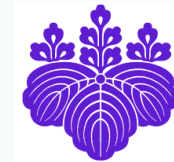




4重像重力レンズを用いた温かいダークマターの の質量の制限

MNRAS:2015 doi: 10.1093/mnras/stv194



井上 開輝(近畿大), 高橋 龍一(弘前大),
高橋 智(佐賀大), 石山 智明(筑波大)

What's New

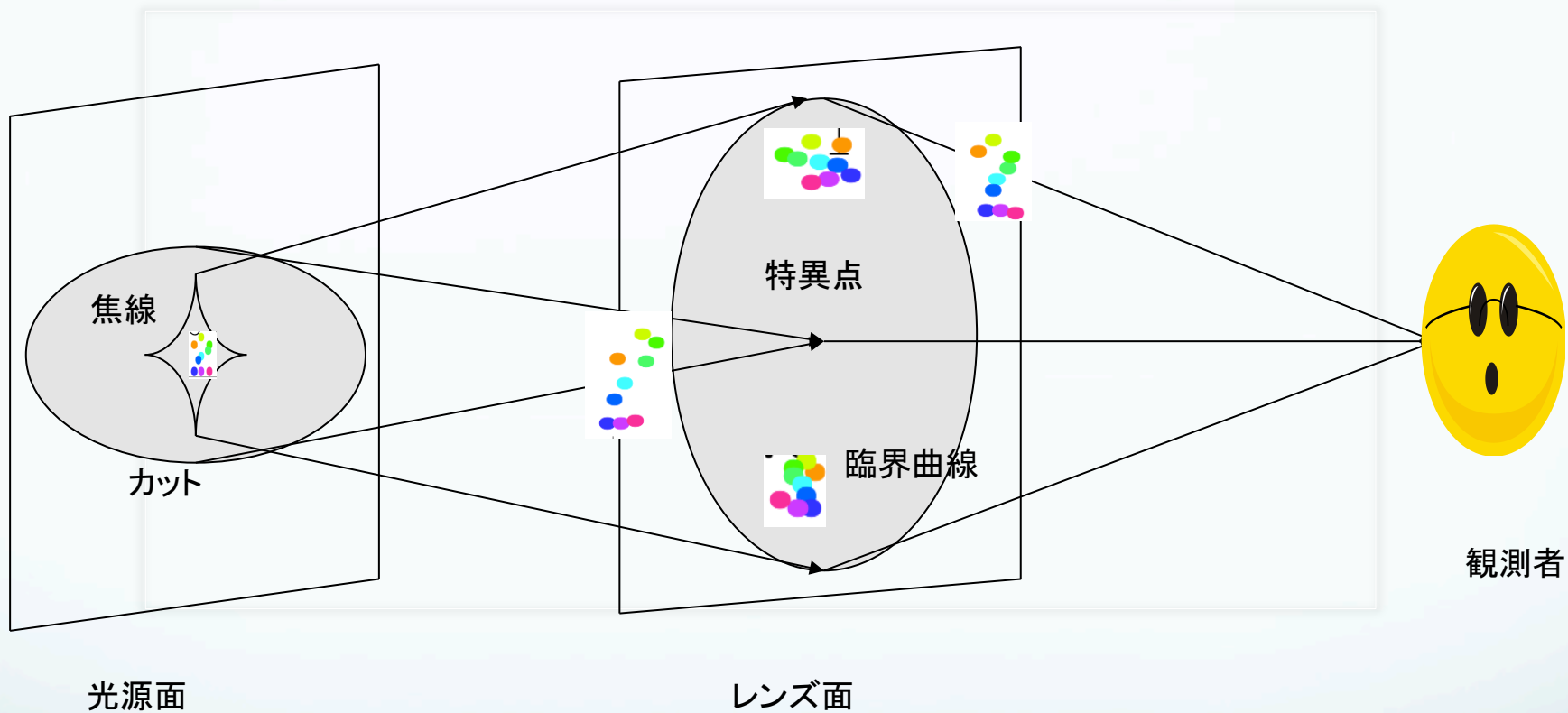
- 観測された4重像重カレンズ6個を用いて
温かいダークマター(WDM)の質量を制限。
- 制限はライマンアルファ雲よりやや弱い
か同等。(レンズモデルはSIE)
- 赤方偏移 $1 < z < 2$ の領域の制限として
は(非線形解析)初めて。

