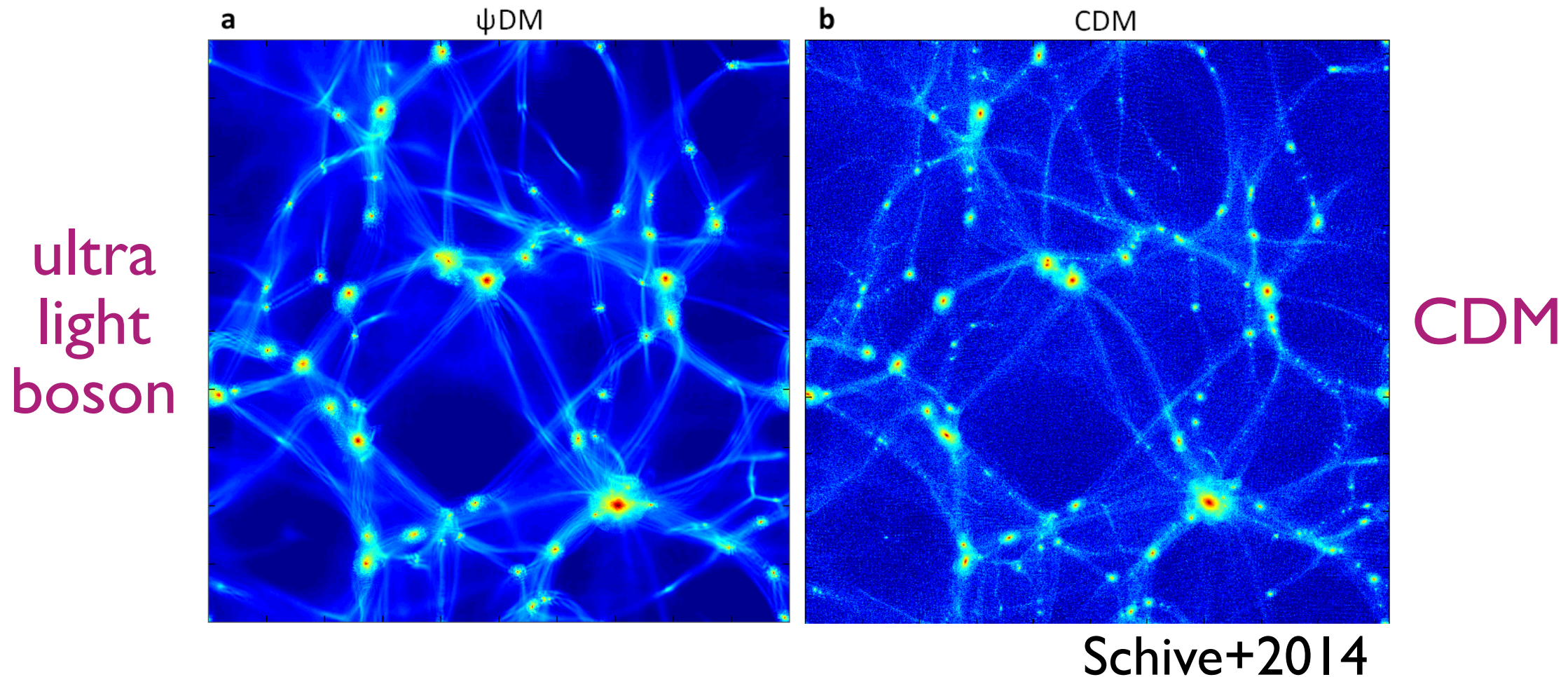
– 中心密度低下

– より丸い形状



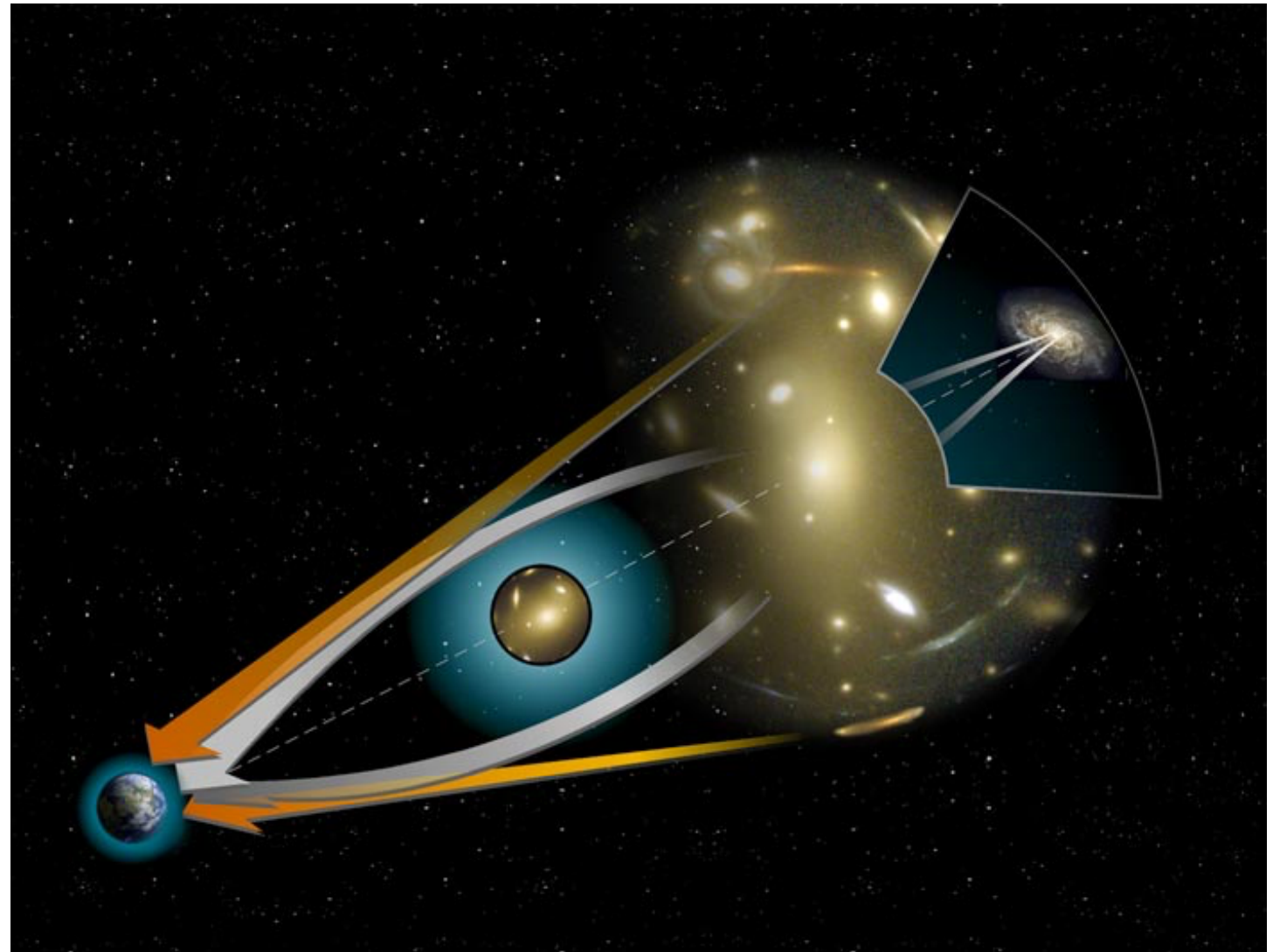
ダークマター性質との関連の一例

- **fuzzy dark matter (scalar field DM, wave DM, ...)**
とても軽いボゾンがDMだとドブロイ波長が大きく (~kpc) 小スケール構造を抑制&コア的中心密度分布
(e.g., Peebles 2000; Hu+2000; Schive+2014; Hui+2017)

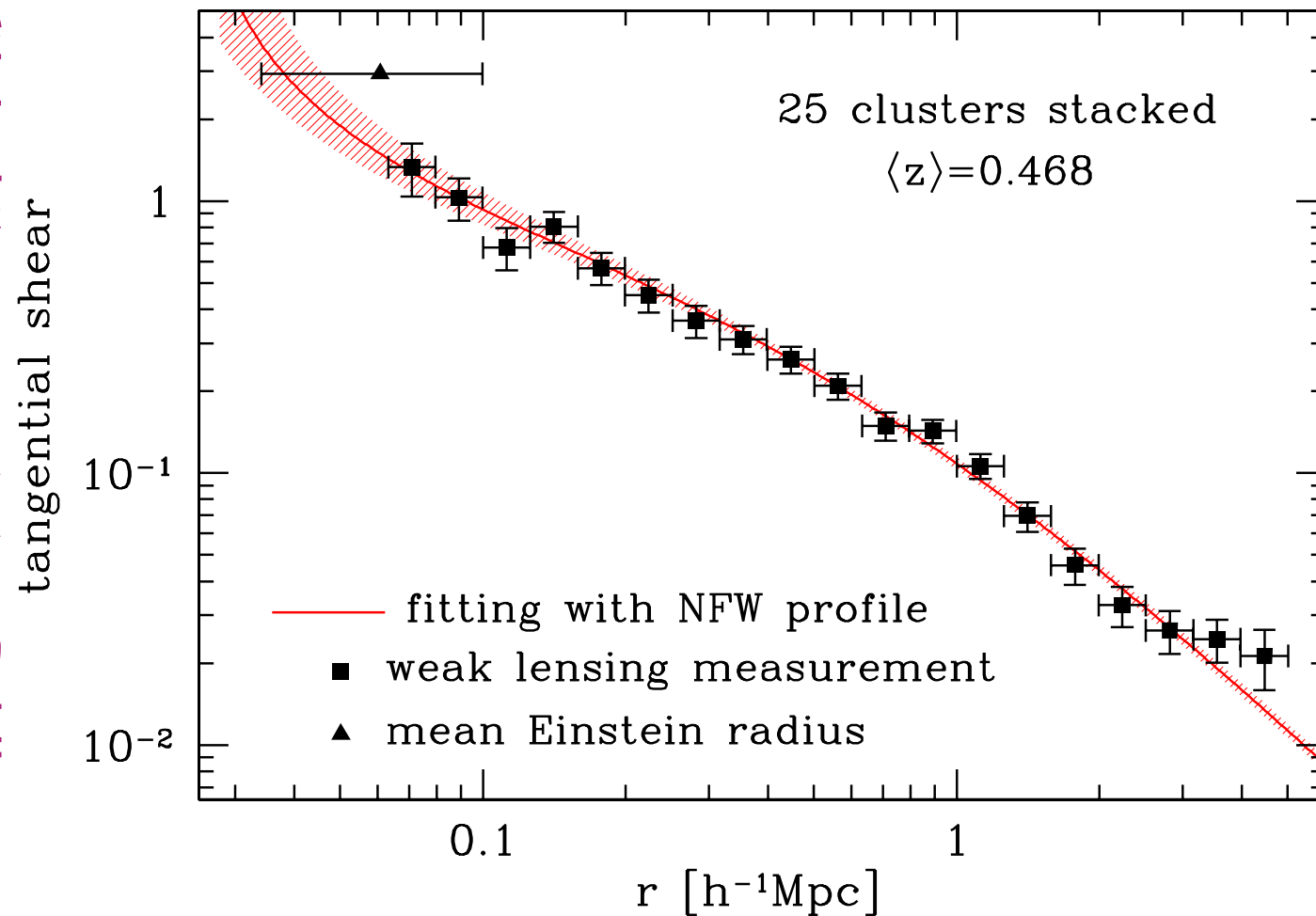


重力レンズ

- 重力場による光の経路のまがり、天体の形状のゆがみ
- **ダークマター**を含めた全質量を**直接測定**できるので**超便利!**



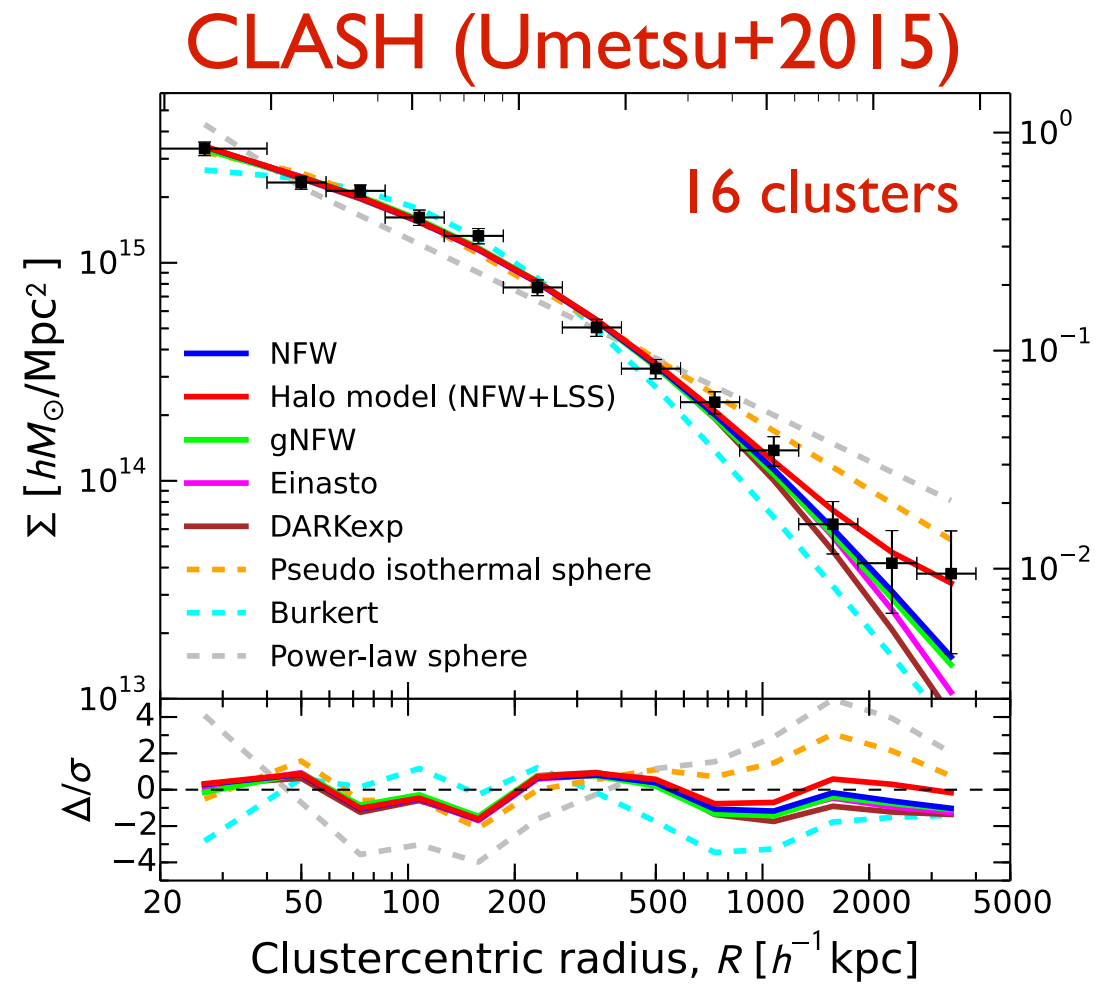
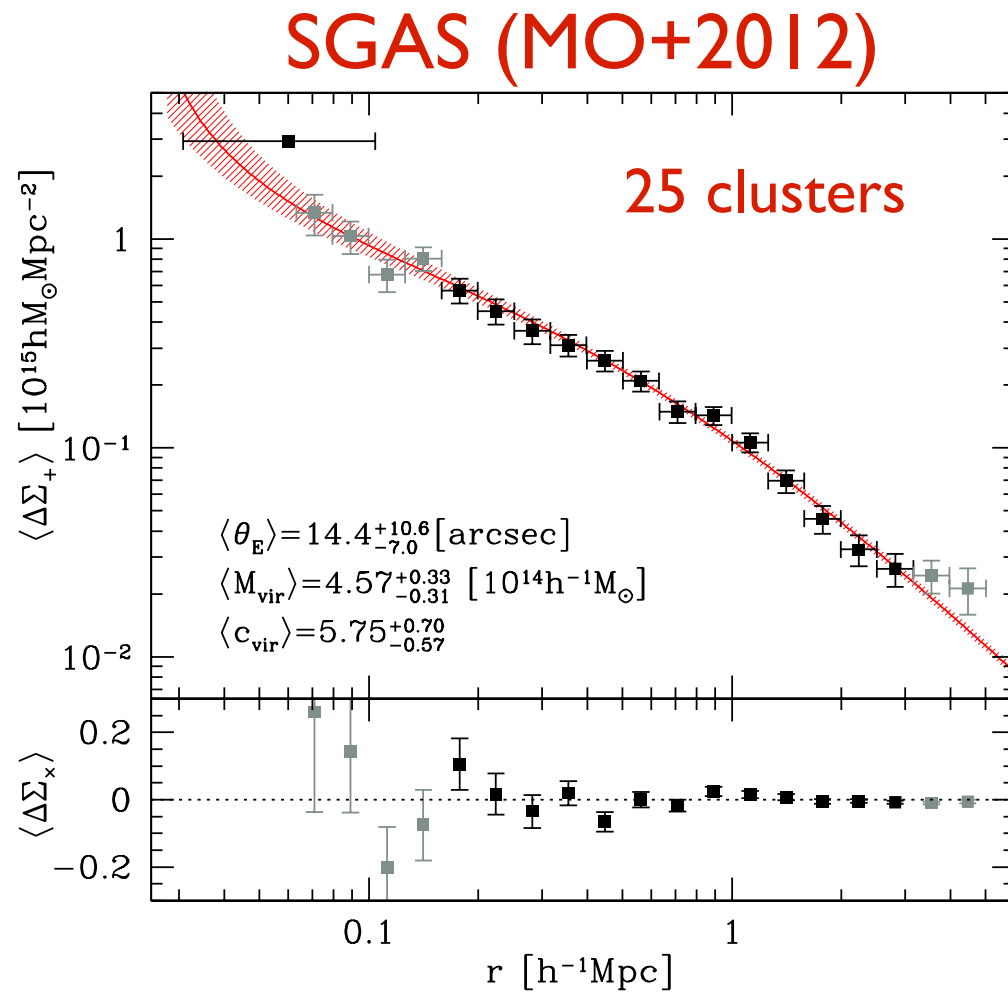
銀河団ダークマターの動径密度分布



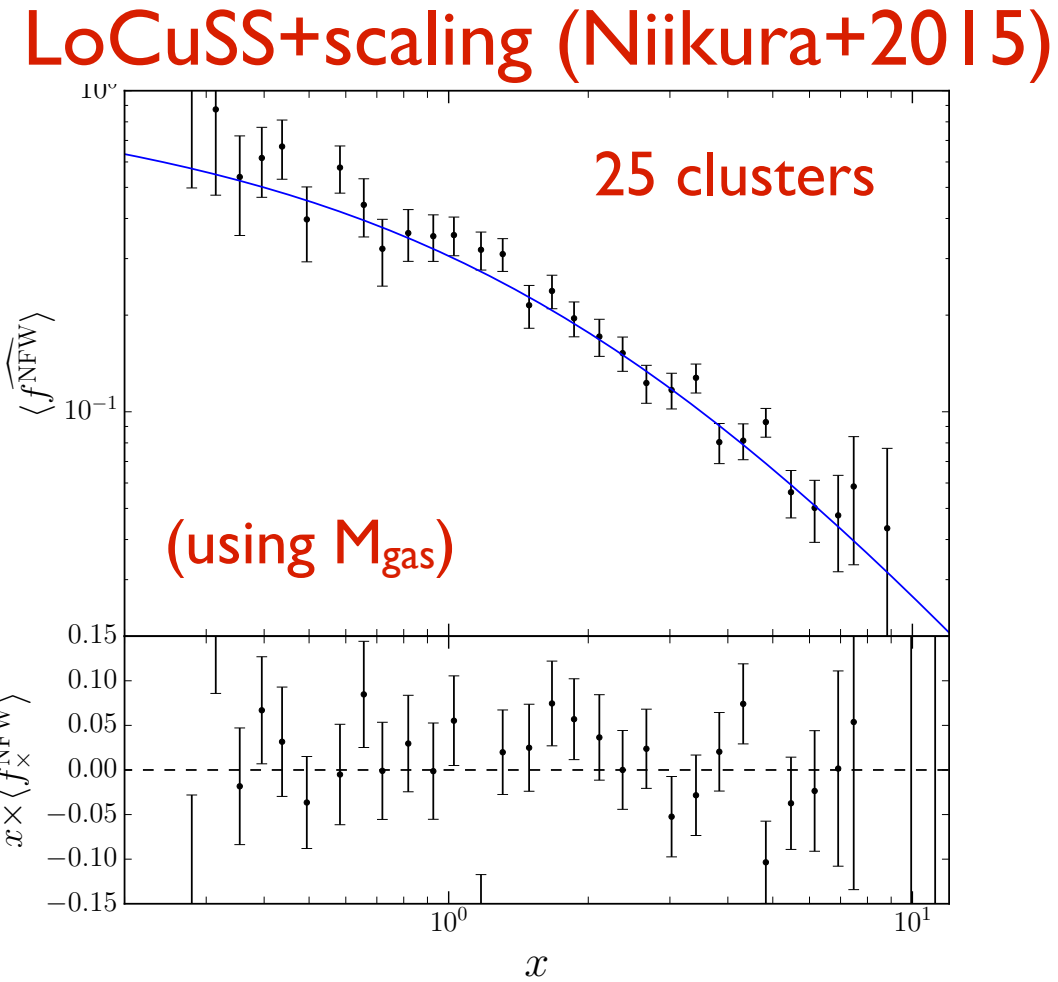
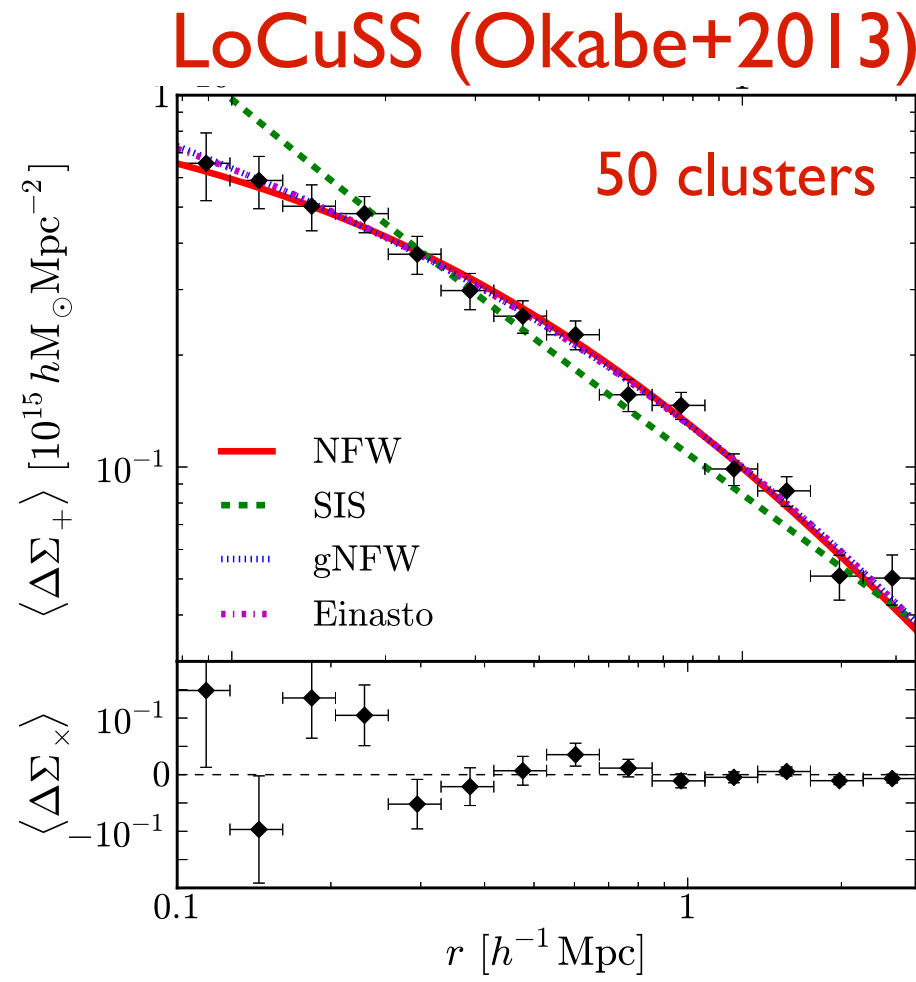
銀河団中心からの距離

