



ALMAで探るダークマターの起源

井上 開輝（近畿大）

2013/03/27

ALMA Workshop 「ALMAで探る遠方・近傍宇宙
の赤外線銀河研究の新展開」



共同研究者

千葉	柁司 (東北大)
峰崎	岳夫 (東大天文センター)
高橋	龍一 (弘前大)
松下	聡樹 (Academia Sinica)

2013/03/27

ALMA Workshop 「ALMAで探る遠方・近傍宇宙の赤外線銀河研究の新展開」



目次

- イントロ
 - ダークマター
 - 重力レンズ
- フラックス比異常
- ミニハローによる重力レンズ
- ALMAで何が分かるか
- まとめ

イントロ



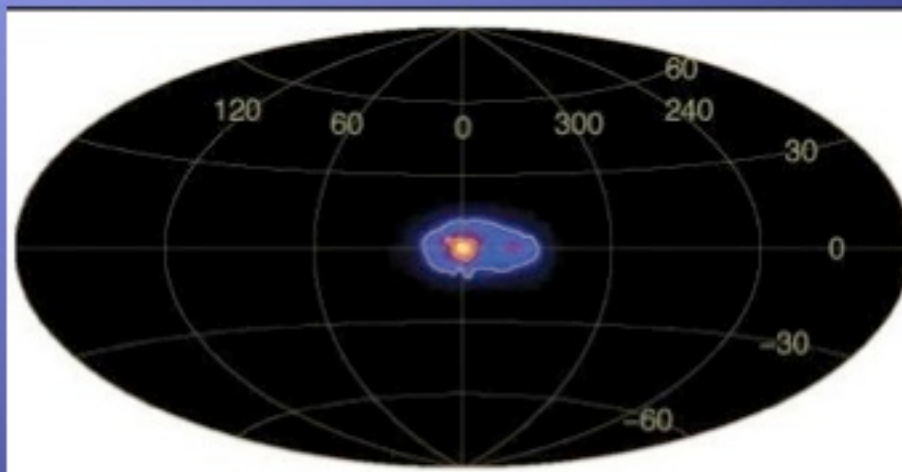
ダークマター

- 現在宇宙の26%を占める正体不明の質量。
- 脱結合時の速度分散により分類。[Hot DM ($v \sim c$), Warm DM ($v \sim c$), Cold DM ($v \ll c$)]
- CDMがもっとも観測とよく合う。(1成分を仮定)



MeV ダークマター

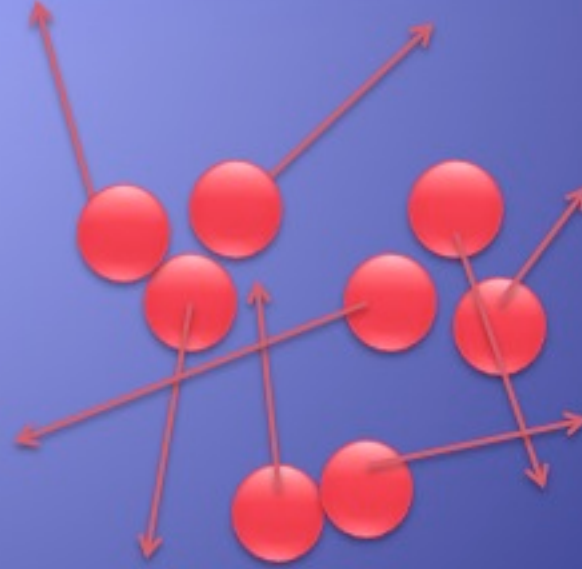
- 「普通」のCDM粒子($>100\text{GeV}$)よりやや軽いDM($1\text{keV} < m < 1\text{GeV}$)
- MeV DMの崩壊→INTEGRAL (511keV) の発見した銀河中心の陽電子過剰を説明？