Outline

- フラックス比異常とその起源
- WDMの非線形パワースペクトル
- 重カレンズ系とモデル
- シミュレーション結果
- まとめ

フラックス比異常とその起源

4重像重カレンズ



位置は合うがフラックス比が
合わない＝フラックス比異常

(スムーズなポテンシャルを仮定)

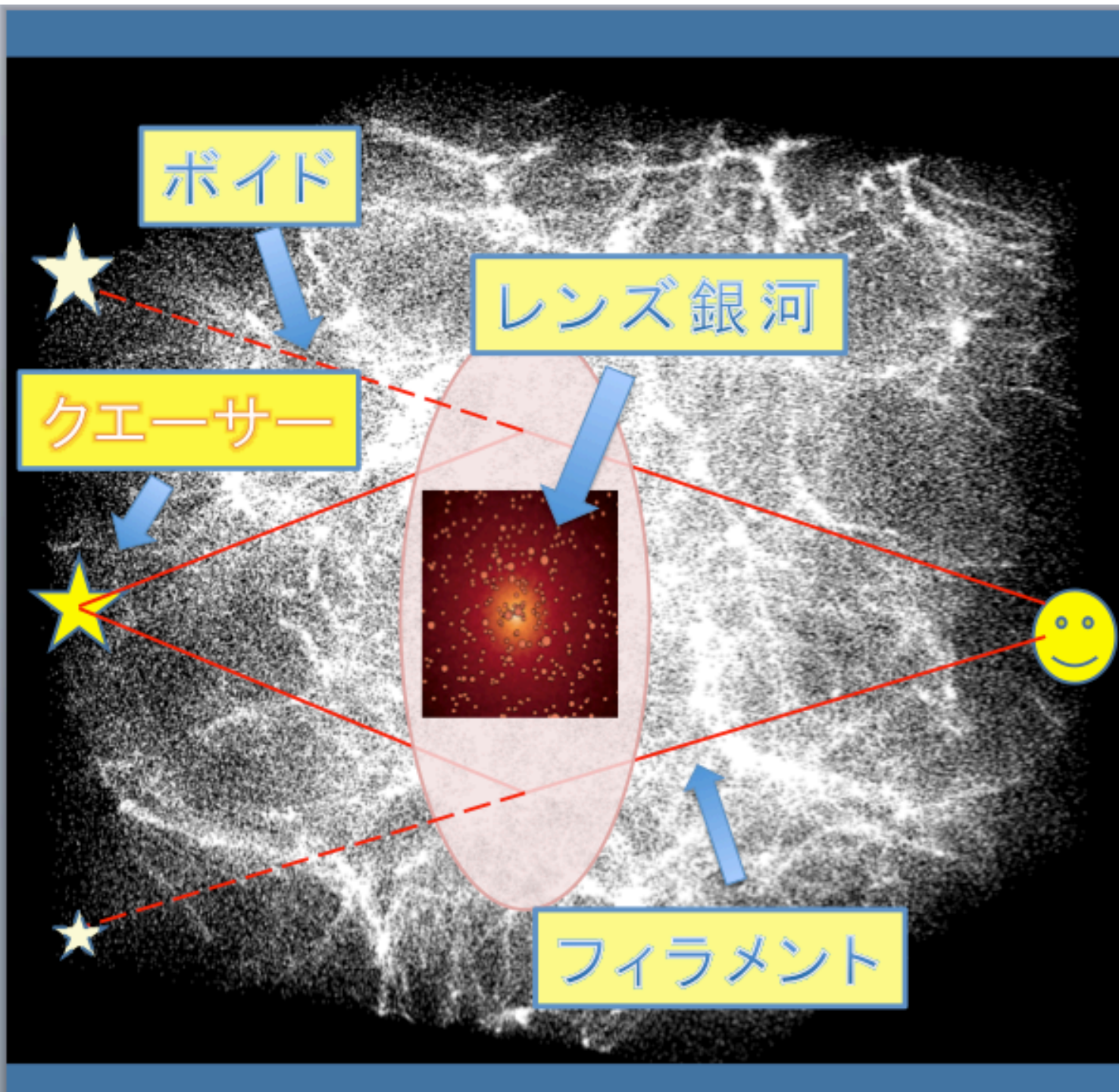
フラックス比異常の起源

- レンズ銀河のサブハロー
- 複雑な銀河ポテンシャル
- 散乱や吸収
- 視線方向のダークマター

フラックス比異常の起源

- レンズ銀河のサブハロー
- 複雑な銀河ポテンシャル
- 散乱や吸収
- **視線方向のダークマター**

(Inoue, Takahashi '12, Takahashi & Inoue '14)