- 銀河団はダークマターが卓越しているのでN体計算の結果との比較に有用
- 多くの銀河団をstackしてS/Nをかせぐ
- 観測された動径分布はCDMで期待されるNFWと非常に一致

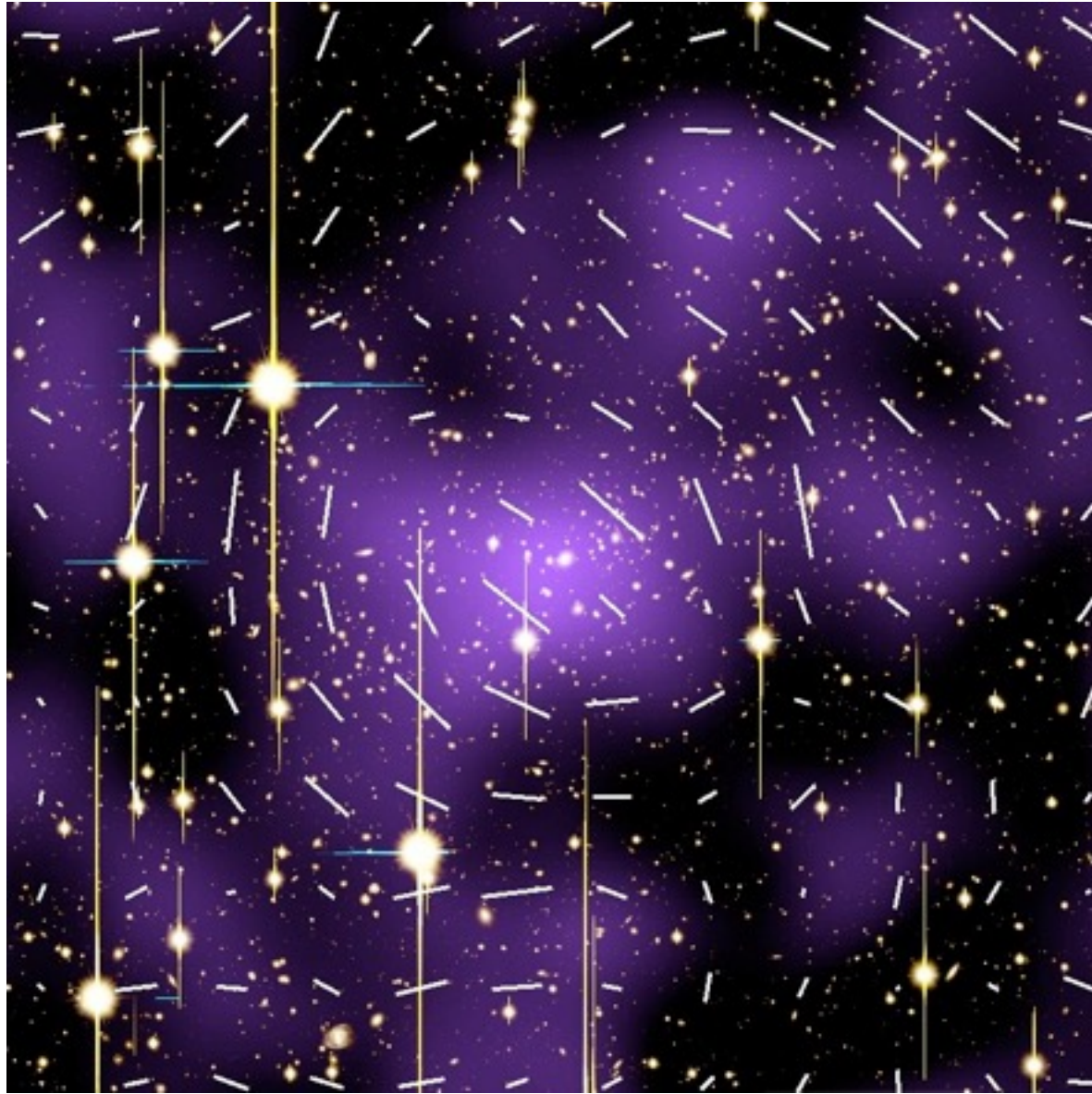
銀河団の
動径密度
質量分布
はNFWと
よく一致



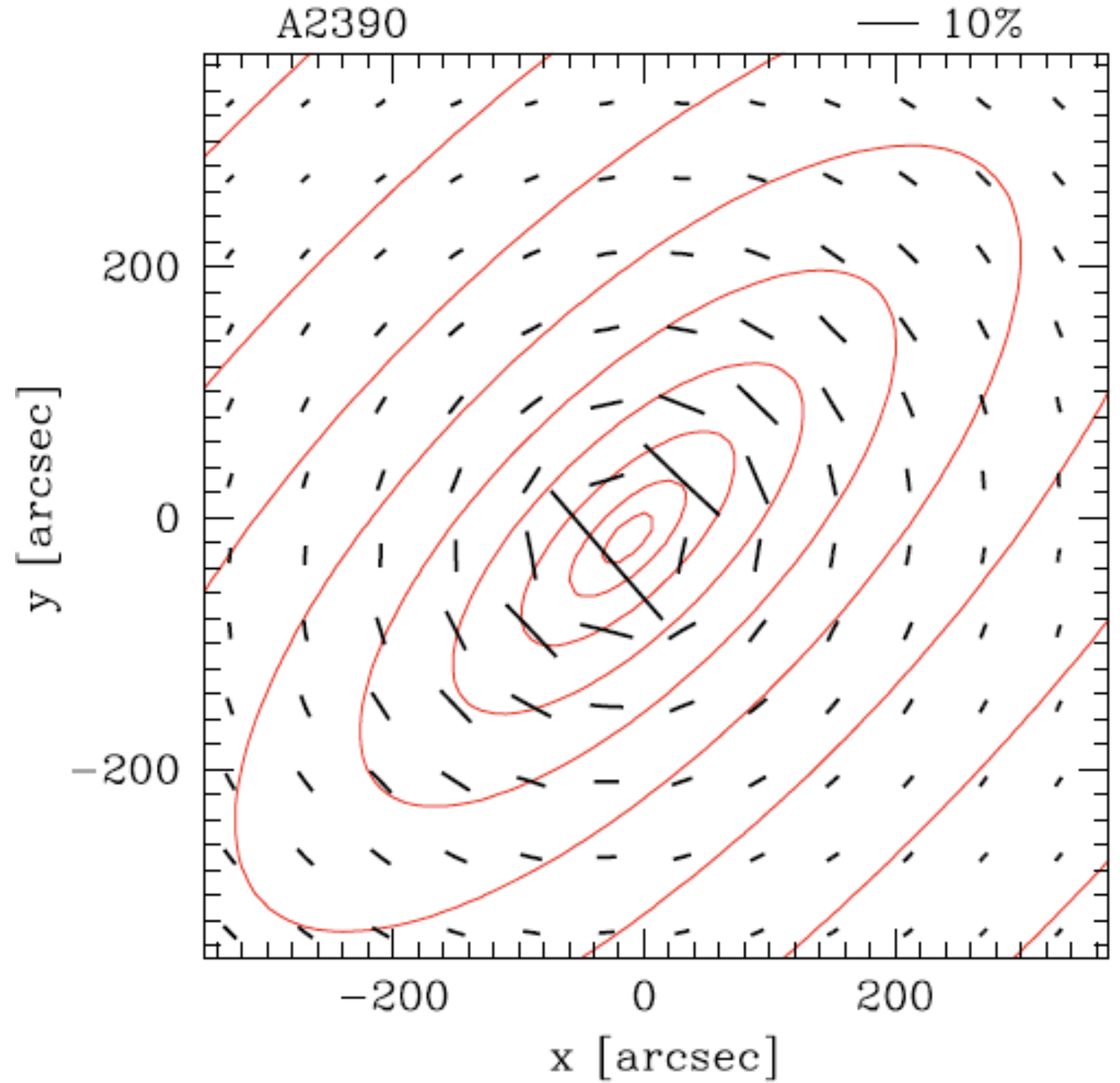
すばる
望遠鏡
貢献大!



非球対称性の観測的検証

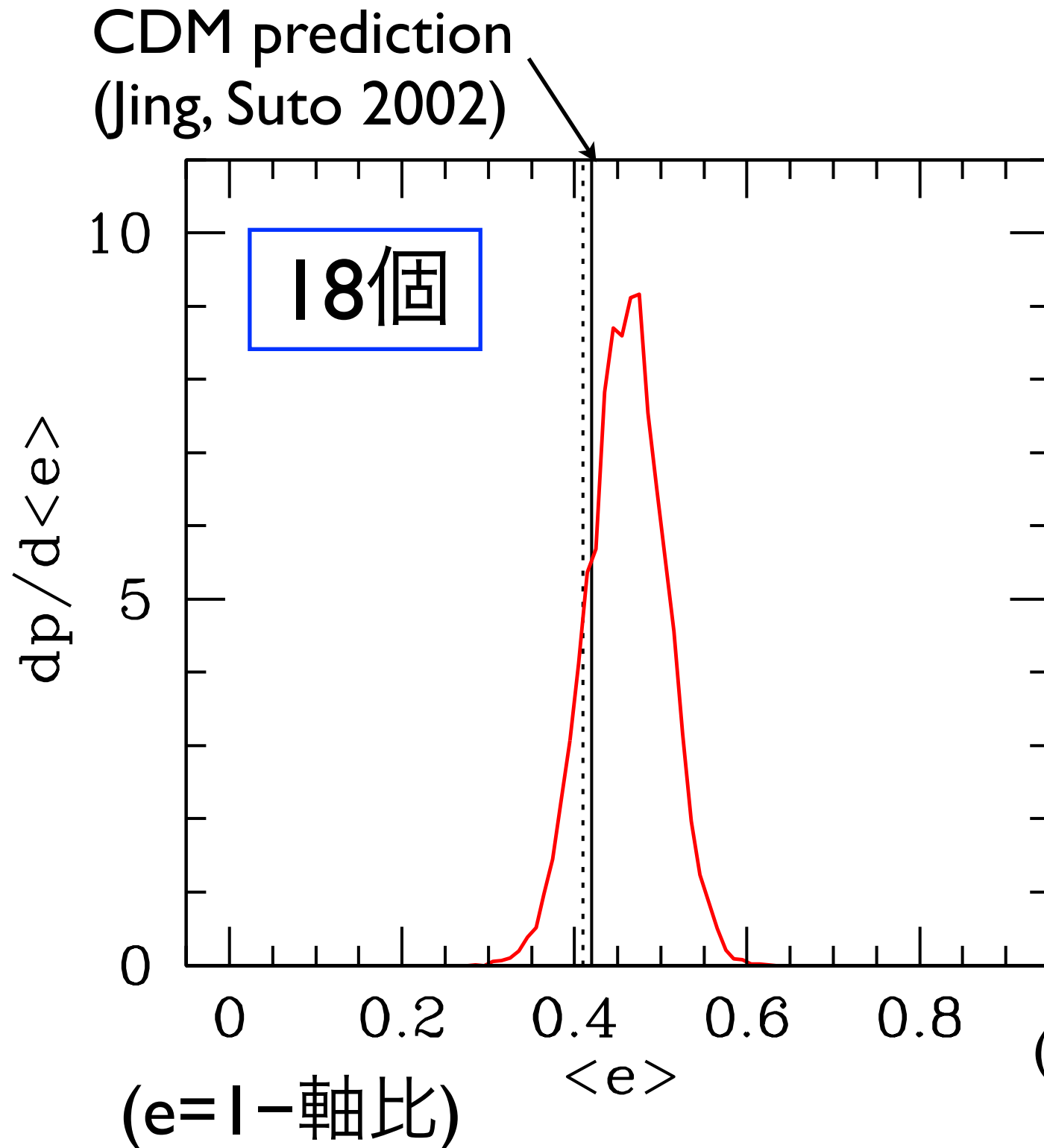


重力レンズシア地図
+再構築された密度分布



ベストフィット (楕円NFW)

銀河団ハローの平均ゆがみ



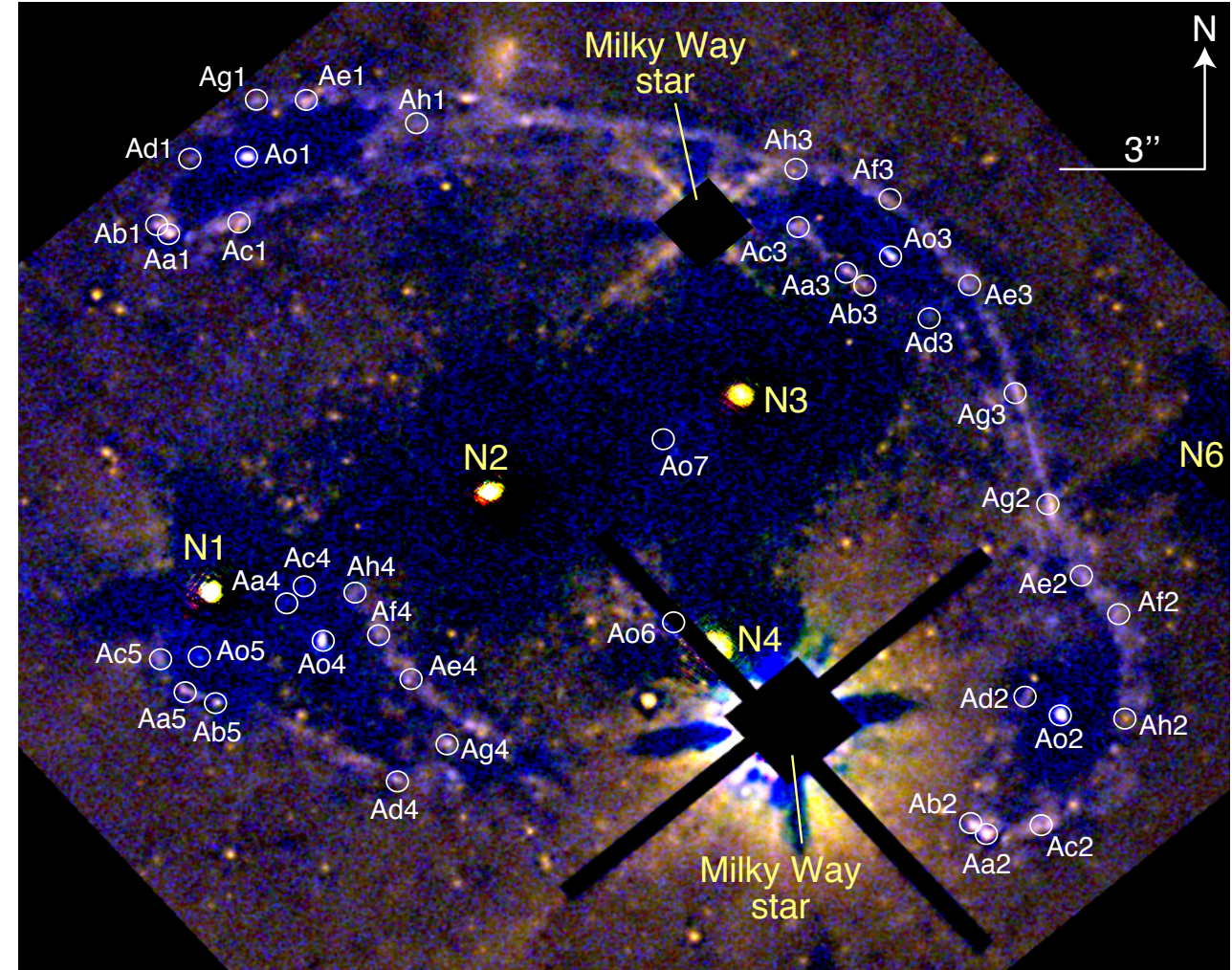
- 18個の銀河団の重力レンズ信号を解析
- $\langle e \rangle = 0.46 \pm 0.04$
非球対称性を 7σ 検出
(初の直接検出)
- CDMモデルの予言と
とてもよく一致

(see also Evans, Bridle 2009; Oguri+2012;
Clampitt, Jain 2016; van Uitert+2017;
Shin+2018; Umetsu+2018)

self-interacting dark matter?

- 衝突銀河団からの制限は概ね $\sigma/m < 1-3 \text{ cm}^2/\text{g}$
(e.g., Markevitch+2004; Bradac+2008; Randall+2008; Merten+2011)
- マイナー衝突も含めた統計解析 $\sigma/m < 0.5 \text{ cm}^2/\text{g}$
(Harvey+2015)
- 銀河団ハローの形状からもおよそ $\sigma/m < 1 \text{ cm}^2/\text{g}$
(e.g., Peter+2013)
- 銀河団Abell 3827のDM-銀河オフセット
→ $\sigma/m \sim 1.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{g}$ (Massey+2015) (??)
[w/ restore force $\sigma/m \sim 1.5 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Kahlohoefer+2015)]

Abell 3827



- 同じ著者の重力レンズ再解析によって、DM-銀河オフセットは消え有限断面積も必要なくなった (Massey+2018)

銀河団ダークマター分布

- 重力レンズを使って銀河団内のダークマター分布を直接、精密に測定できるようになってきた
- (無衝突) CDMモデルで予言される動径密度分布、非球対称性が観測と高い精度で一致
- 大規模構造の観測から仮定したシンプルなダークマターモデルが強非線形領域でも正しいかどうかは決して自明ではなく、この高精度の一致はある意味驚くべきことである