Weidenspointner
et al. 2008

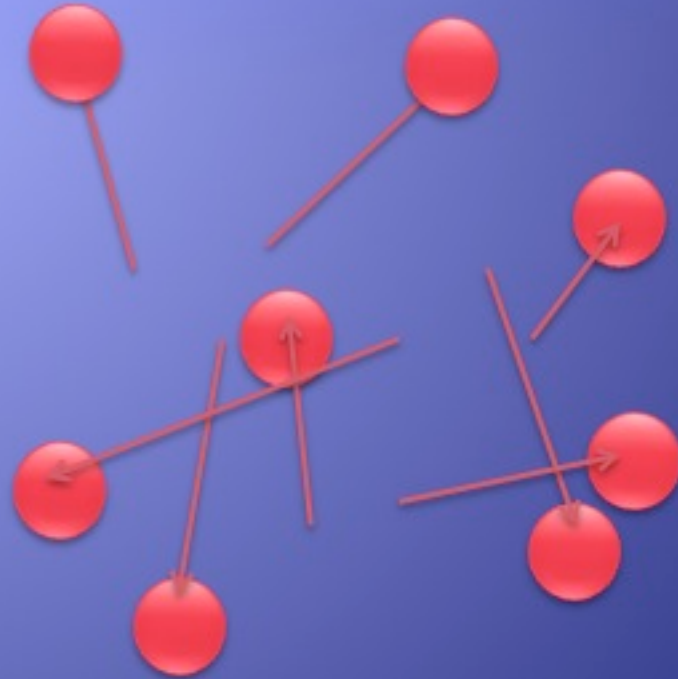


自由ストリーミング



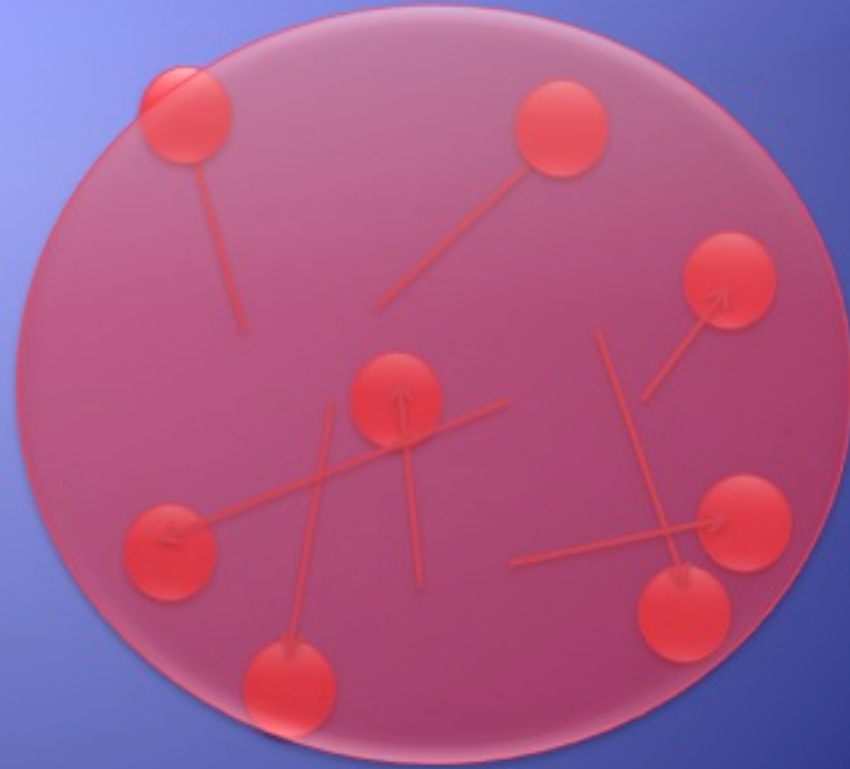


自由ストーリーミング





自由ストリーミング





自由ストリーミング



$$L_{free} \approx 0.4(m / \text{keV})^{-4/3} (\Omega_{DM} h^2 / 0.135)^{1/3} [\text{Mpc} / h]$$