WDMのゆらぎの減衰

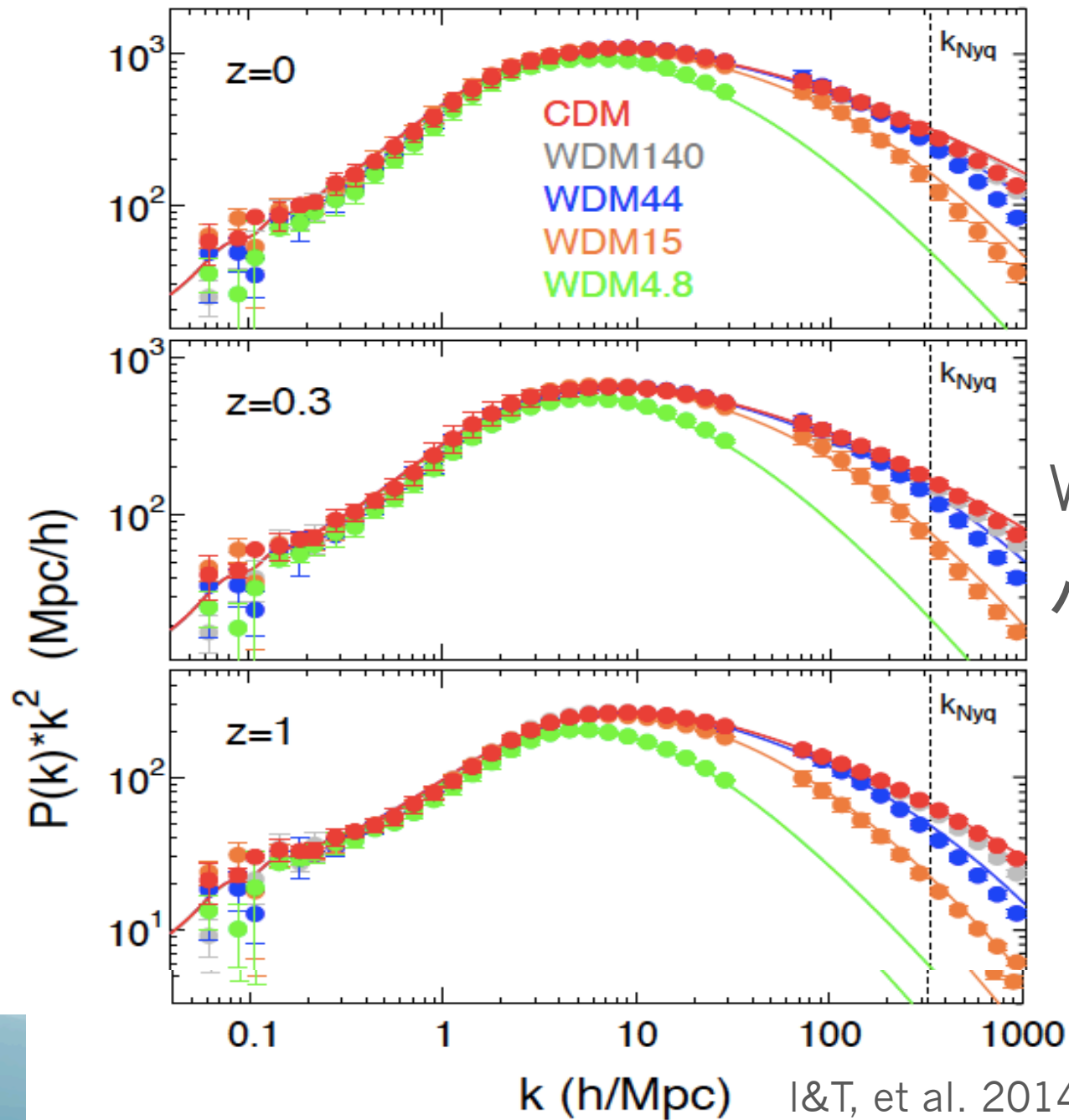


フラックス比異常の消失

$$k_{fs} = \frac{2\pi}{\lambda_{fs}}$$

(フリーストリーミングによる
ゆらぎの減衰)