より小スケールへ

密度ゆらぎ

$P(k)$

$\propto k^1$

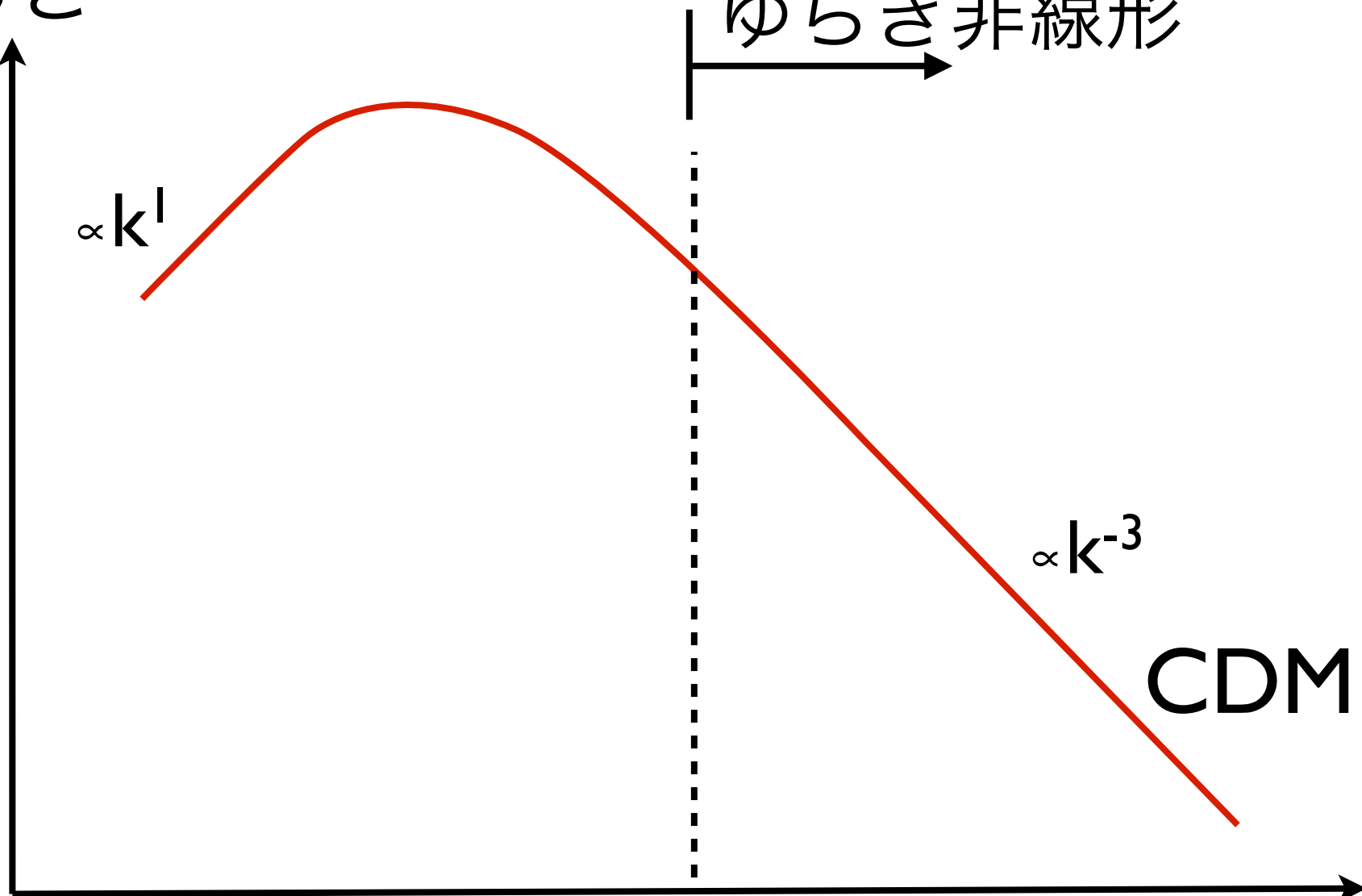
ゆらぎ非線形

$\propto k^{-3}$

CDM

$(\sim 8\text{Mpc})^{-1}$

波数 k



より小スケールへ

密度ゆらぎ

$P(k)$

ゆらぎ非線形

$\propto k^1$

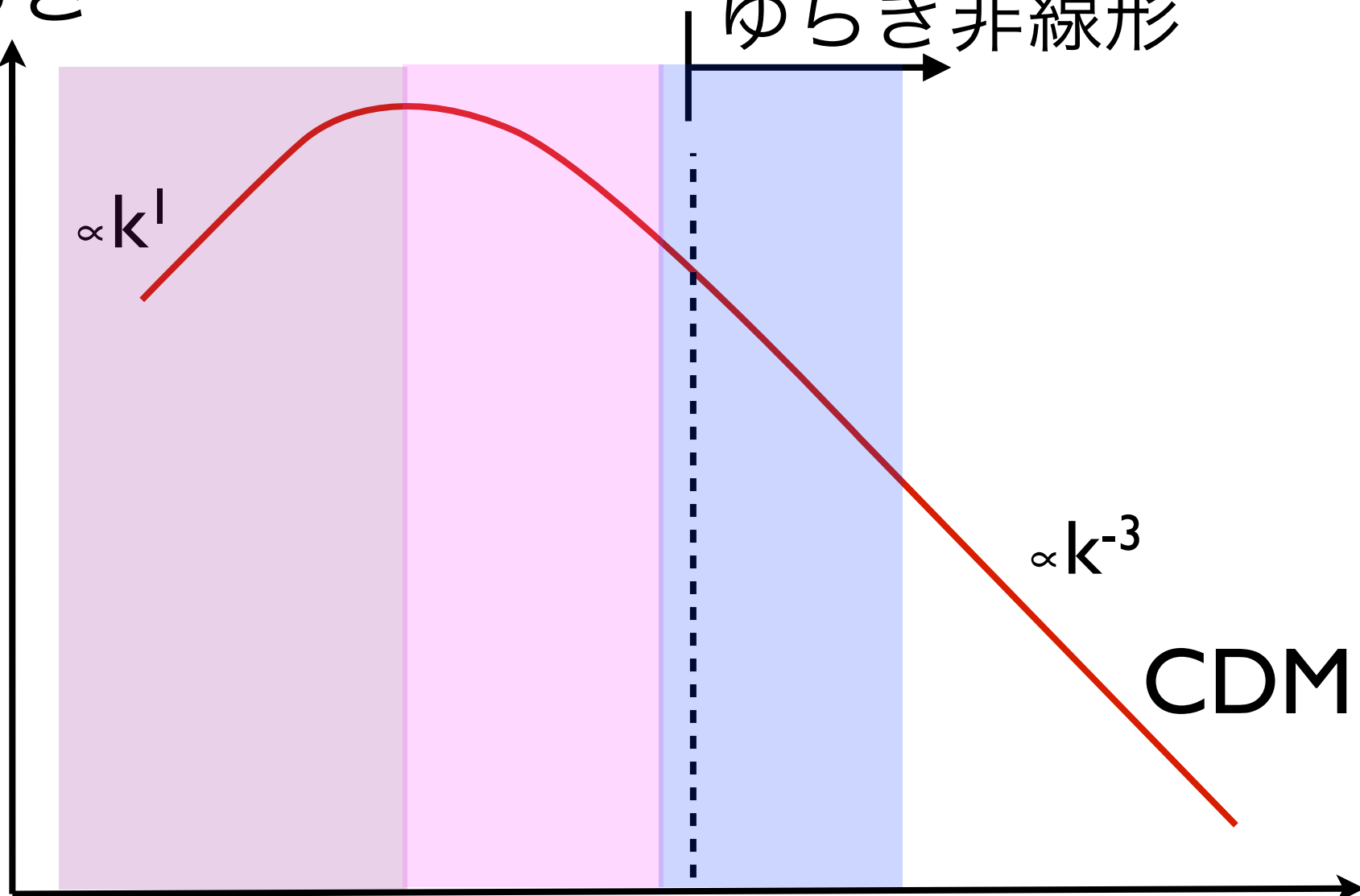
$\propto k^{-3}$

CDM

CMB 大規模構造 銀河団

波数 k

OK!



より小スケールへ

密度ゆらぎ

$P(k)$

ゆらぎ非線形

$\propto k^1$

$\propto k^{-3}$

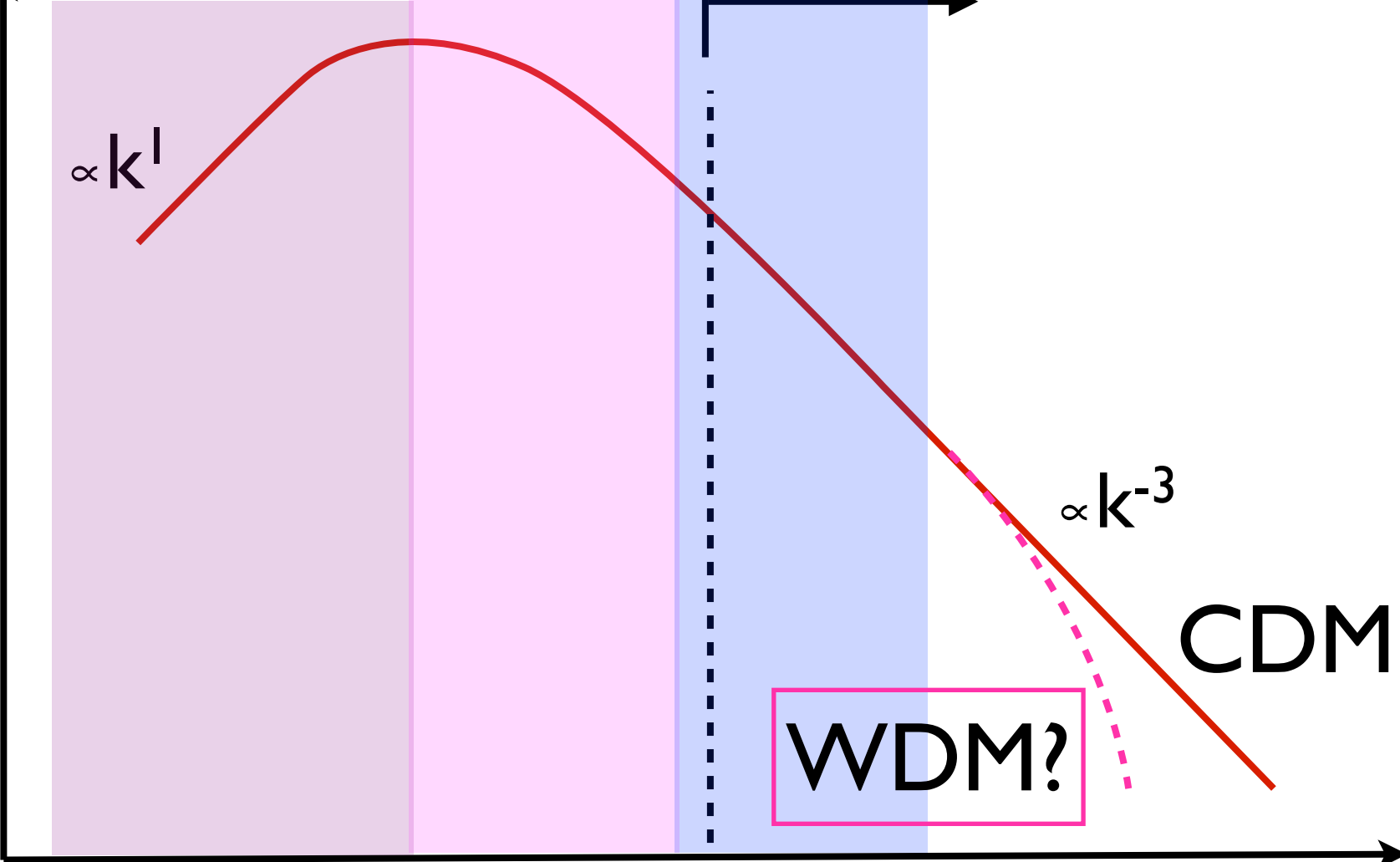
CDM

WDM?

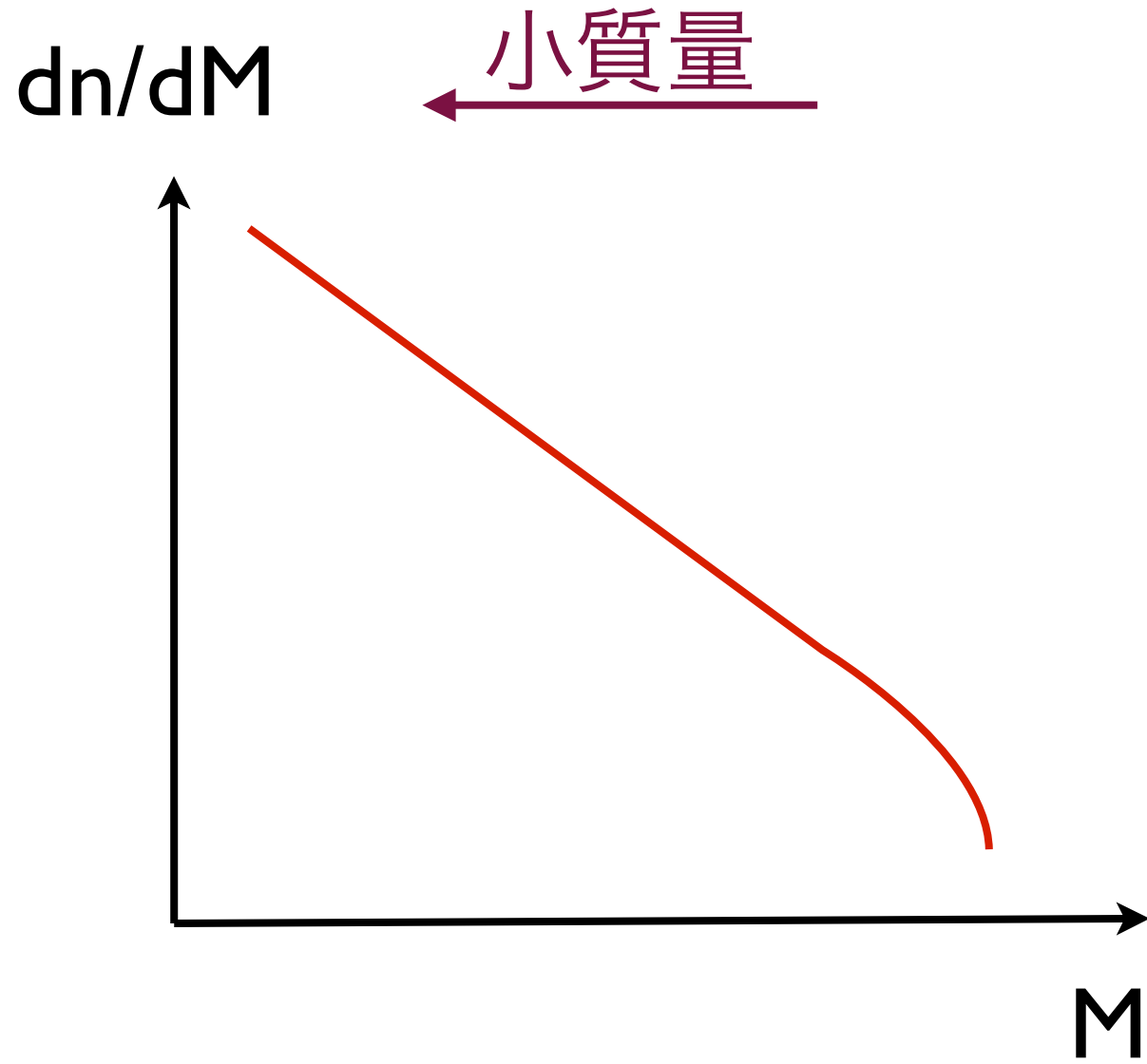
CMB 大規模構造 銀河団

波数 k

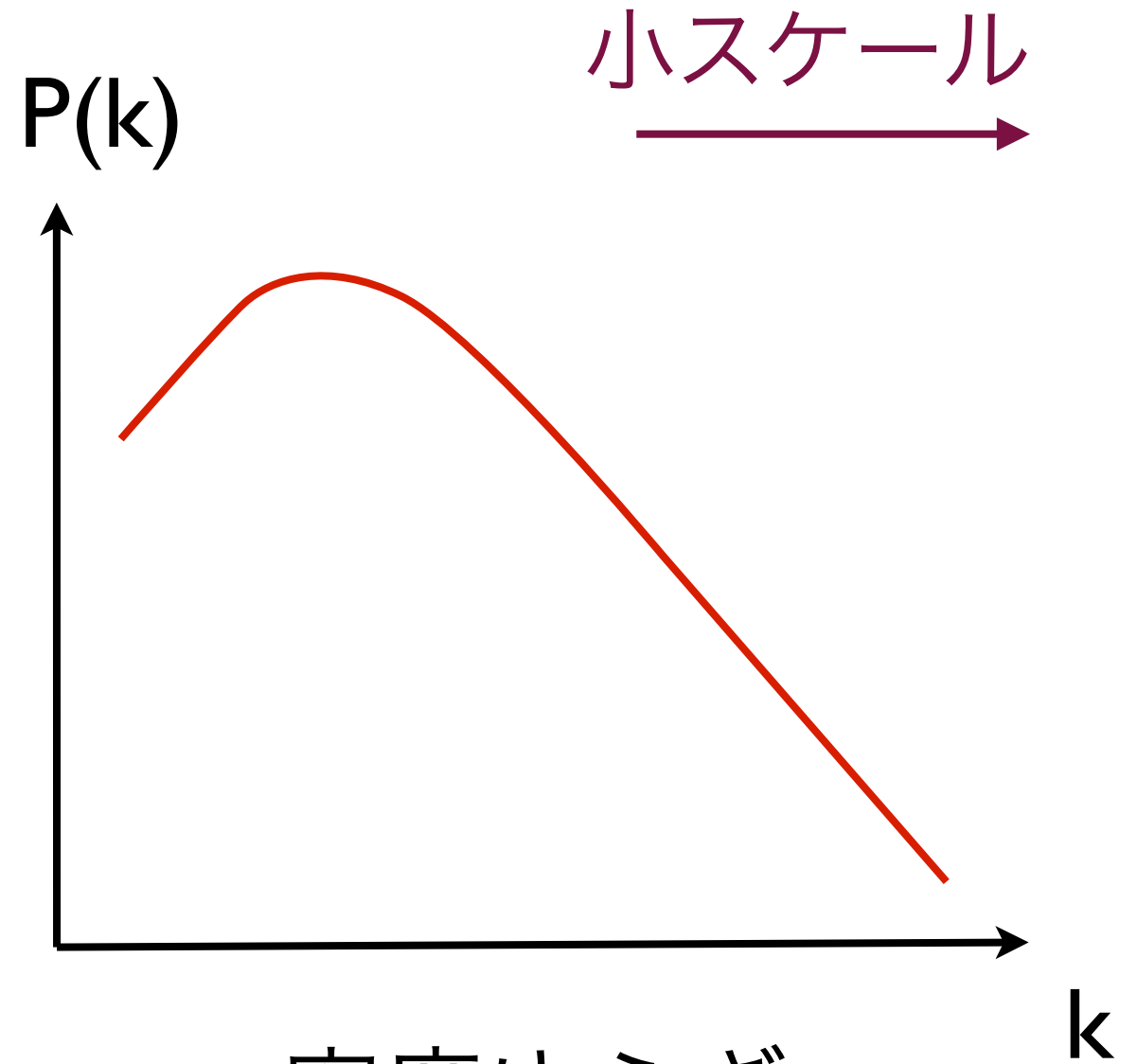
OK!