WDMへの制限

- ライマンアルファの吸収線 & その他 ($\sim 0.5 \text{ Mpc}$)
➡ ダークマター質量 $M > O[1 \text{ keV}]$
- 自由ストリーム長 L_{free} は M の $(-4/3)$ 乗に比例。
➡ 重いほど消えるゆらぎのスケールは小さい(熱平衡の場合)

$$L_{\text{free}} \approx 0.4 (m / \text{keV})^{-4/3} (\Omega_{\text{DM}} h^2 / 0.135)^{1/3} [\text{Mpc} / h]$$



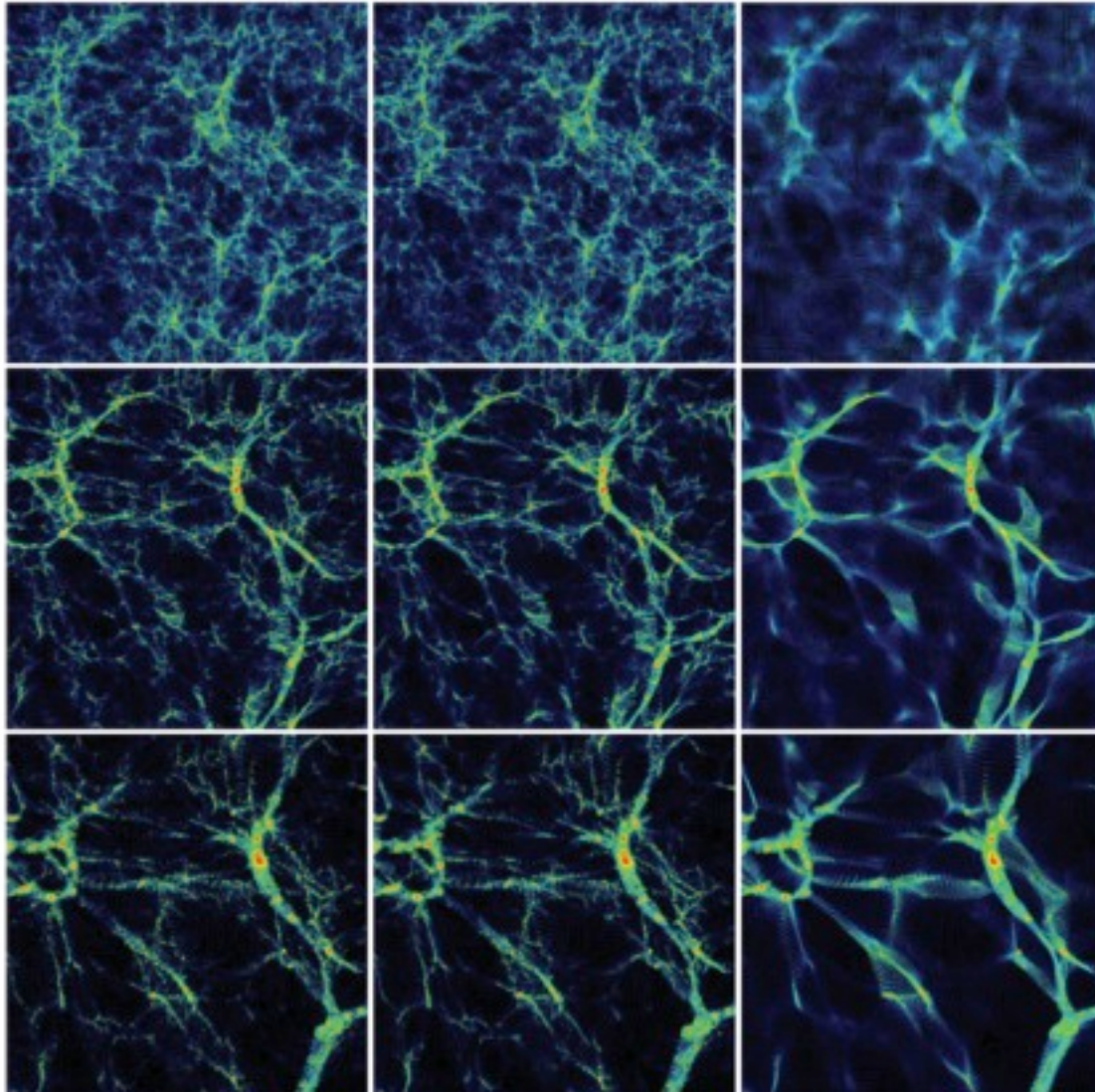
自由ストリームの効果



$z=4.4$

$z=1.1$

$z=0.$



50 Mpc/h

Schneider
et al. 2012



$z=4.4$

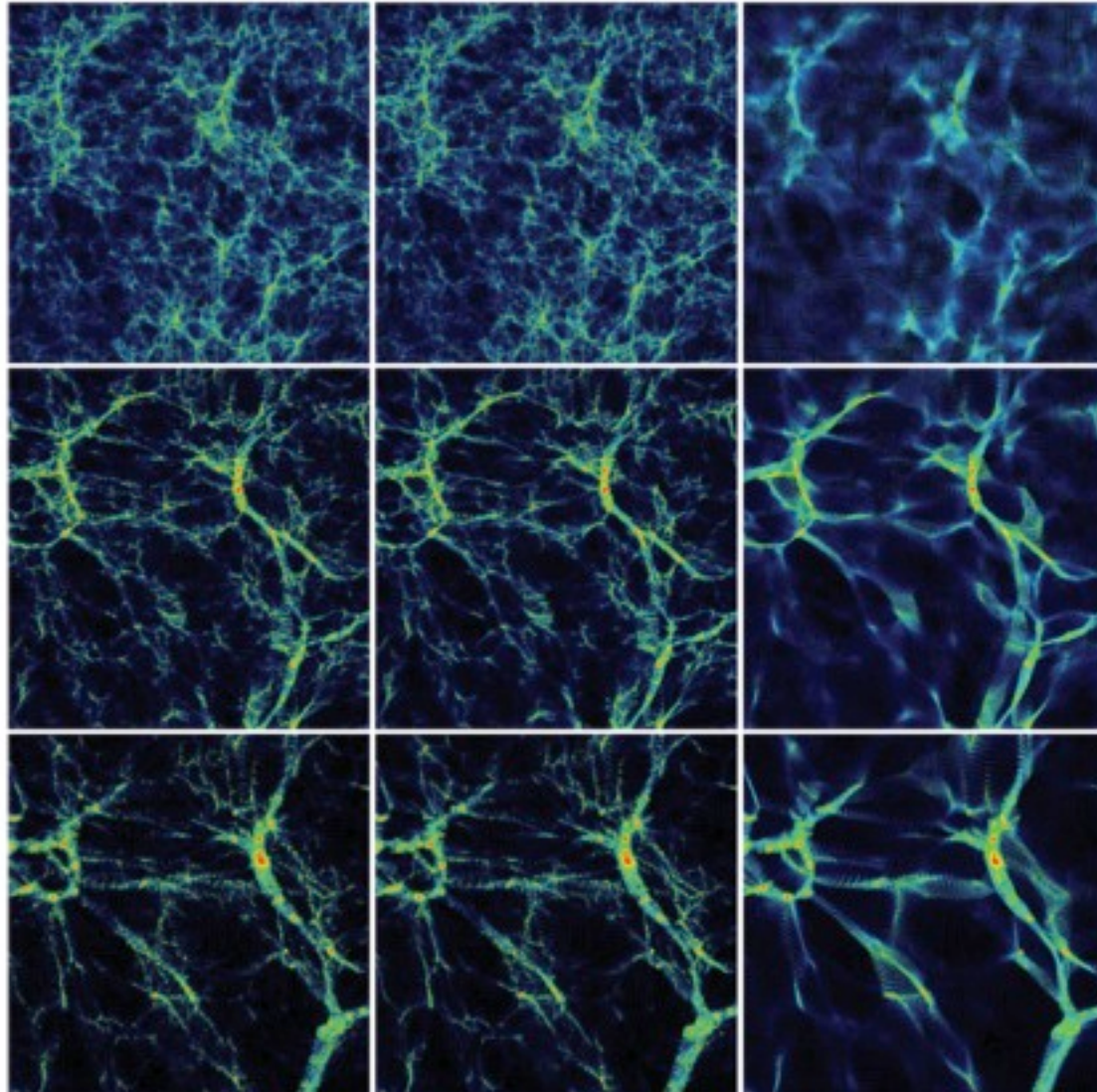
$z=1.1$

$z=0.$

CDM

WDM(1.0keV)