WDMの非線形パワースペクトル



$N = 1024^3$

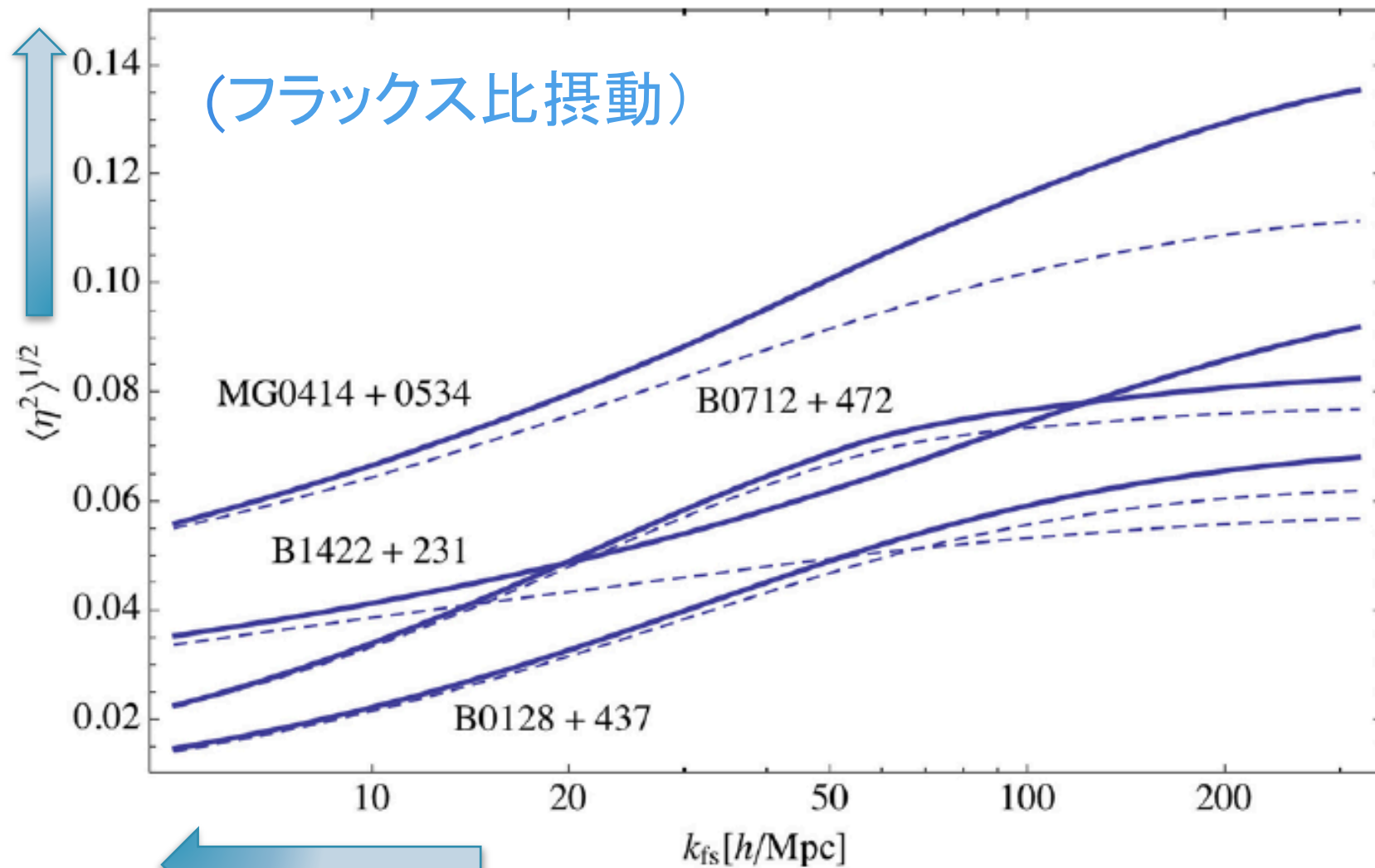
Boxsize
 = 10Mpc / h

WDMのみ
 バリオンなし

重カレンズ系とモデル