より小スケールへ



一口一質量関数

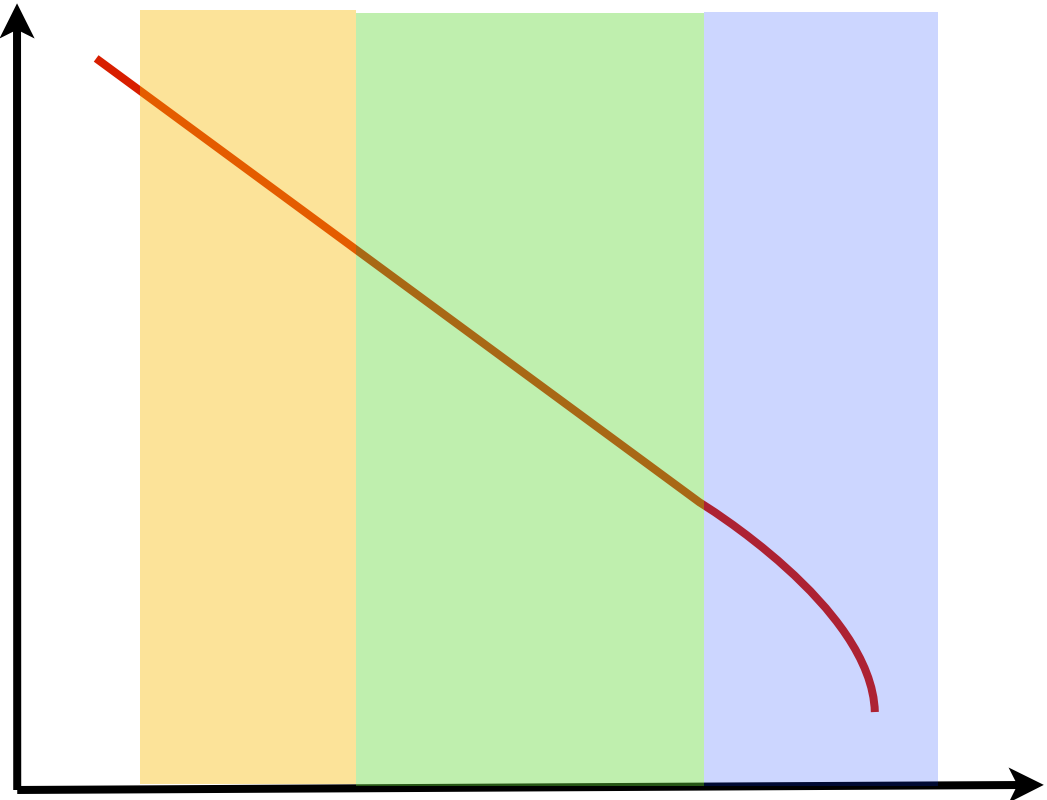


密度ゆらぎ
パワースペクトル

より小スケールへ

dn/dM

小質量

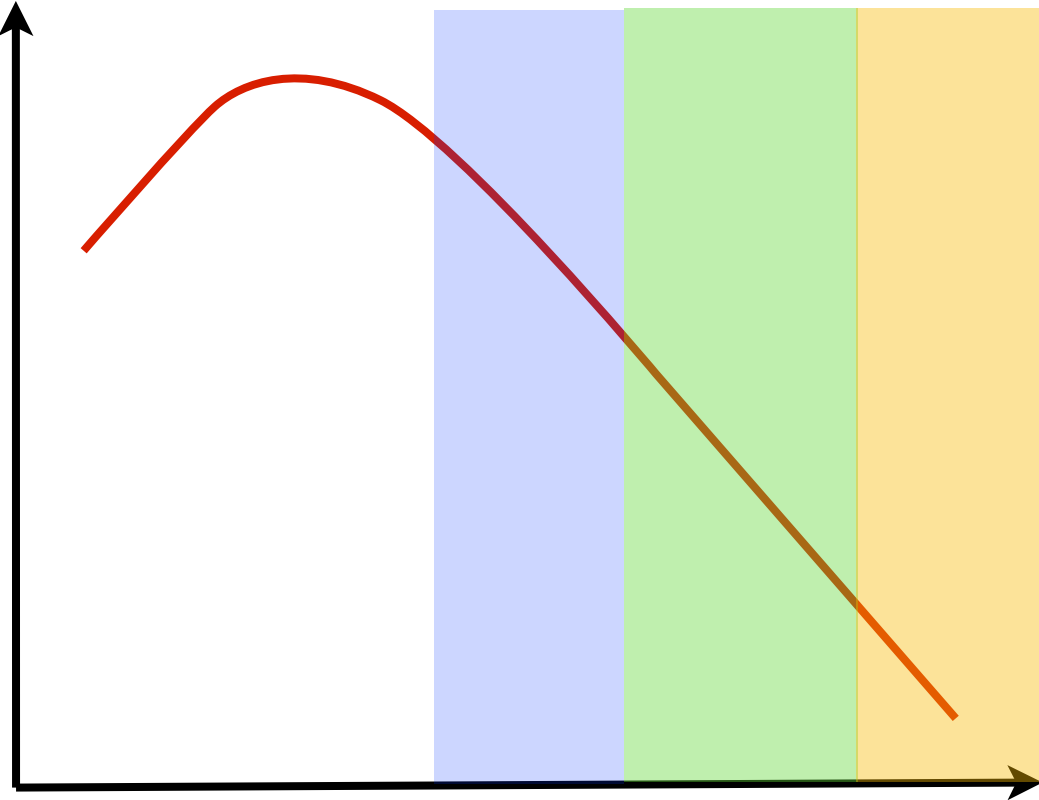


$10^{11}M_{\odot}$ $10^{13}M_{\odot}$ M

矮小銀河 銀河 銀河団

$P(k)$

小スケール



k

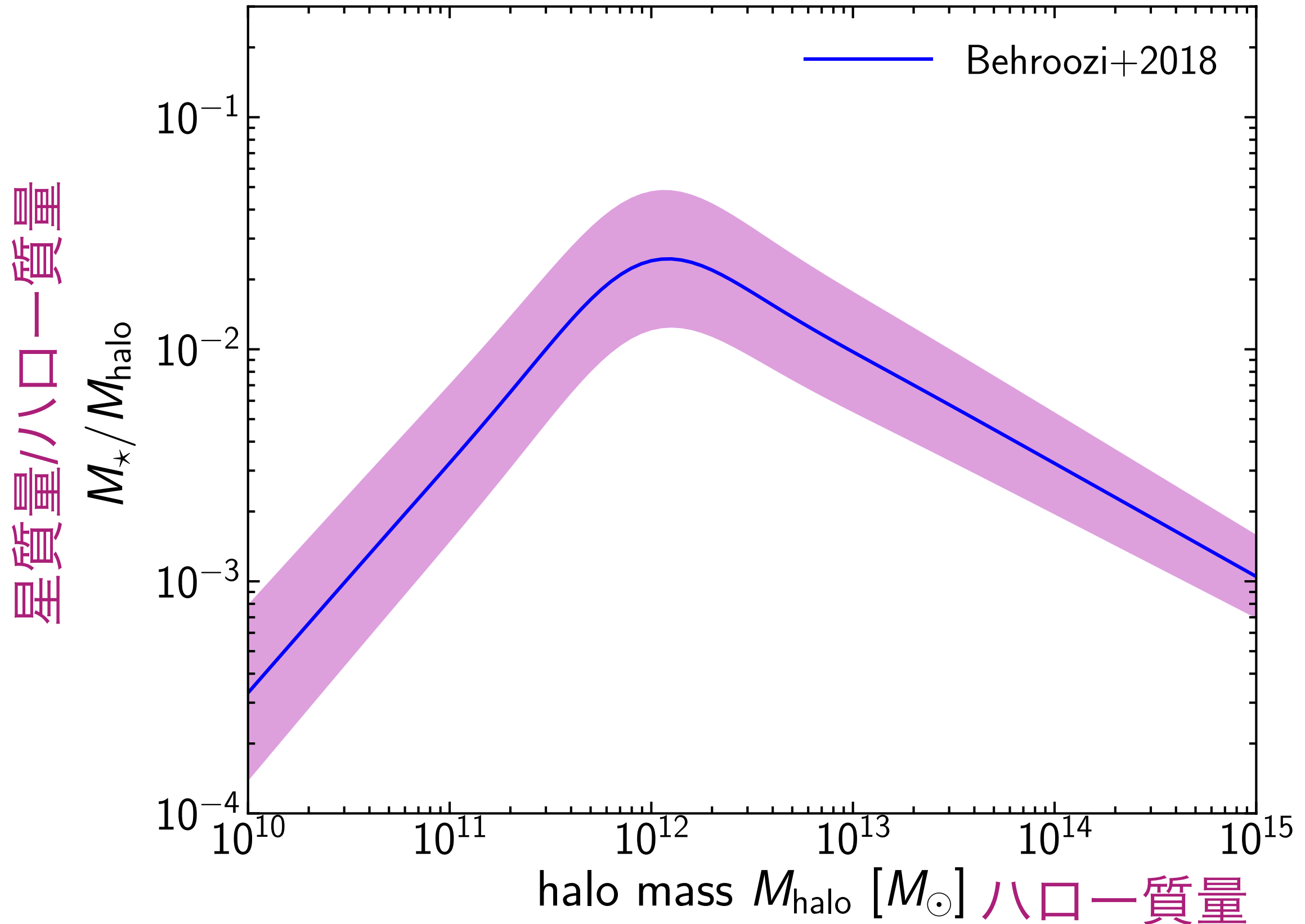
密度ゆらぎ

パワースペクトル

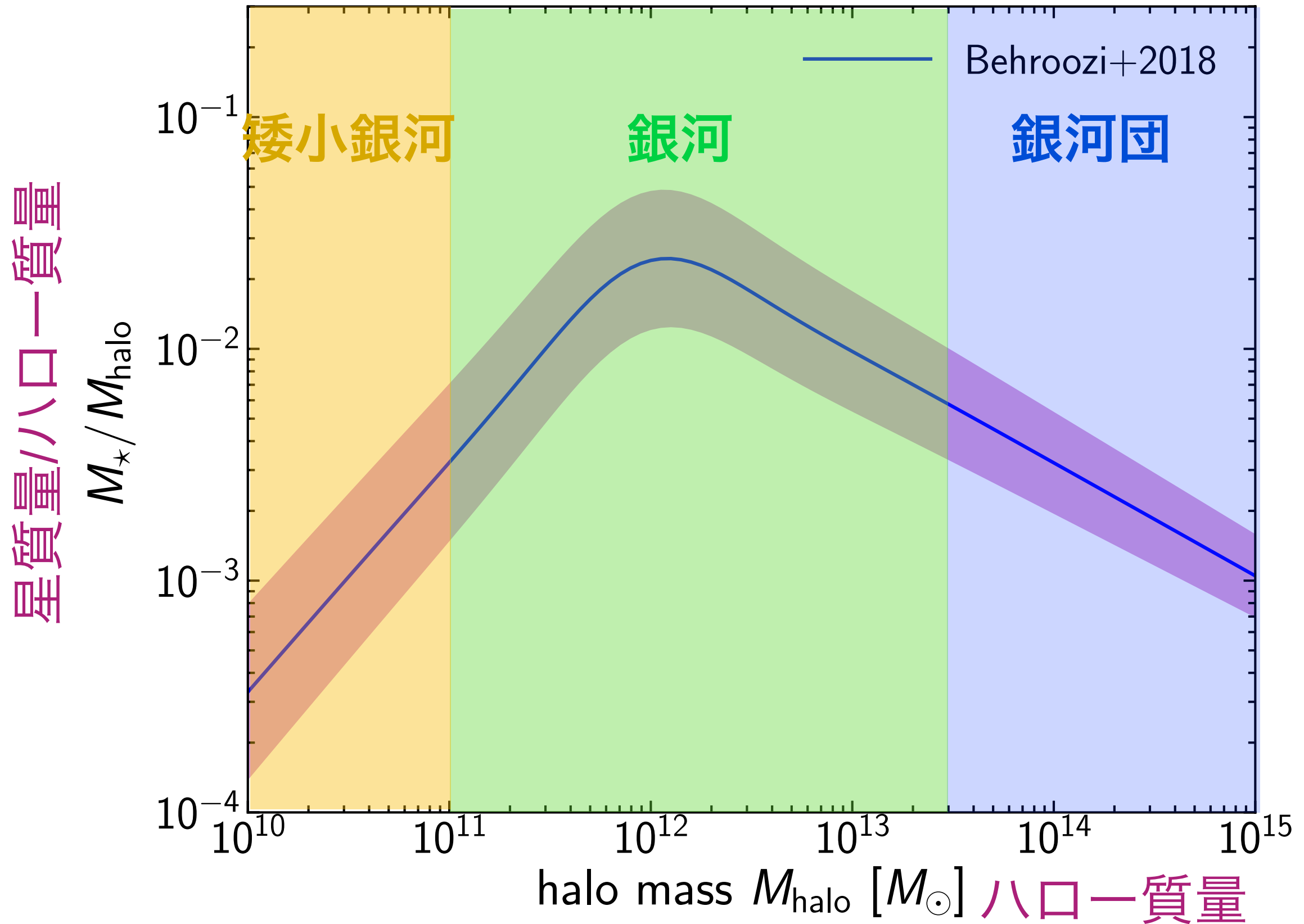
バリオン物理: 銀河 (星) 形成

- ハローの中でガスが冷えて収縮し星を形成、重たい星は超新星爆発でガスをばらまく
- エネルギーの散逸やフィードバックを伴うので分布がダークマターと大きく変わりうる
- ダークマター分布もポテンシャルの変化を介して影響を受ける
- なので重要

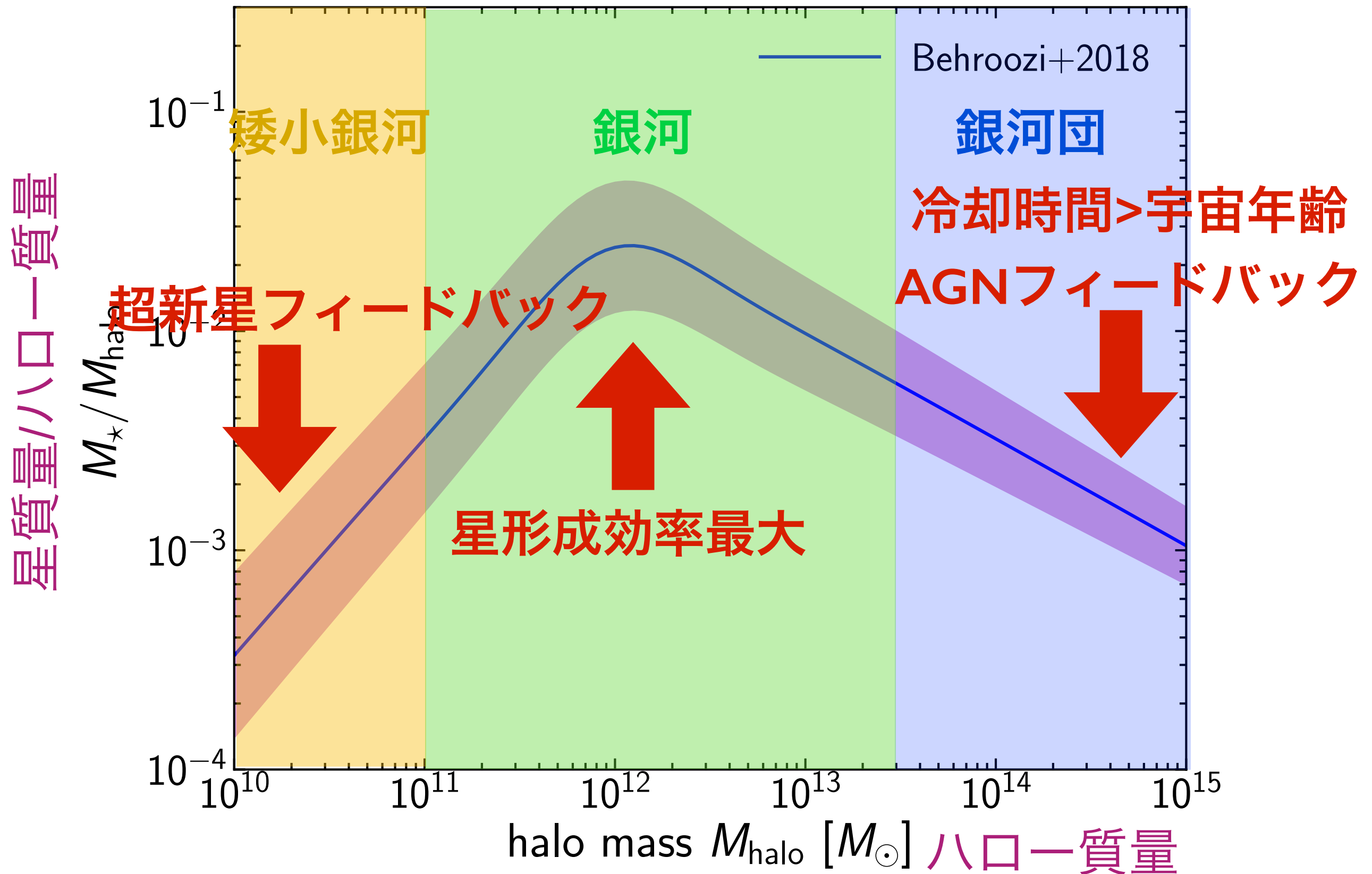
銀河 (星) 形成の効率



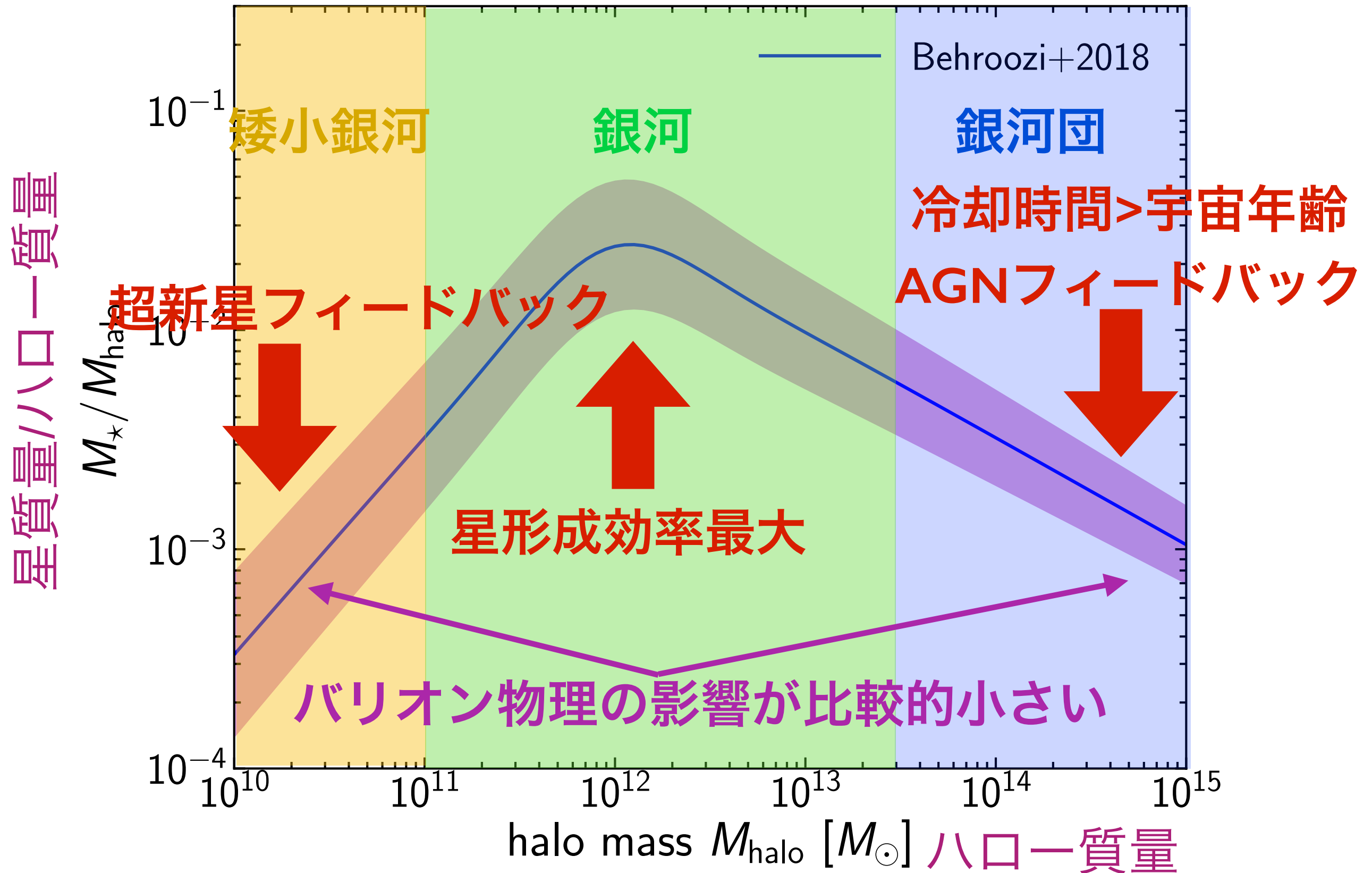
銀河 (星) 形成の効率



銀河 (星) 形成の効率



銀河 (星) 形成の効率



CDMの小スケール問題 (?)

- **missing satellites 問題**

天の川銀河の周りの矮小銀河の数が観測では CDMで期待されるより小さい

- **core/cusp 問題**

矮小銀河のダークマター密度分布NFW的ではなく中心にコアを持つ

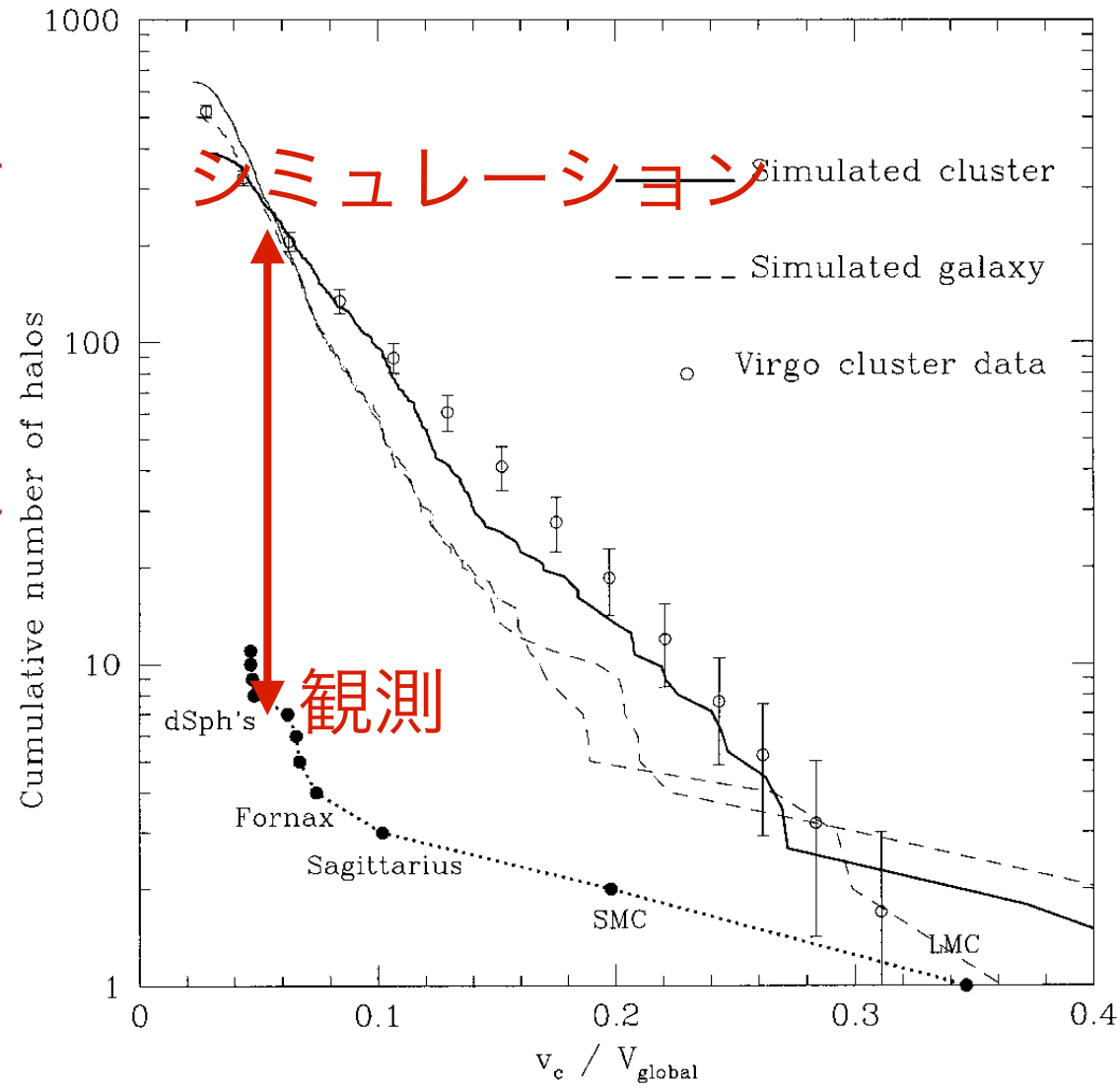
- **too big to fail 問題**

天の川銀河の周りの重い矮小銀河が観測では CDMで期待されるより中心密度が低い

missing satellites 問題

Moore+1999

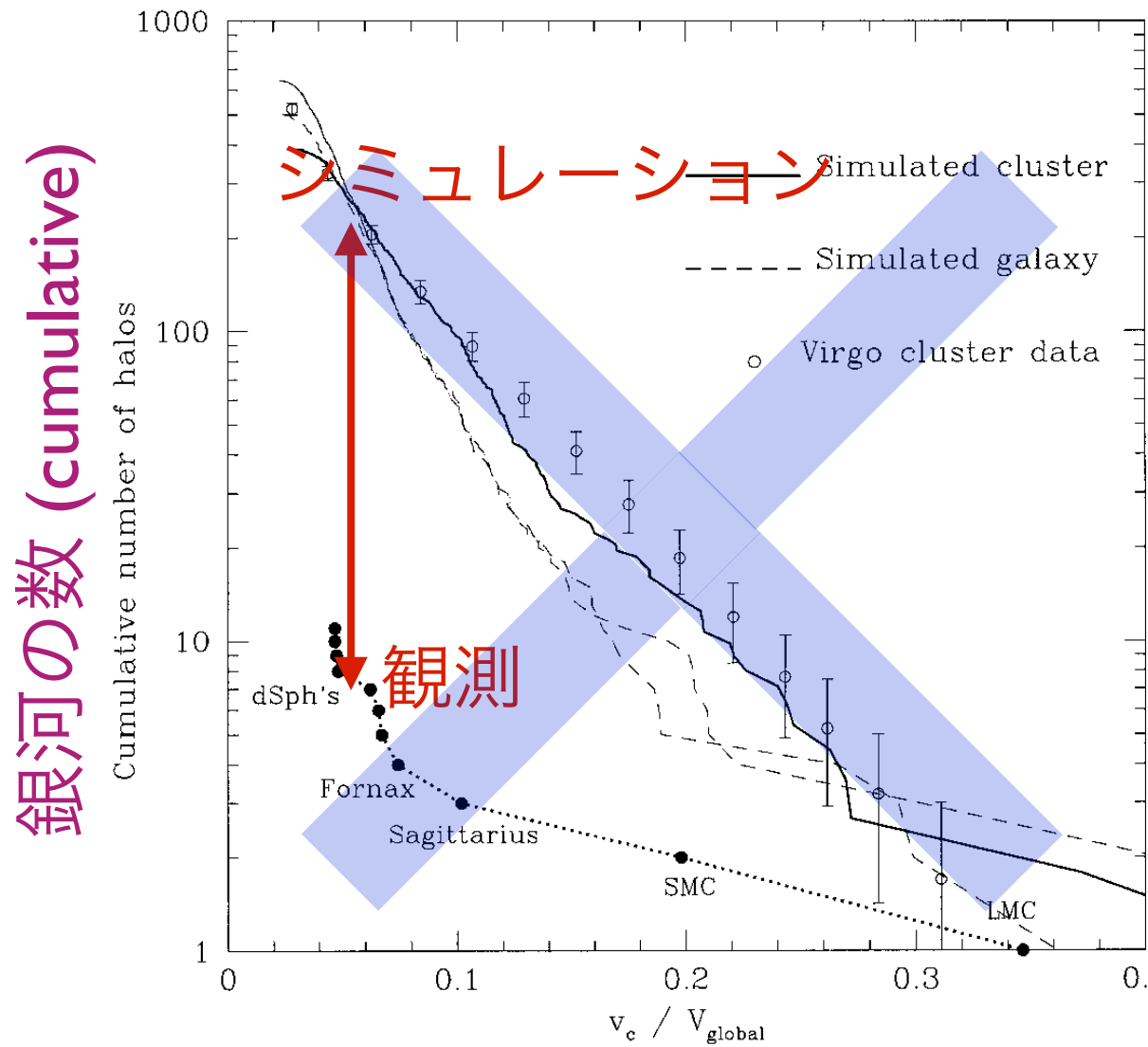
銀河の数 (cumulative)



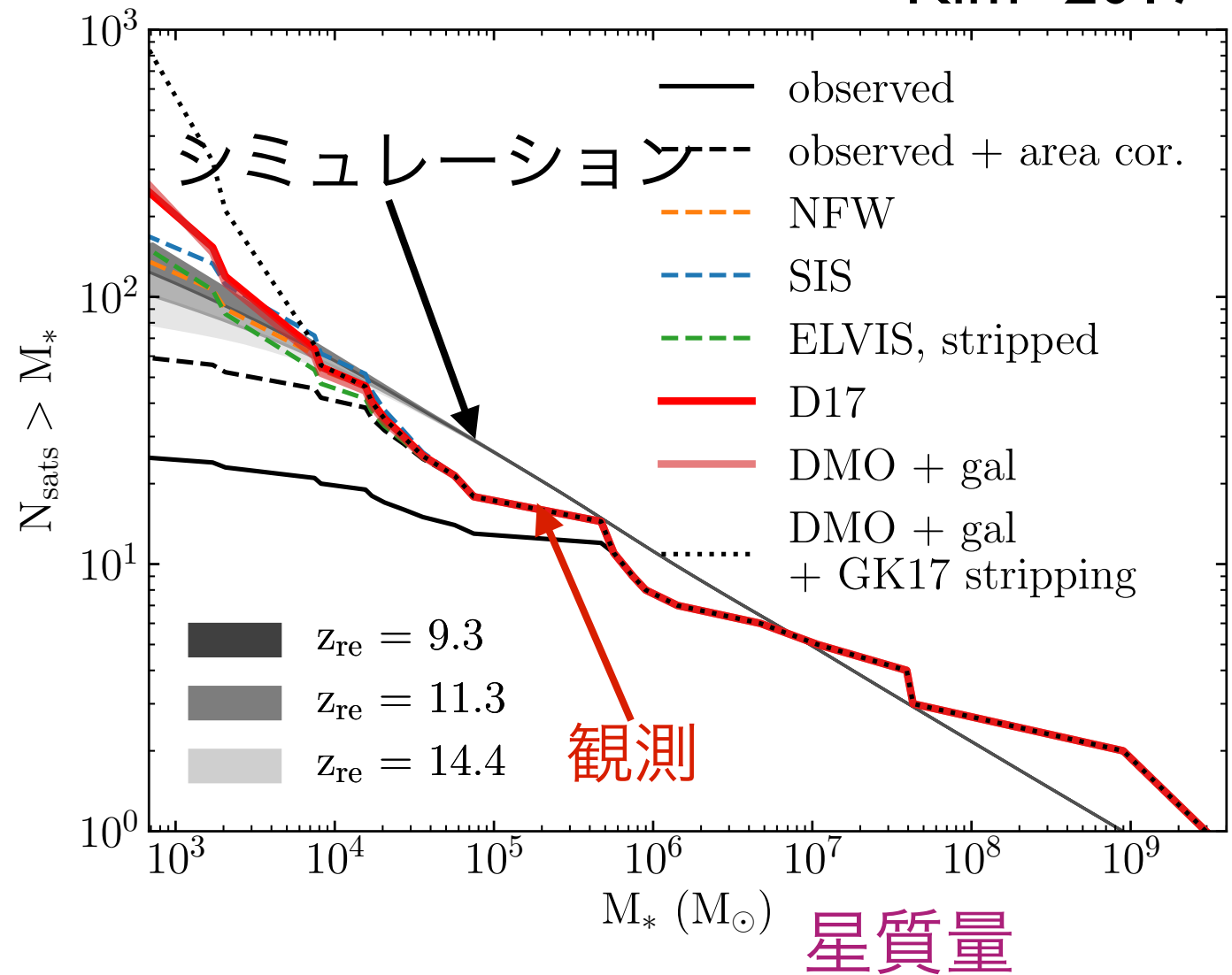
矮小銀河速度 (\approx 質量)

missing satellites 問題

Moore+1999



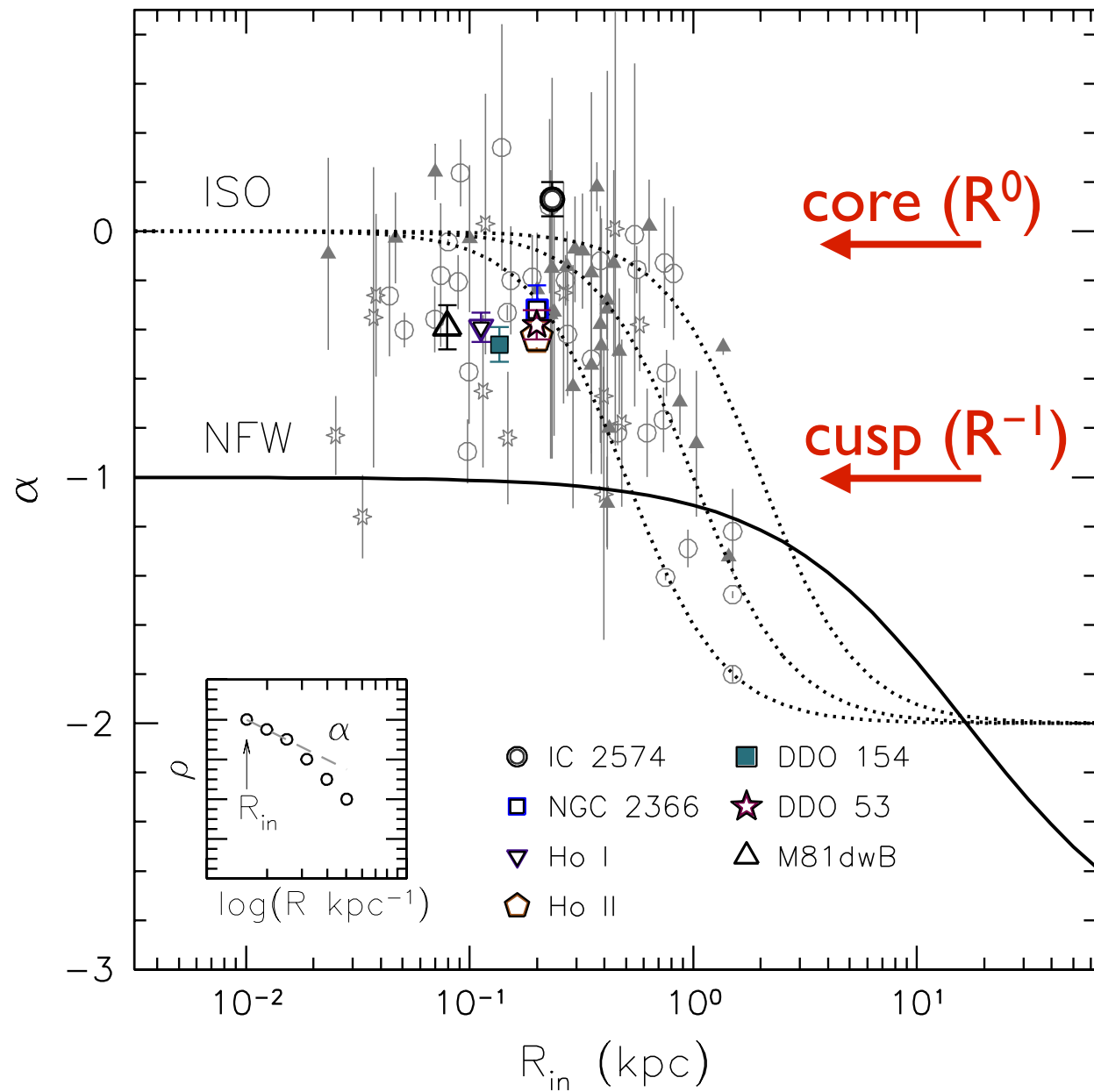
Kim+2017



- 新しい矮小銀河の発見 (SDSS, DES, HSC, ...) および銀河-ハロー対応の理解の進展により **問題ほぼ消失**

core/cusp 問題

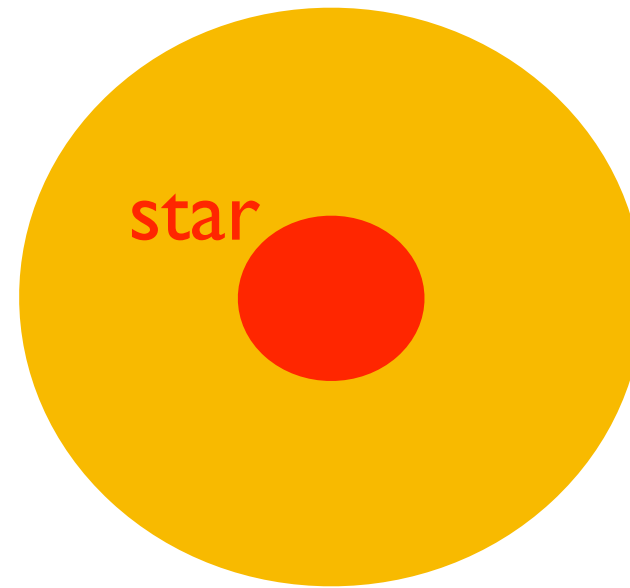
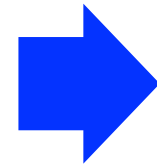
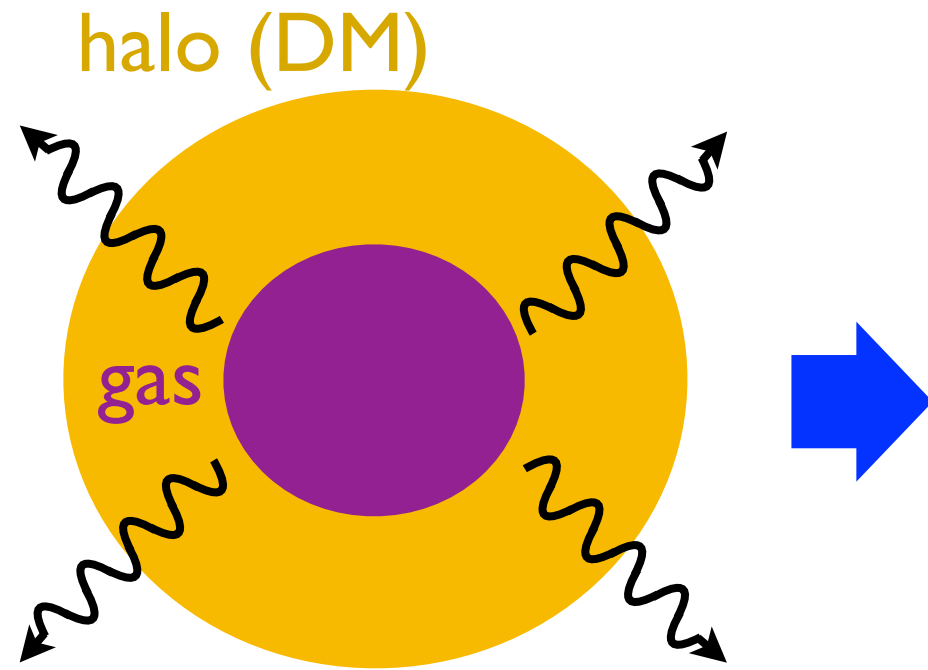
Oh+2011



半径

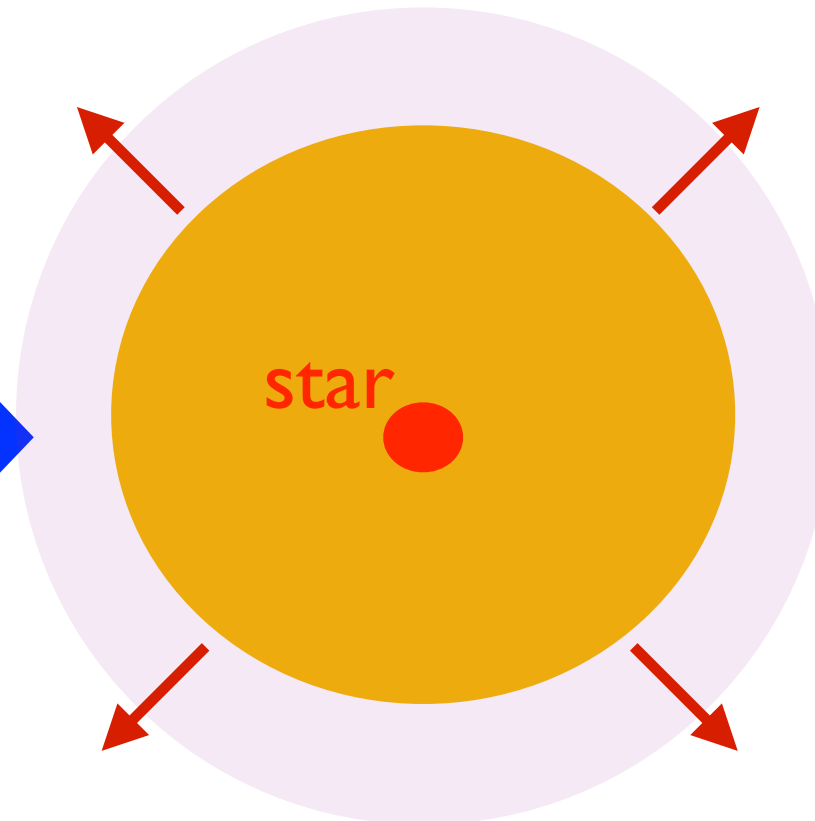
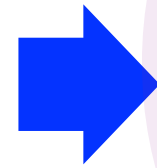
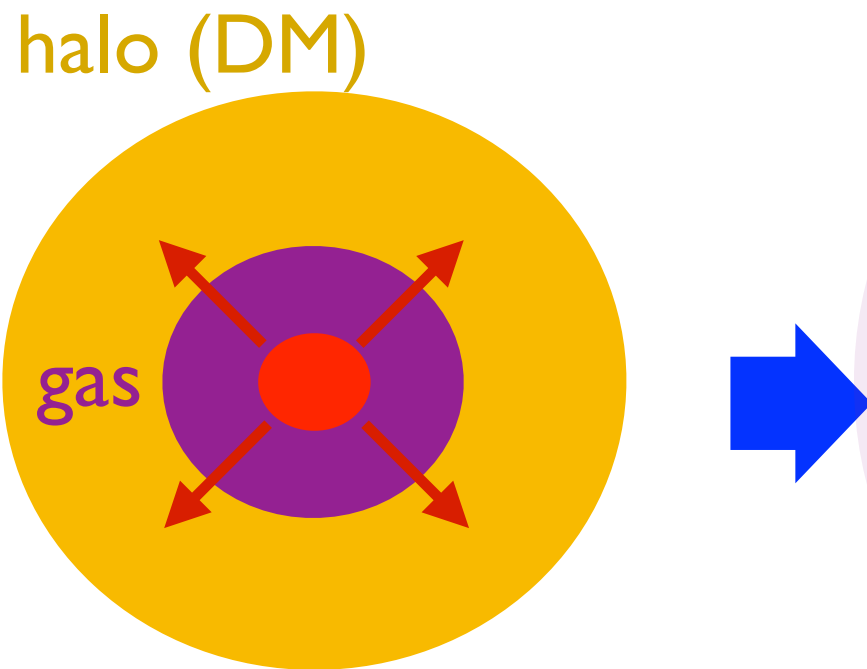
- N体シミュレーションはNFW分布を予言 (中心で $\rho(r) \propto r^{-1}$)
- 観測では矮小銀河のダークマター分布はコア的 (中心で $\rho(r) \propto r^0$)

バリオン物理の影響



ガスは光を放射することによって収縮でき最終的に星を形成

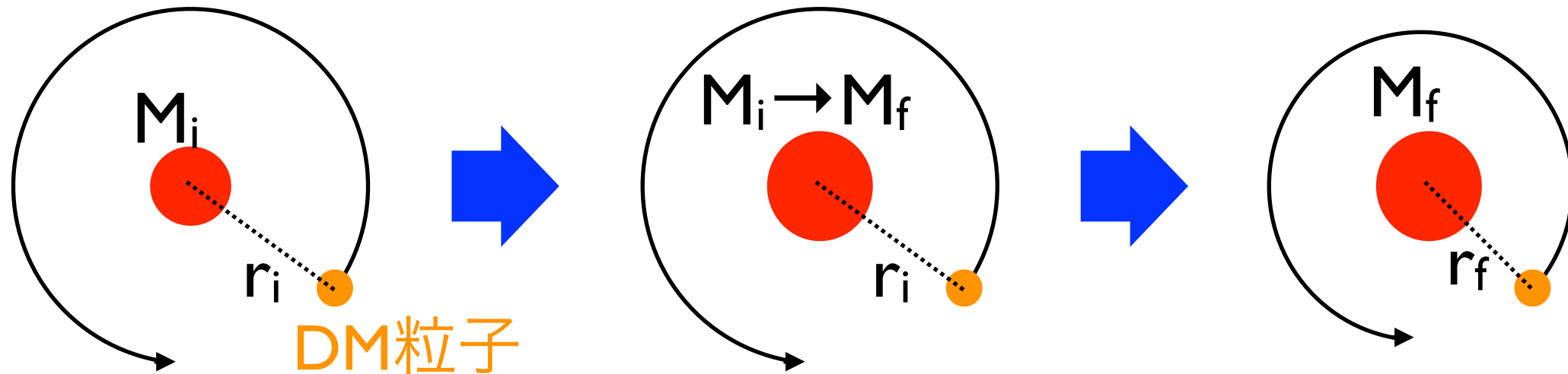
中心密度増加



重たい星は超新星爆発を起こし銀河内のガスを吹き飛ばす

中心密度減少

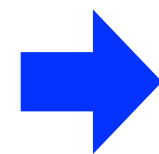
ダークマター分布の力学的反応



- バリオン物理の影響により内側の質量が突然 M_i から M_f に変化した時のDM粒子軌道の変化

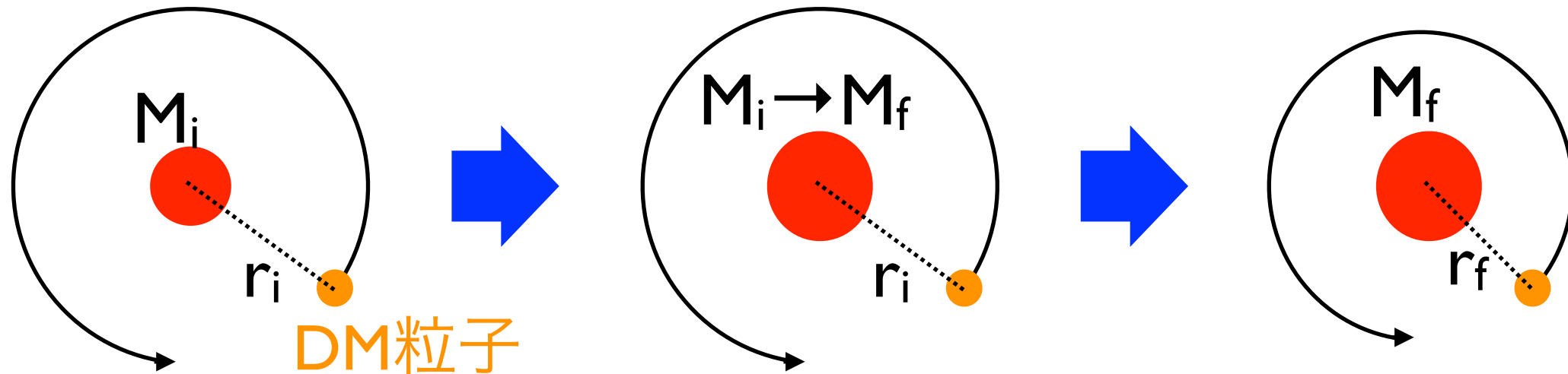
$$\frac{1}{2}v_i^2 - \frac{GM_f}{r_i} = \frac{1}{2}v_f^2 - \frac{GM_f}{r_f}$$

$$v^2 = \frac{GM}{r}$$



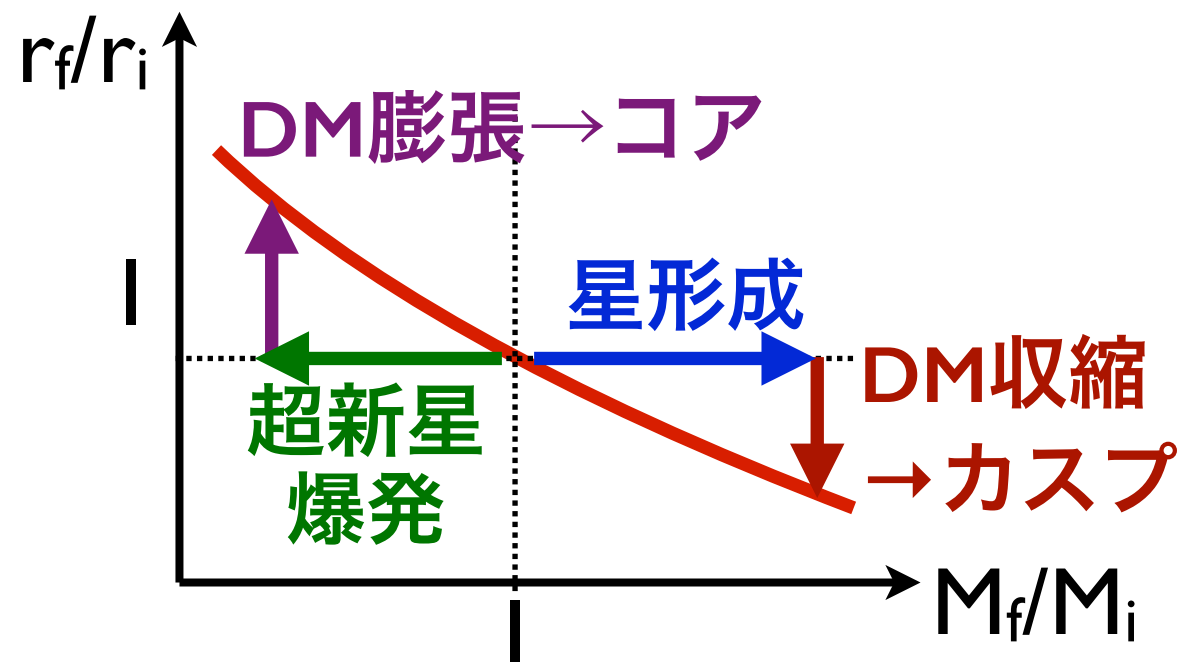
$$\frac{r_f}{r_i} = \frac{M_f/M_i}{2M_f/M_i - 1}$$