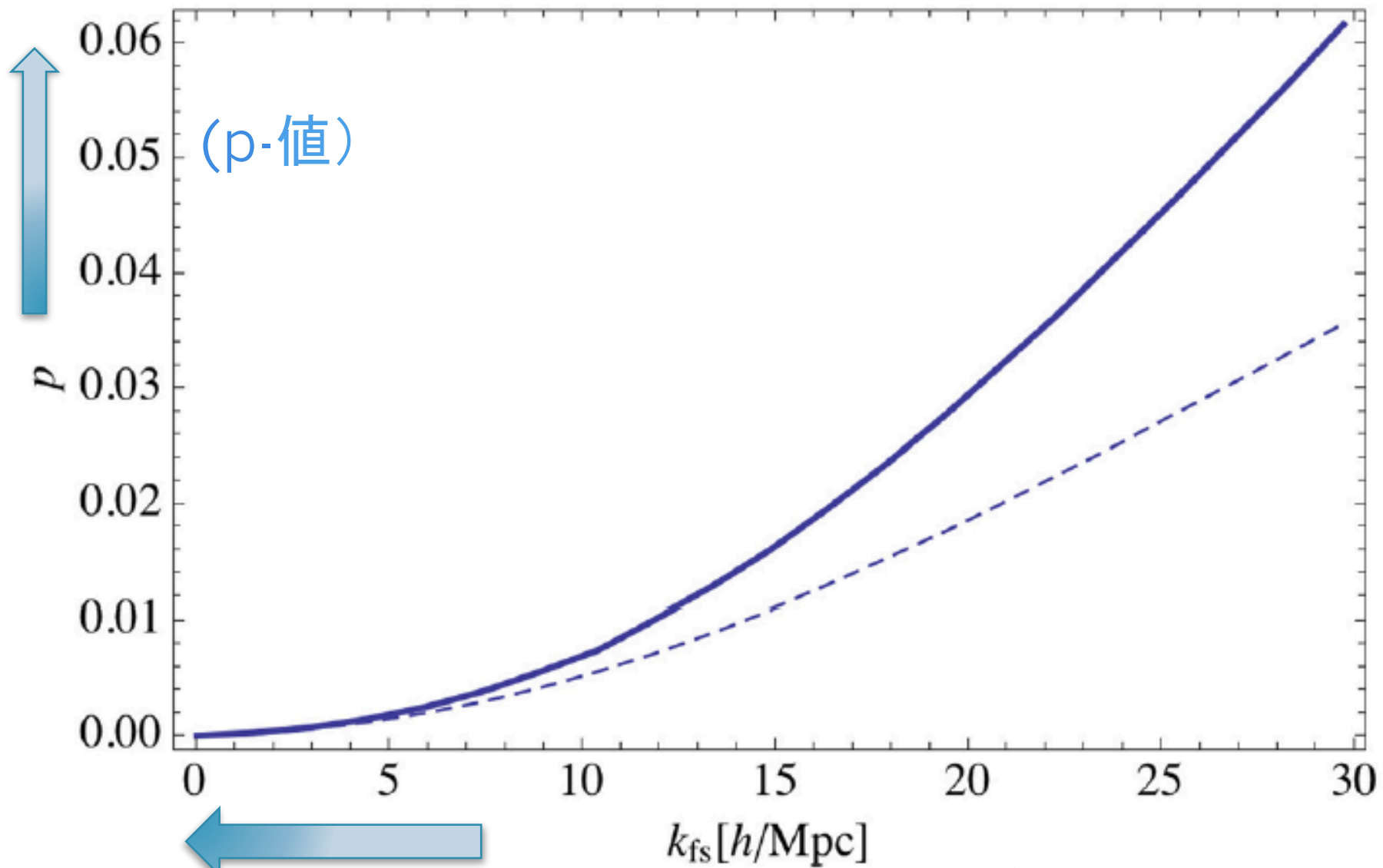
- レンズサンプルは4重像QSO6つ。
- 射影密度が特異等温楕円体(SIE) + 外部シア(+SIS)と仮定。
- 非線形パワーから弱重カレンズ効果を計算。
- 位置のずれの効果も考慮。