ダークマター分布の力学的反応



- バリオン物理の影響により内側の質量が突然 M_i から M_f に変化した時のDM粒子軌道の変化

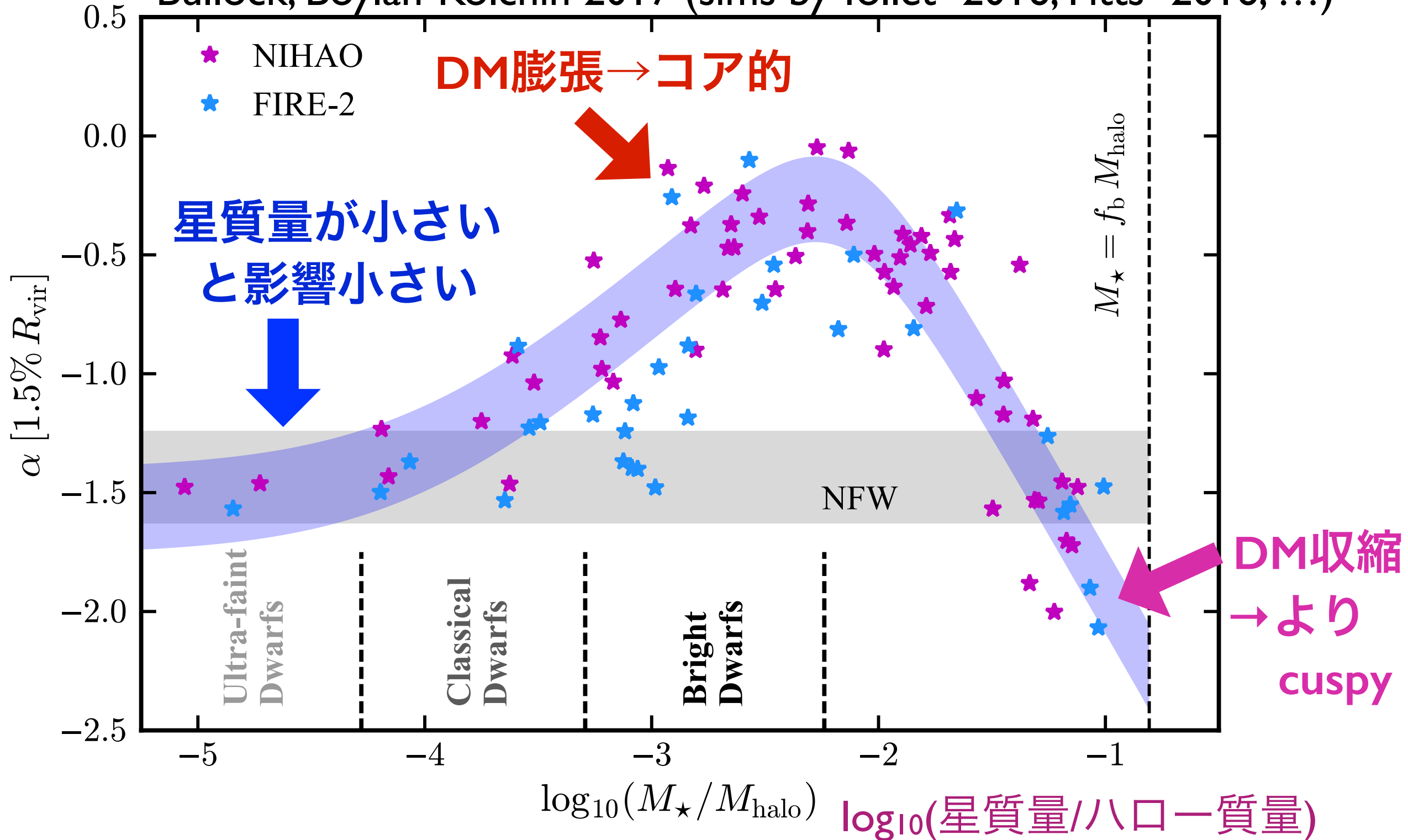
$$\frac{r_f}{r_i} = \frac{M_f / M_i}{2M_f / M_i - 1}$$



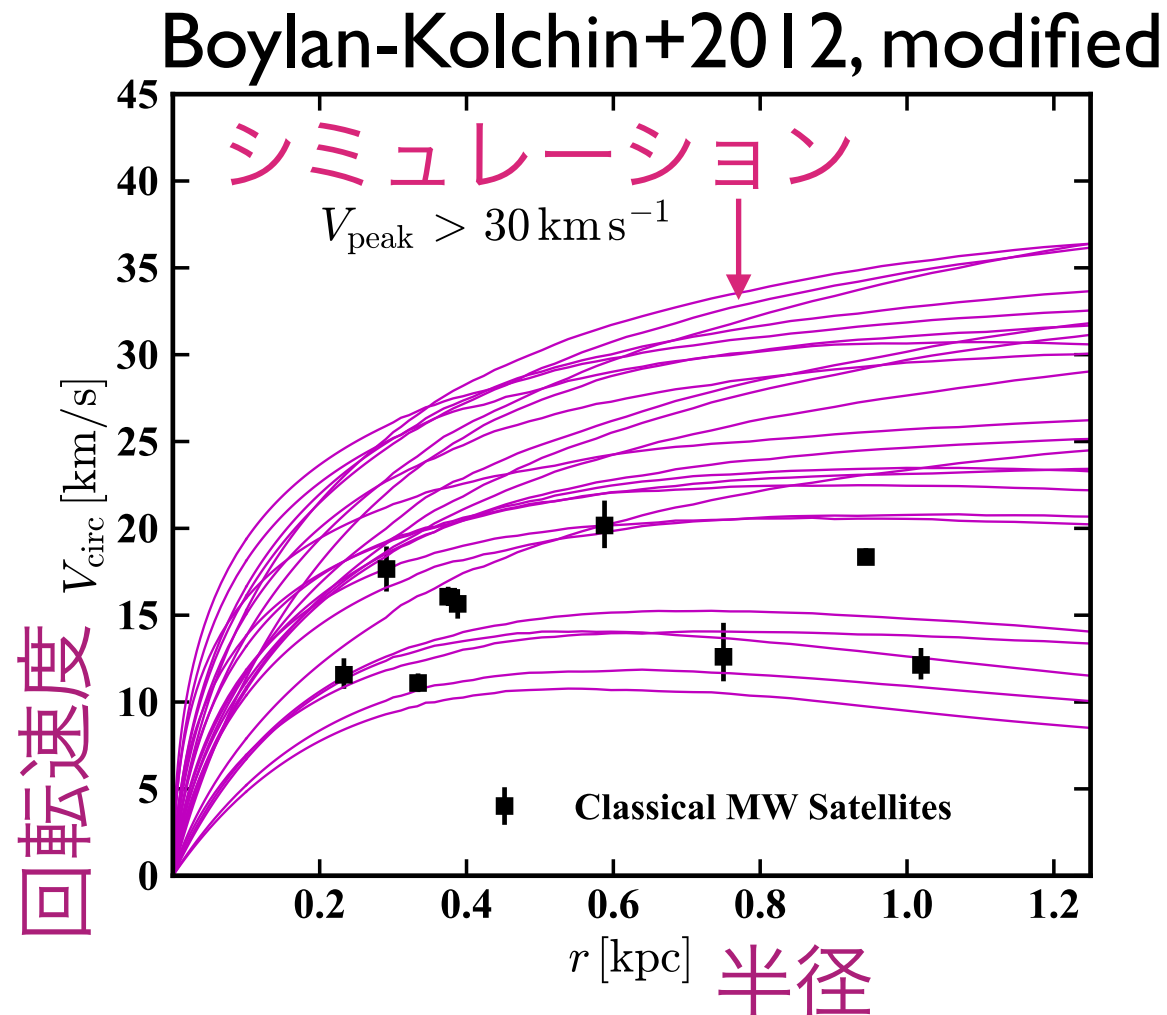
シミュレーション: コア分布を再現

Bullock, Boylan-Kolchin 2017 (sims by Tollet+2016, Fitts+2016, ...)

ダークマター動径密度分布の冪@0.015R_{vir}



too big to fail 問題



天の川銀河内の比較的重めの
矮小銀河の内部構造の問題

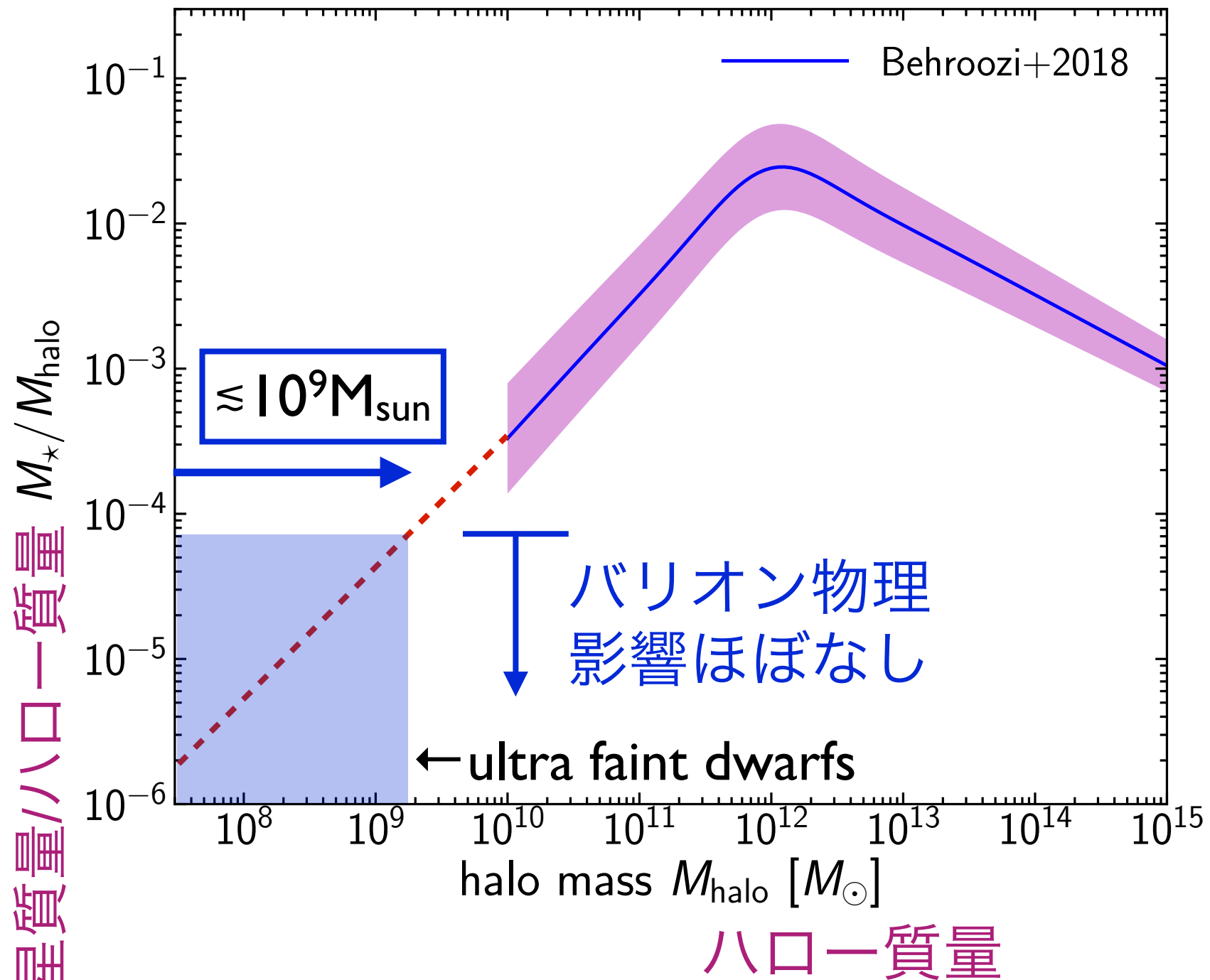
- core/cusp問題と同様にバリオン物理によるDM密度分布変化+天の川銀河との潮汐相互作用で説明できる (e.g., Wetzel+2016)

CDMの小スケール問題 (?) の現状

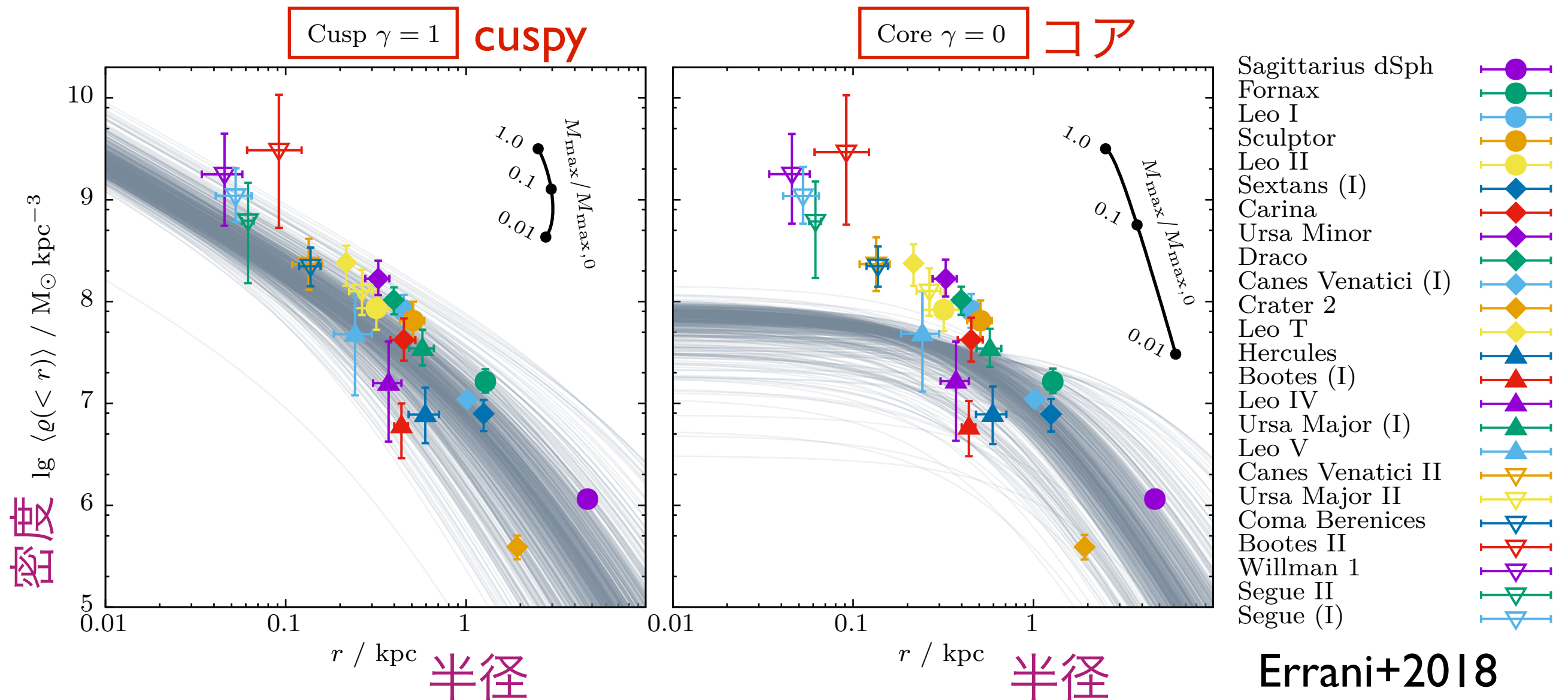
- 観測の進展、銀河形成物理の理解の進展により明確に問題だといえるものはないのが現状
- 一方で、伝統的な無衝突CDM以外の可能性を理論的、観測的に追求することは理解を深める上で依然としてとても重要
- 特に、より小スケールまで詳しく調べることが大切

より小スケールへ

- ハロー質量で $10^9 M_\odot$ 以下まで行けばバリオン物理の影響はかなり小さい
- 星を持たない「ダーク」ハローを検出できれば **CDM理論の強力な検証** (holy grail!)



超低光度矮小銀河 (ultra faint dwarfs)



- 個々の超低光度矮小銀河で密度分布を測るのは困難、ただ統計的にはNFW的な密度分布を支持しているようである (see also e.g., Hayashi, Chiba 2015)

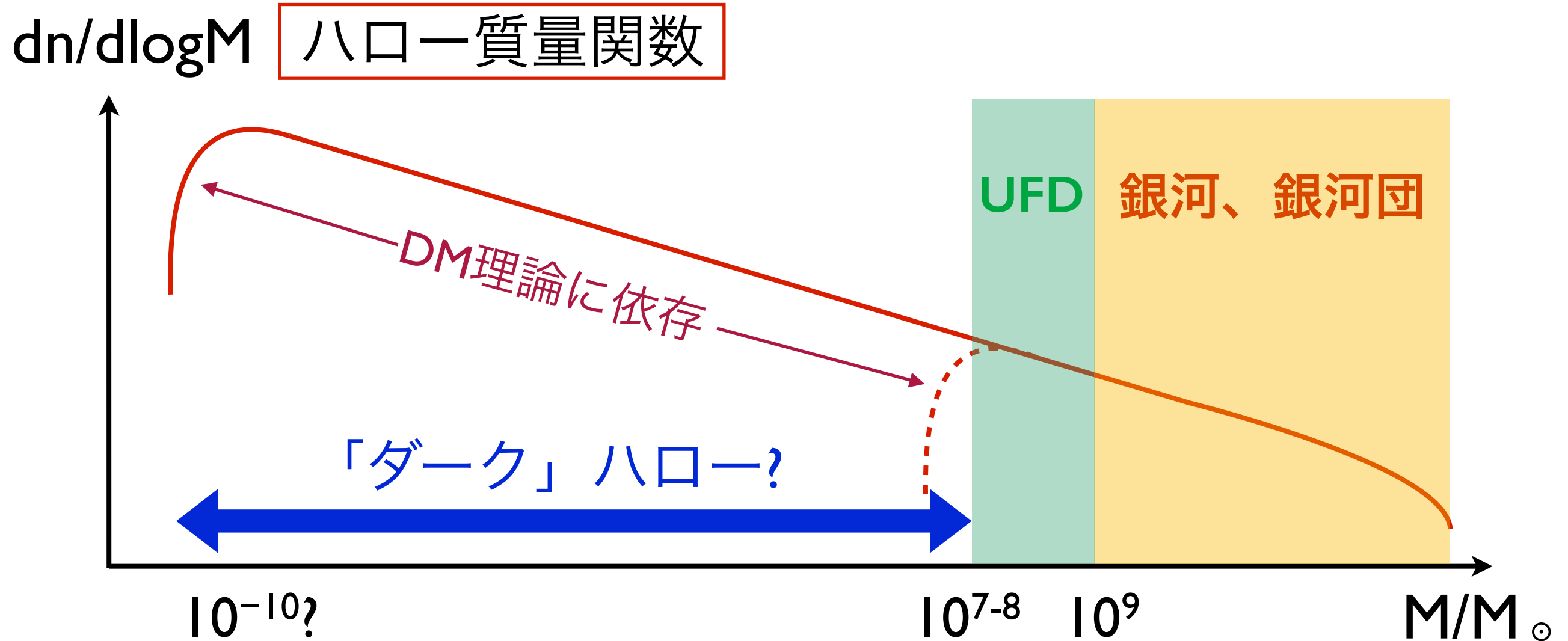
球状星団 (globular cluster)

- $10^6 M_{\odot}$ 程度の星の集団、ダークマターが付随していない (??)
(e.g., Moore 1996; Conroy+2011)
- 力学的摩擦が効いてない (??)
(e.g, Tremaine 1976)
- 原因はきちんと理解されてない、例の小スケール問題より問題？
(fuzzy dark matterを支持？ Hui+2017; Broadhurst, private communication)



wikipedia

「ダーク」ハローの検出に向けて



- CDMでは星なし小質量ハローが大量に存在

CDMの究極の検証 & DM理論の強力なテスト

「ダーク」ハロー検出方法

- **強い重力レンズ**

小ハローにより重力レンズ像の位置や明るさが摂動を受ける

- **潮汐ストリーム**

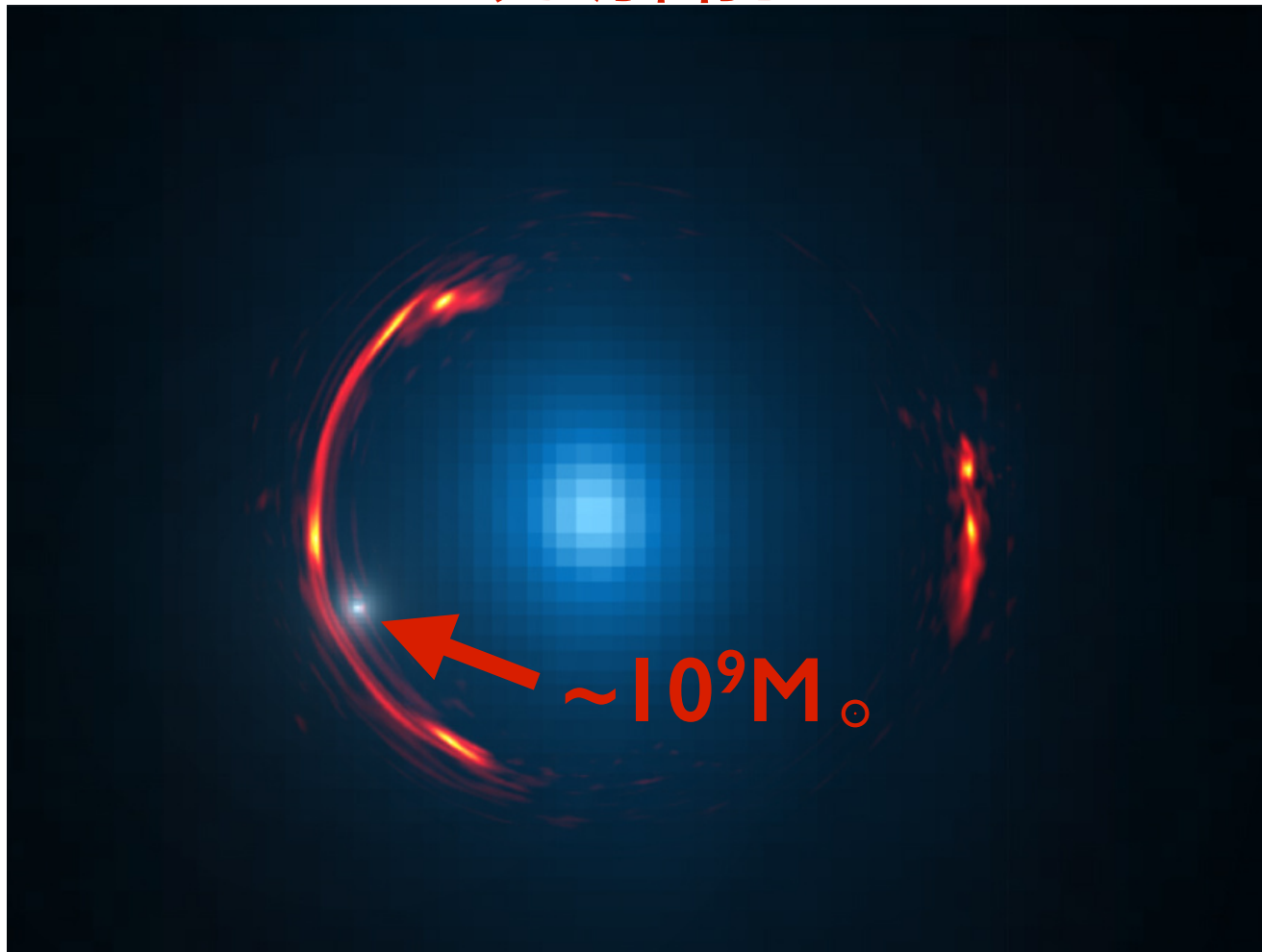
銀河内で潮汐相互作用で破壊された星団などのストリームが小ハローにより摂動をうける

- **その他?**

PTAによる小ハロー接近検出 (Kashiyama, MO 2018)

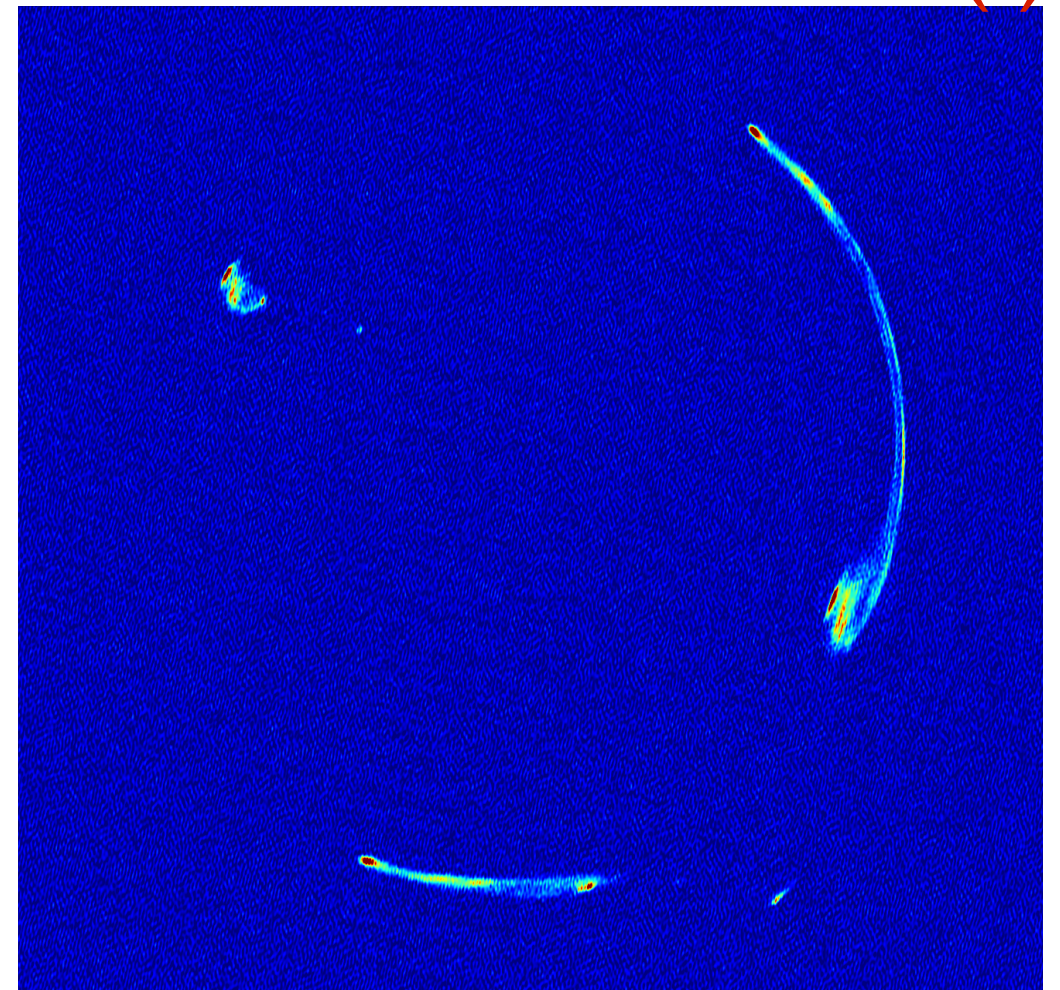
強い重力レンズ

ALMA: 分解能30mas



Hezaveh+2016 (see also Inoue+2016)

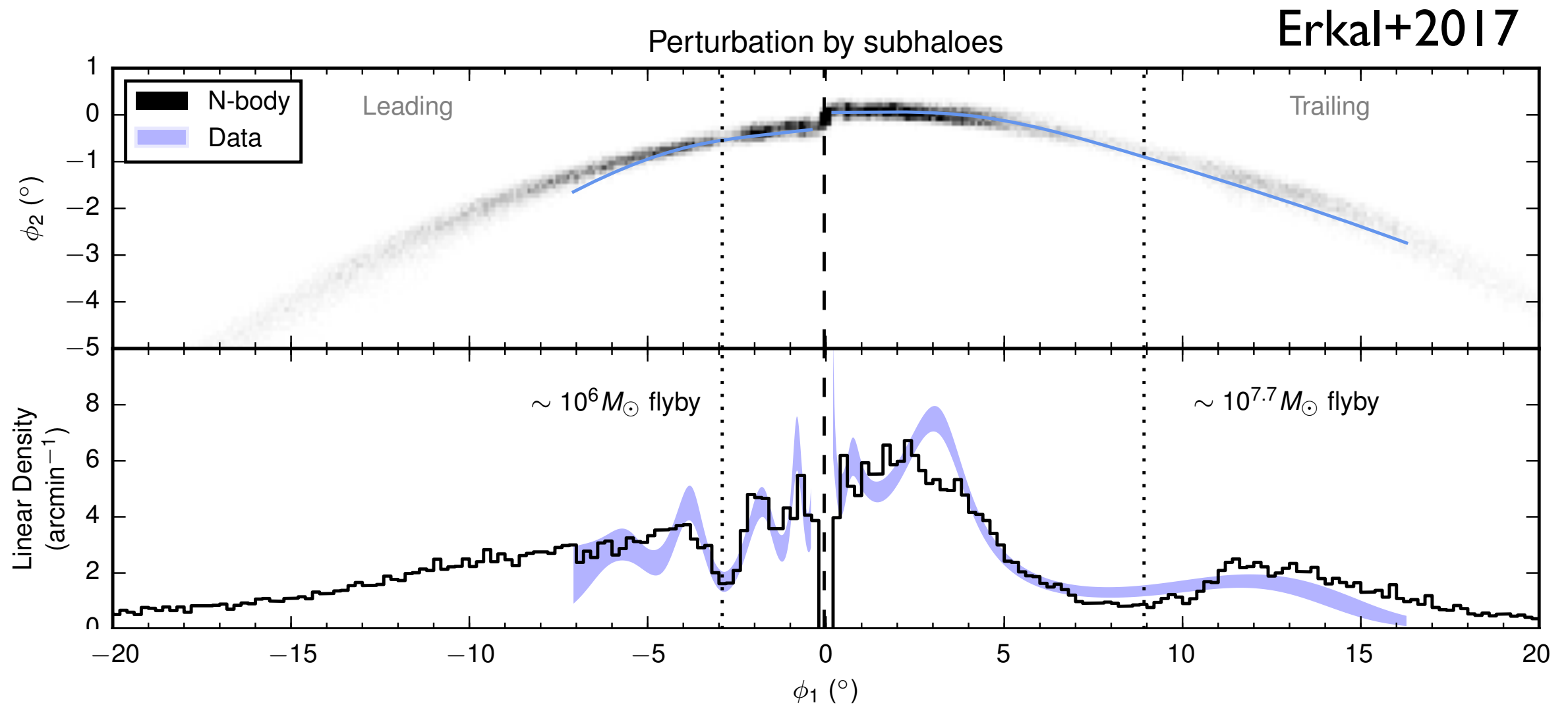
VLBI: 分解能0.04mas (!)



Spingola+2018

- 現在 10^8 - $10^9 M_{\odot}$ 、近い将来 $10^6 M_{\odot}$ のハローまで検出
および数密度の制限ができる

天の川銀河内の潮汐ストリーム

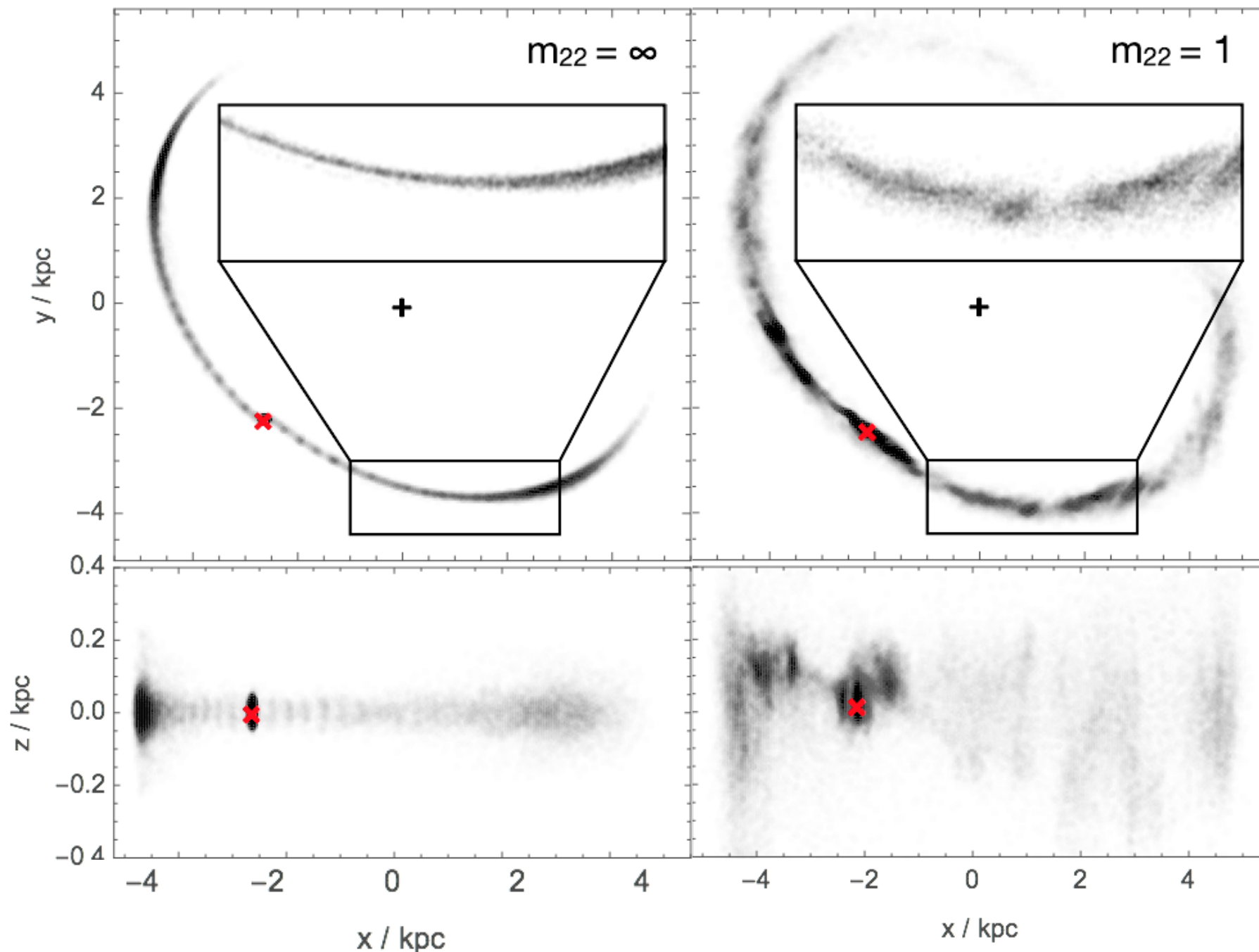


- ギャップによって $\sim 10^6 M_\odot$ のハローを検出できる!
- 他の可能性 (バー回転, GMC, ...) もあるので注意

天の川銀河内の潮汐ストリーム

CDM

boson 10^{-22}eV

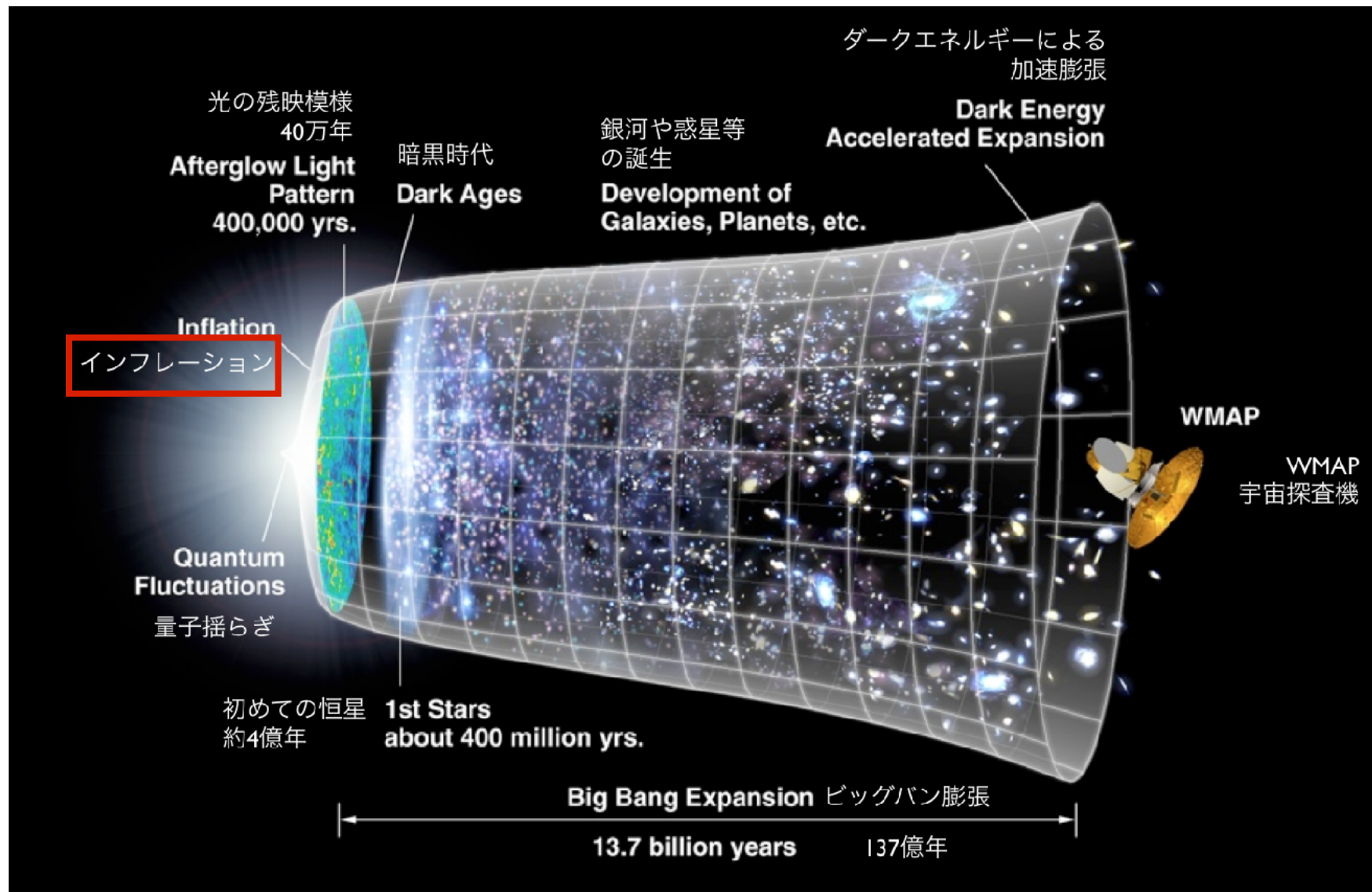


- DMが軽いボゾンだと対応する特徴的なスケールでおおきなゆらぎ
- ストリームを力学的に温めて太くする
- 暫定的制限
 $m > 1.5 \times 10^{-22} \text{eV}$

ダークマターは素粒子か？

- 何らかの素粒子を仮定した直接、間接検出実験は今のところ成果なし
- ひょっとしたら素粒子ではない？
- 他の可能性として (原始) ブラックホールも検討されている

原始ブラックホール (PBH)



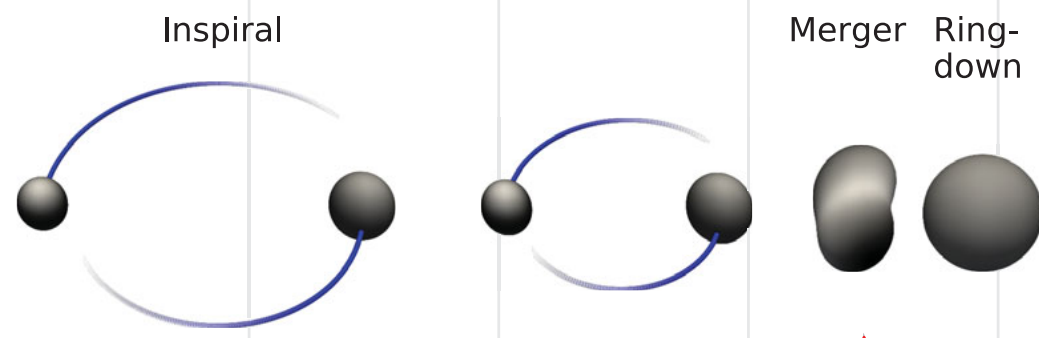
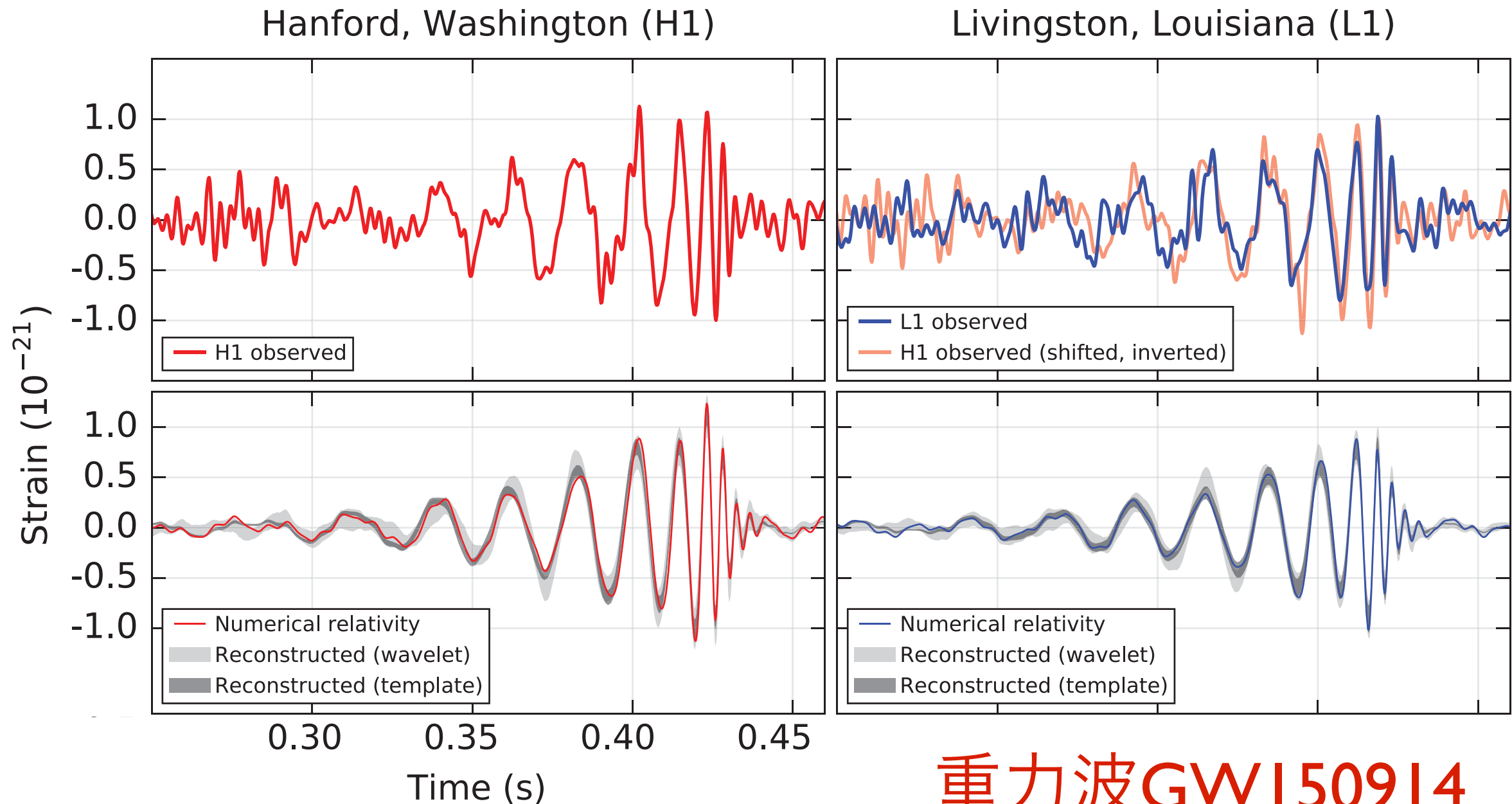
- インフレーション中に作られた大きなゆらぎが重力崩壊しブラックホール生成 (モデルによる)

2016年2月11日



Saul Loeb/Getty Images

重力波ついに発見!