シミュレーション結果



(フリーストリーミングスケール)

KTI, Takahashi, Takahashi, Ishiyama, et al. 2014



(フリーストリーミングスケール)

KTI, Takahashi, Takahashi, Ishiyama, et al. 2014

まとめ

- 観測された4重像重カレンズ6個を用いて
温かいダークマター(WDM)の質量を制限。
- 熱的生成WDMの質量 $> 1.3 \text{ keV}$ (95%CL)
- フリーストリーミング波数 $> 27 h/\text{Mpc}$
(95%CL)

Summary

- Flux-ratio anomalies can be explained solely by line-of-sight structures LOSS without taking subhalos into account.
- Convergence perturbations increase with the source redshift.
- Differential magnification may break the model degeneracy (subhalo/LOSS)

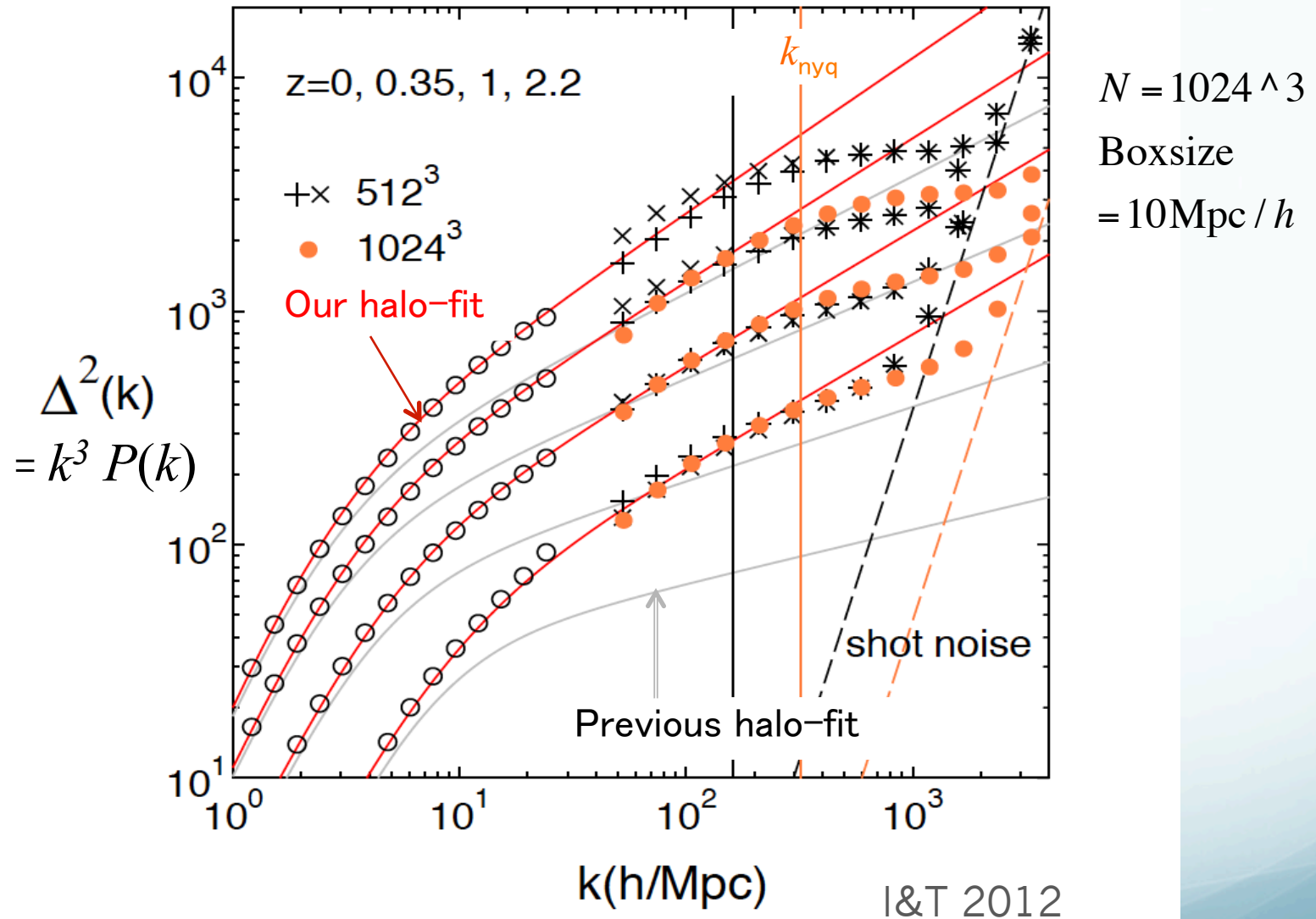
Caveats

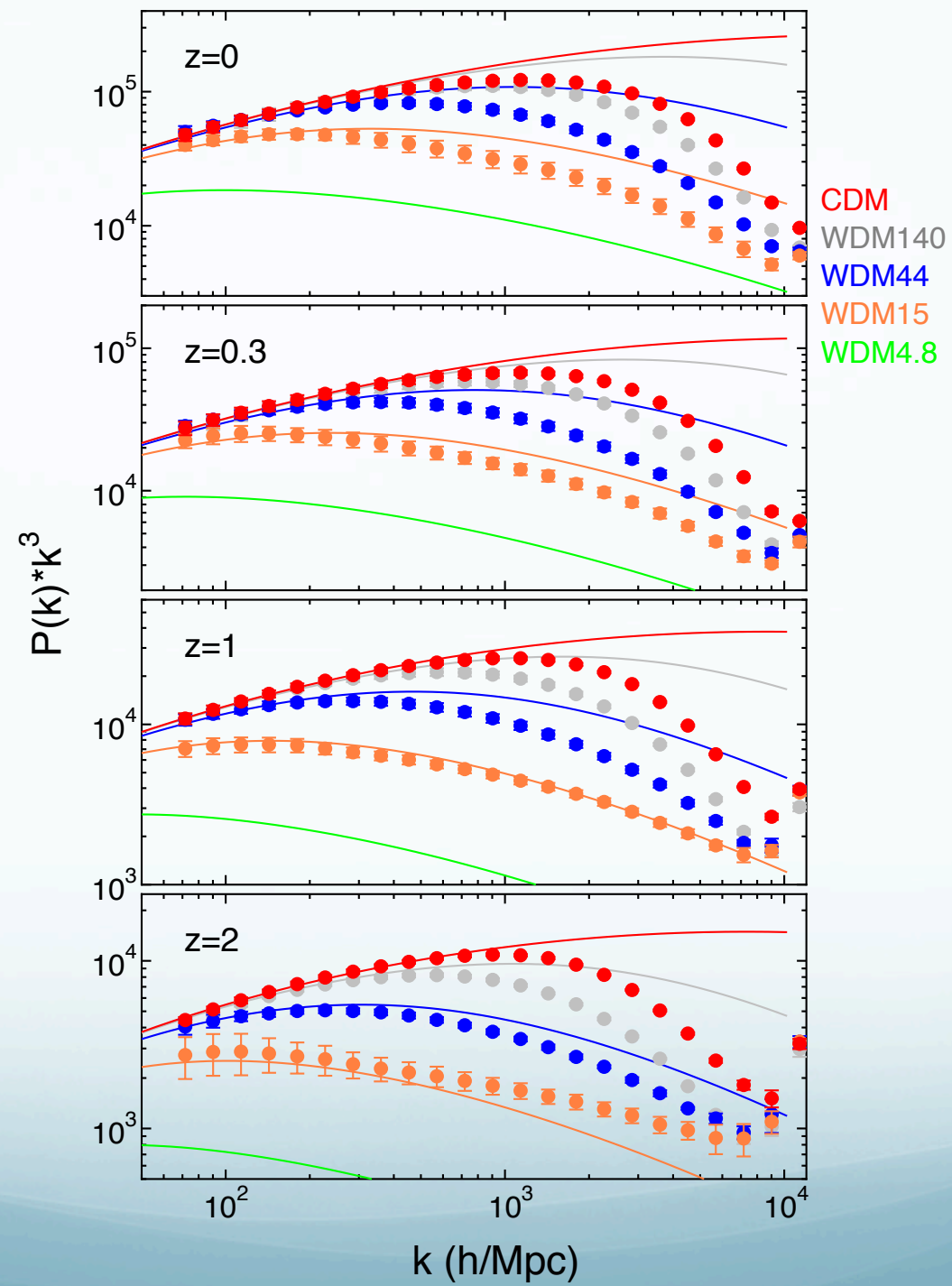
- The effect of baryons are not considered.
- There may be perturbations that give astrometric shifts $>0.003''$ and still being consistent with data.
- Power spectrum $P(k)$ for $k > 1000h/\text{Mpc}$ may be enhanced even for DM only models.
- Environments of the primary lens may be more complex. (group & cluster)