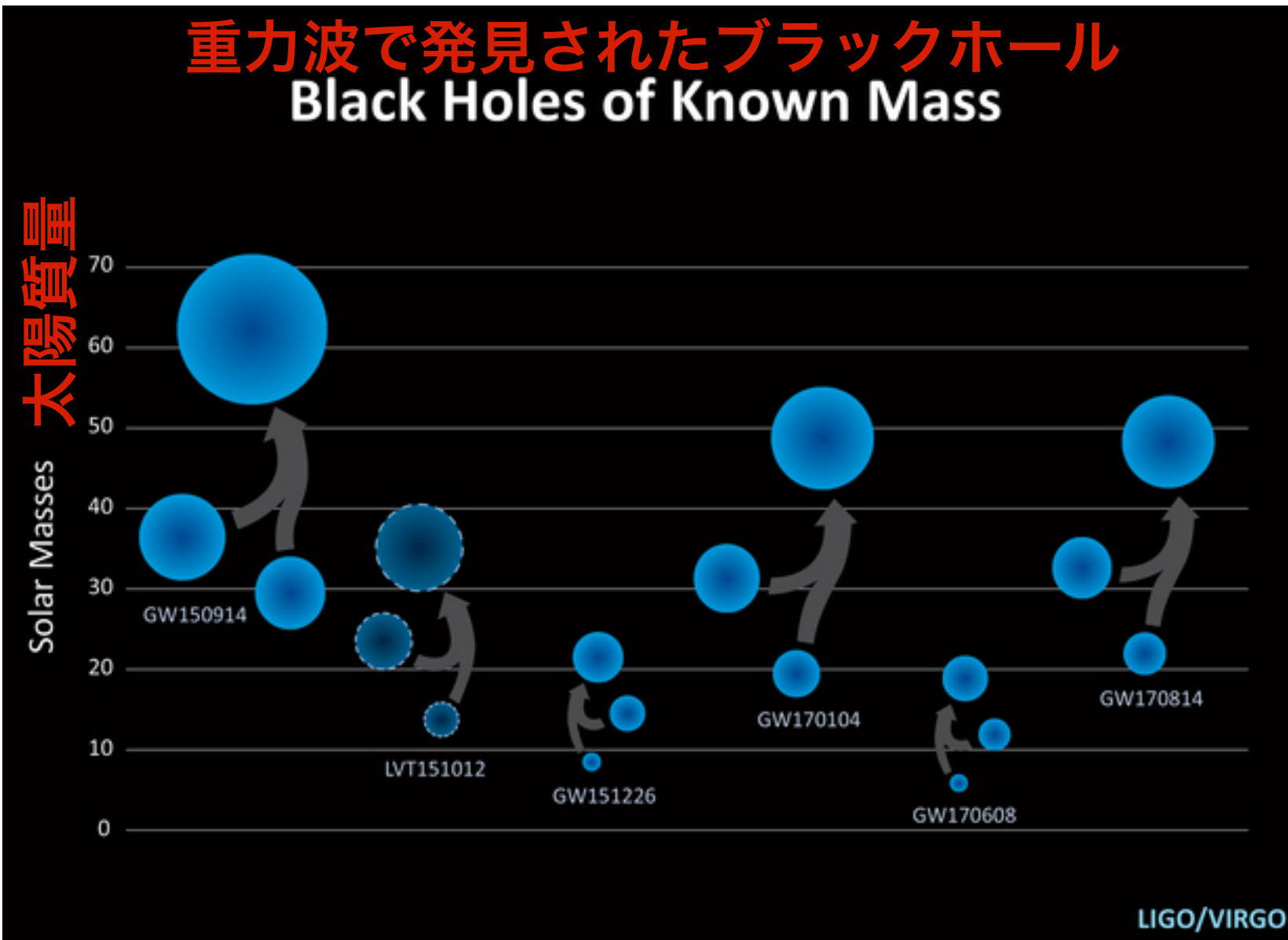


重力波GW150914

~30M_☉の質量の
ブラックホール合体

LIGOによる重力波発見

重力波で発見されたブラックホール Black Holes of Known Mass



- ~30M。BHが思ったよりたくさん存在
- その起源は不明
- もしかしてPBH?
(Bird+ 2016;
Sasaki+ 2016)

<https://www.ligo.caltech.edu>

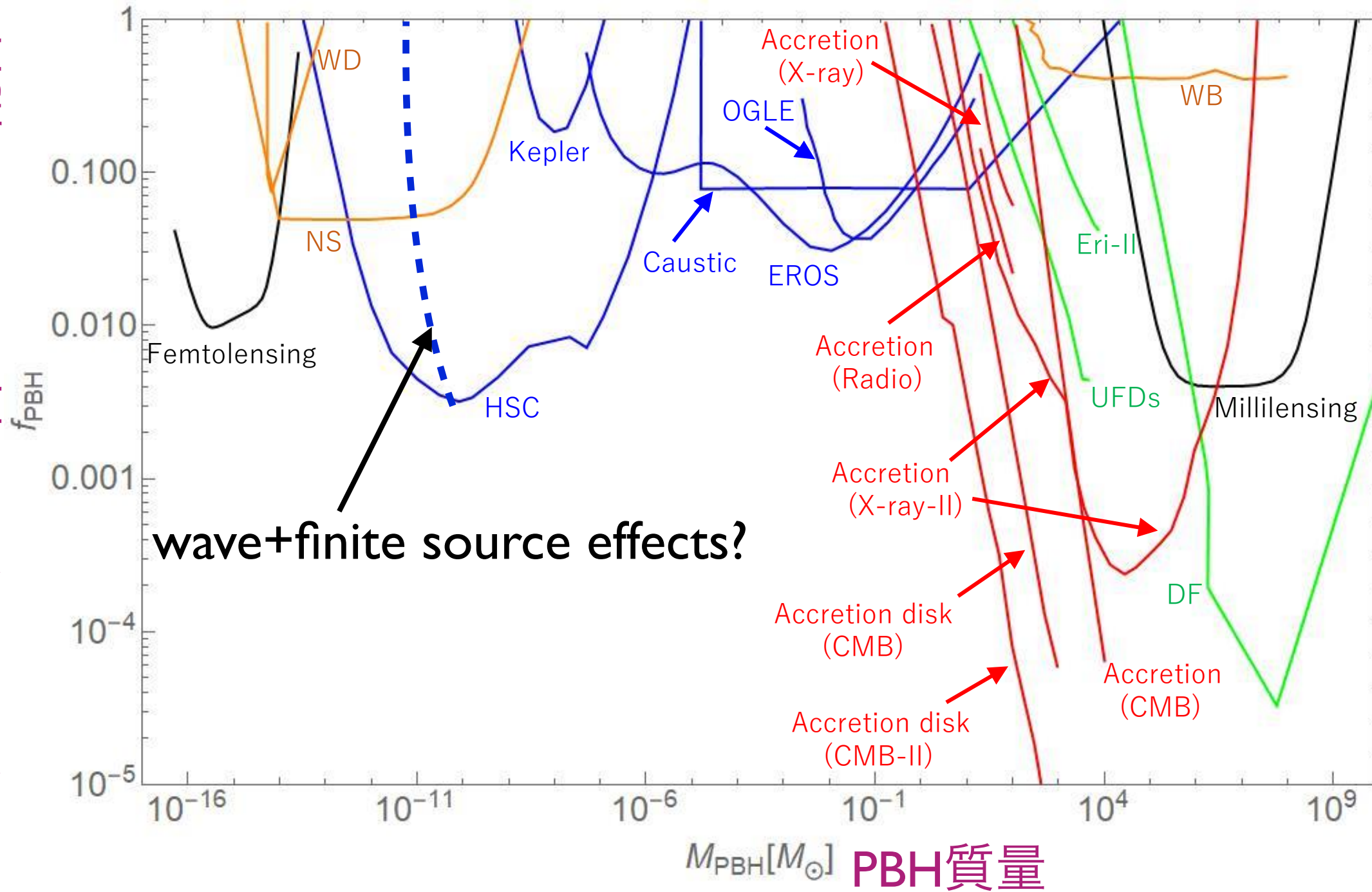
ダークマター=ブラックホール説が脚光をあびる

PBHの観測的制限

- **重力マイクロレンズ (microlensing)**
遠方天体の手前をPBHが通過した際の増光からPBHを検出
- **ホーキング放射**
軽いPBHは蒸発し高エネルギー光子を放出
- **宇宙背景放射**
PBH周りの高温ガスがCMBをゆがめる
- **その他、動力学的制限など**

観測的制限 (存在量の上限) の現状

ダークマターに占めるPBHの割合

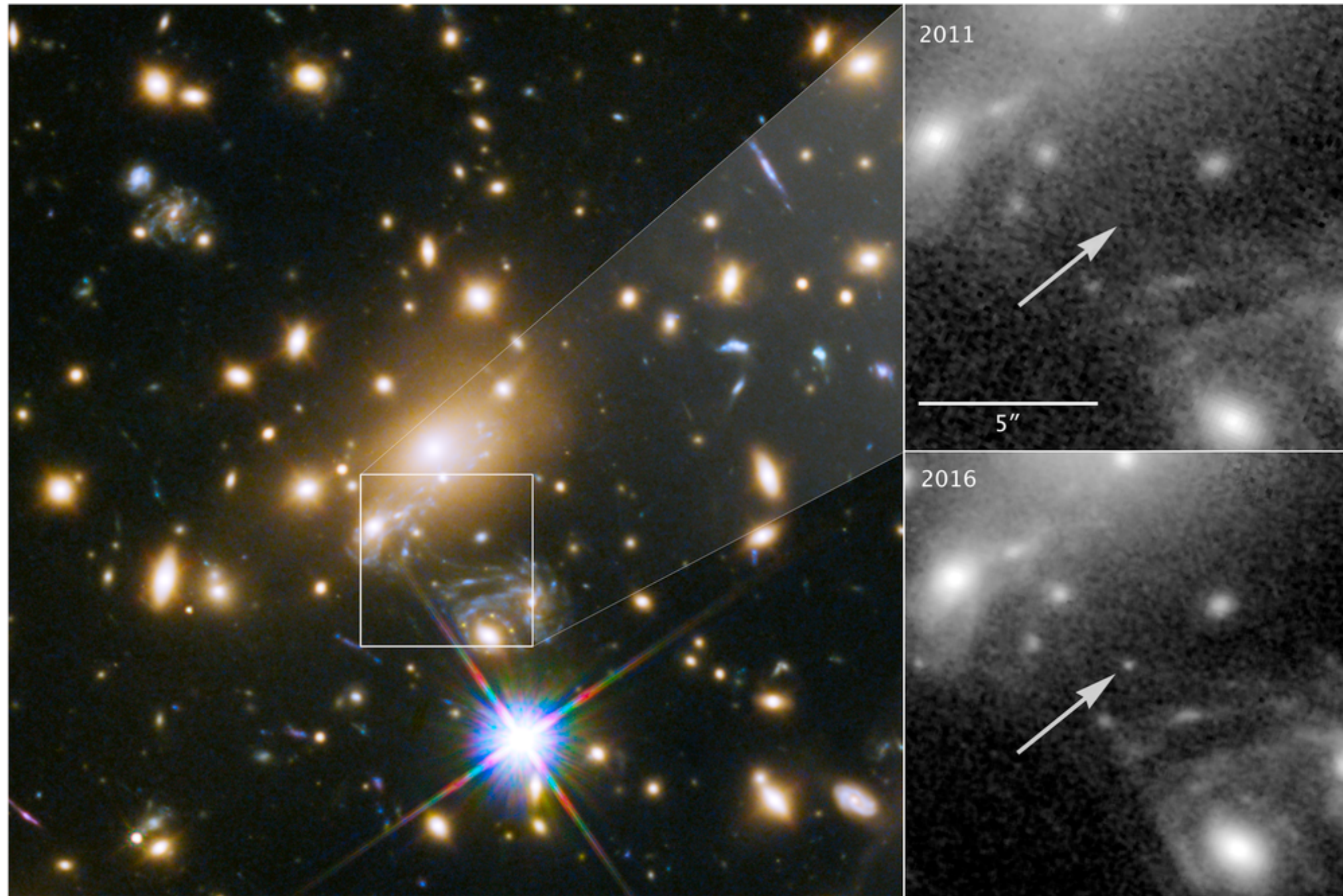


重カレンズ
 NSWWD破壊
 ガス降着
 銀河動力学

Sasaki+2018

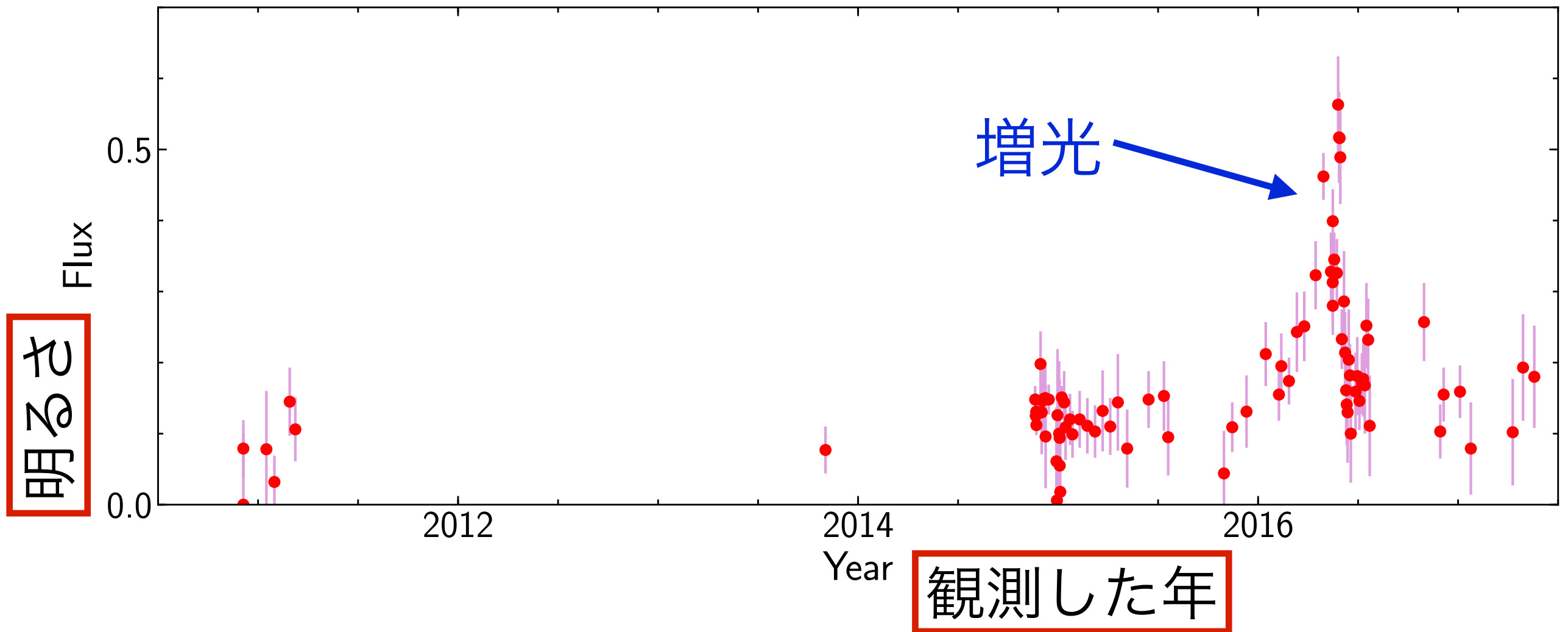
- ほとんどのPBH質量で $f_{\text{PBH}}=1$ が棄却されている
 (window around $\sim 10^{-13} - 10^{-12} M_{\odot}$?)

最遠方の単独の星 「イカロス」 の発見



- $z=1.5$ の単独の星のマイクロレンズ増光

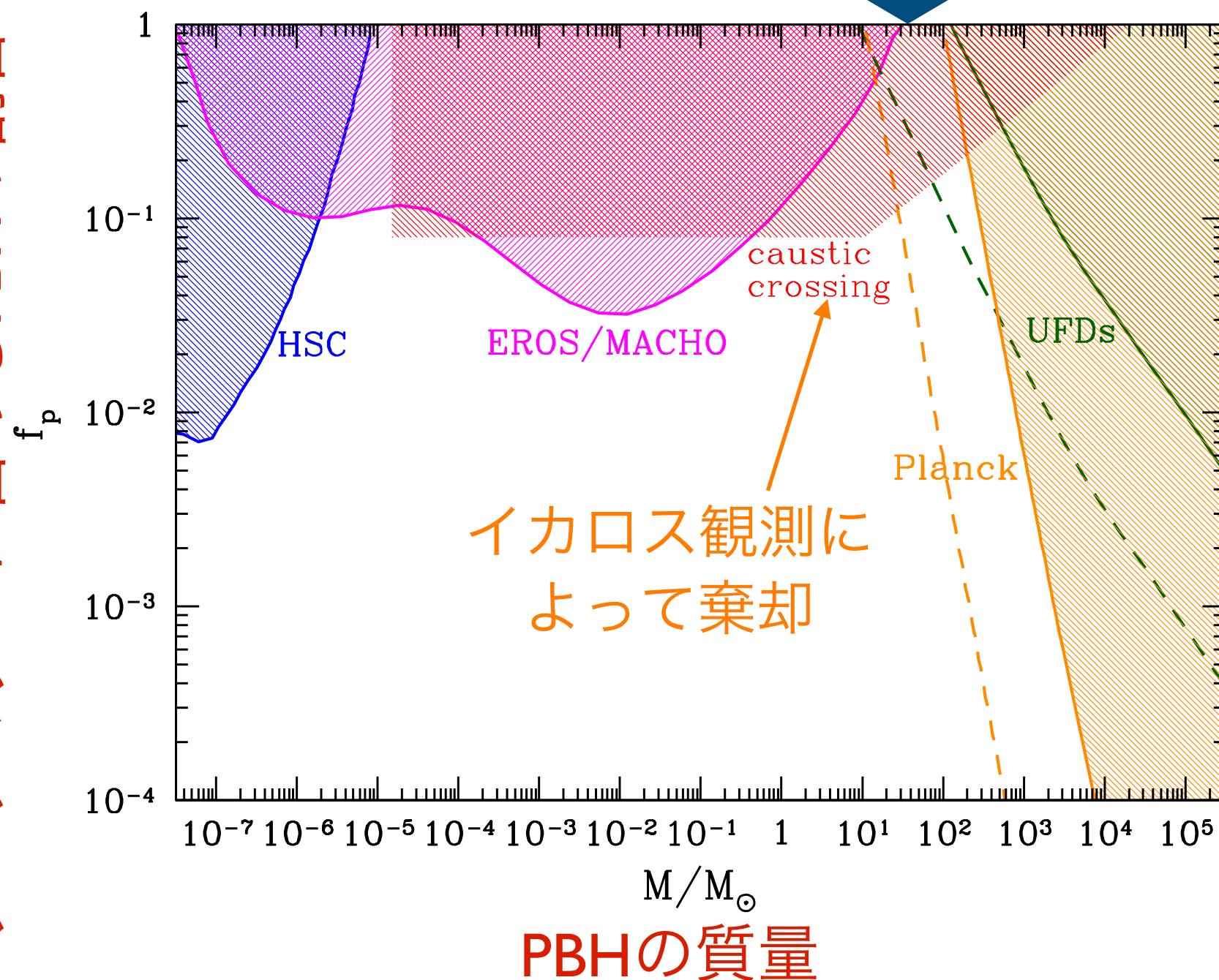
最遠方の単独の星「イカロス」の発見



- 速い増光と減光 → 半径 $\sim 200R_{\odot}$ の青色超巨星
- 銀河団のダークマター+星の「二重レンズ」で最大 ~ 4000 倍の増光を達成

イカロスによるPBHダークマターの制限

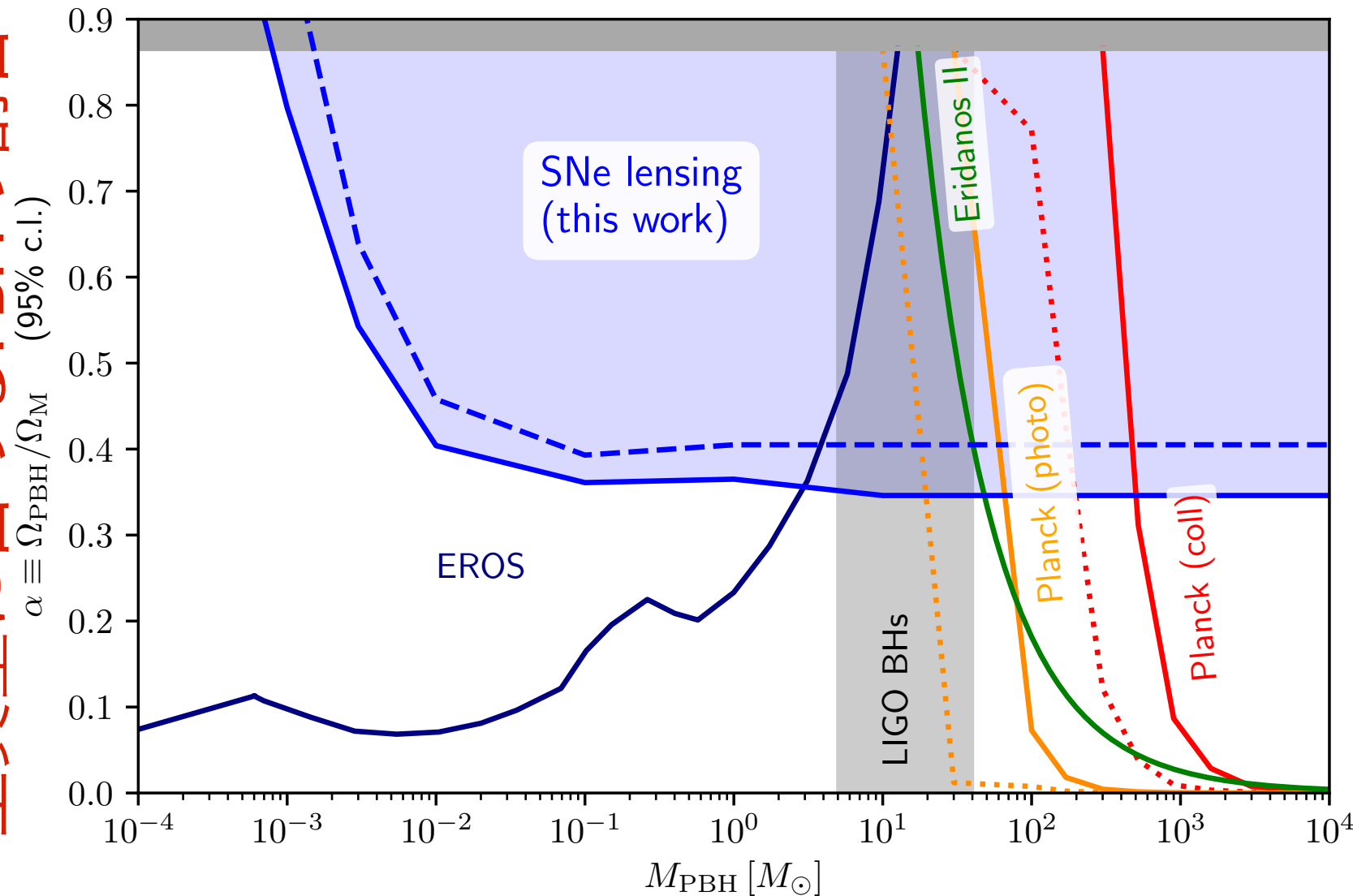
重力波で発見されたブラックホール



- DM = PBHだとPBHによる多重散乱で増光抑制
- $\sim 30M_\odot$ 。PBHが全DMである可能性を棄却
- 広がった質量関数をもった場合積分した f_{PBH} に適用可 (およそ)

Ia型超新星爆発の重力マイクロレンズ

全質量に占めるPBHの割合



PBHの質量

- PBH lensingによるIa型超新星の光度分布ゆがみ
- ~30M。PBHが全DMである可能性を棄却
- 広がった質量関数をもった場合積分した f_{PBH} に適用可 (およそ)

今後のPBH制限

- **~30M。PBH (重力波BH)**
すばる望遠鏡HSCを用いたM31の長期モニター
(PI: M. Takada) → $f_{\text{PBH}} < 0.01$ (95%CL) まで制限可
- **~ 10^{-13} – 10^{-12} M。PBH ($f_{\text{PBH}}=1$ 可能?)**
アイデア募集中、、、

まとめ

- CDMは今のところ成功しており、はっきり矛盾する観測はいまのところない
- バリオン物理を正しく考慮することが重要
- バリオン物理が (あまり) 効かない小質量ハローが現在のフロンティアのひとつ
- ダークマターはなかなか尻尾を出さないが、観測的制限は今後数年でさらにおおきく進展する見込みなので乞うご期待