Caveats

- The allowed astrometric errors can be much smaller as $\sim 0.001''$
(see 2011 Sluse et al.)
- The origin of secondary lens unknown.
(lensed image/companion/LOS halo?)
- Mass-sheet degeneracy ambiguity in η

Non-linear power spectrum





Breaking mass sheet degeneracy: η

$$\eta^2(A,B,C) = \frac{1}{4} [(\delta_A^\mu - \delta_B^\mu)^2 + (\delta_C^\mu - \delta_B^\mu)^2].$$

$$\langle \eta^2 \rangle = \frac{1}{4} \left[(J_A + J_B) \sigma_\kappa^2(0) - 2J_{AB} \xi_\kappa(\theta_{AB}) + (J_B + J_C) \sigma_\kappa^2(0) - 2J_{BC} \xi_\kappa^2(\theta_{BC}) \right],$$

where

$$J_i = \mu_i^2 (4(1 - \kappa_i)^2 + 2\gamma_i^2),$$

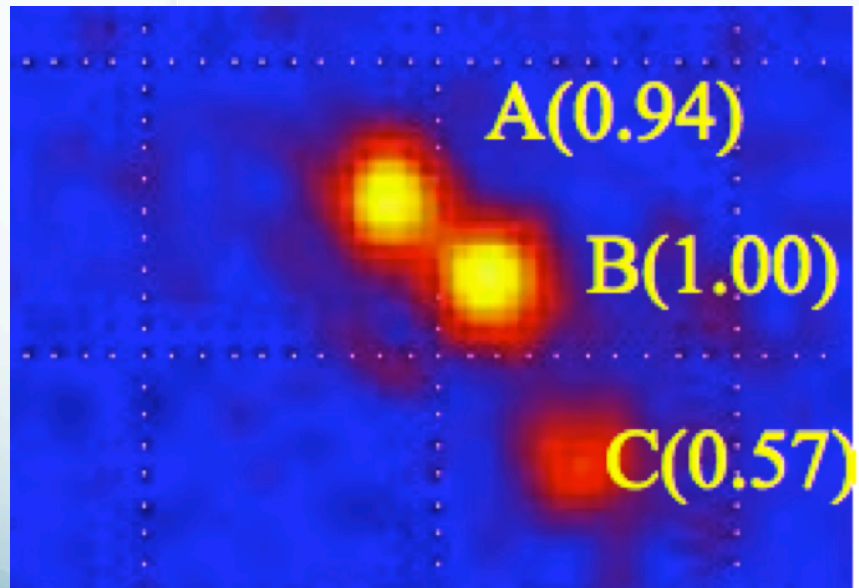
$$1 - \kappa_i \rightarrow \lambda(1 - \kappa_i) = 1 - \kappa'_i$$

$$\gamma_i \rightarrow \bar{\lambda} \gamma_i = \gamma'_i \quad \delta_i^\mu \propto \lambda^{-1} \quad (2\gamma_i \gamma_j),$$

Breaking mass sheet degeneracy: η

$$\delta_i^\mu \approx \frac{2(1 - \kappa_i)\delta\kappa + 2\gamma_{i1}\delta\gamma_1 + 2\gamma_{i2}\delta\gamma_2}{(1 - \kappa_i)^2 - (\gamma_{i1}^2 + \gamma_{i2}^2)},$$

カस्प^o焦線近傍で
 $A + B + C = 0$



B1422+231 (Chiba et al.'05)