WDM(0.25keV)



50 Mpc/ h

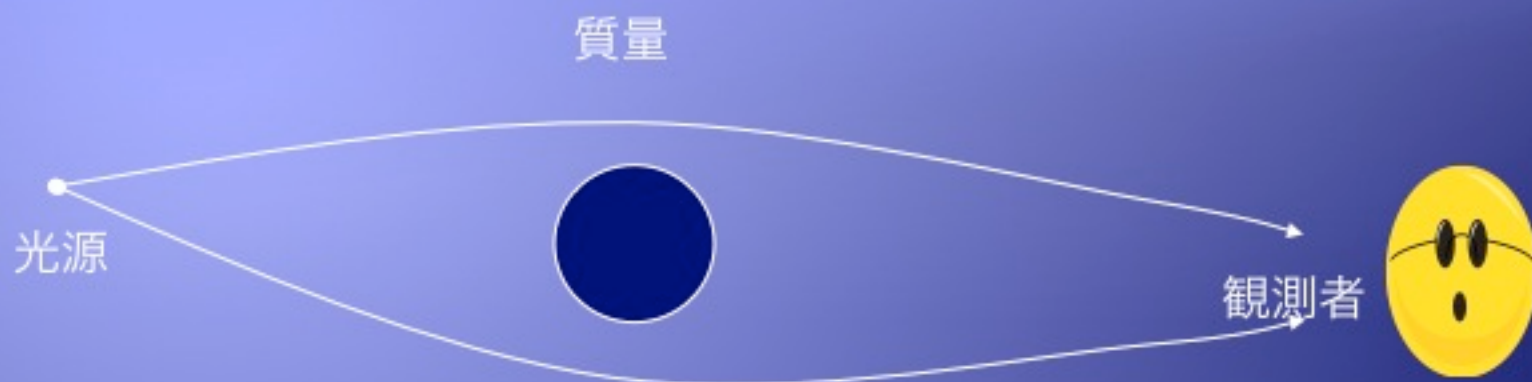
Schneider
et al. 2012



- 自由ストリーム長が分かればDMの質量が分かる(sterile neutrinoなど)。
- しかしkpc以下の場合、どうやって測るのか？

→ 重力レンズ！

重力レンズ



光も物質の引力によって軌道がまげられる。

→像のゆがみや虚像の数から質量の情報が分かる。

収束率とゆがみ



κ : convergence (収束率)



γ : shear (ゆがみ)

光源の位置 =

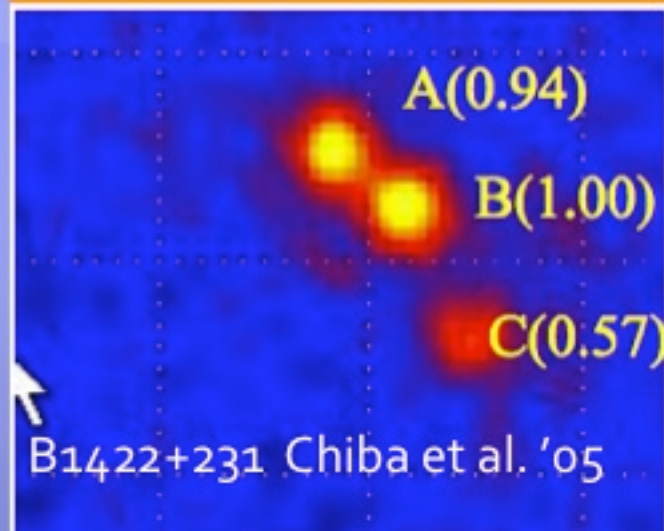
$$\begin{pmatrix} 1 - \kappa - \gamma & 0 \\ 0 & 1 - \kappa + \gamma \end{pmatrix}$$

• 像の位置

フラックス比異常

フラックス比異常

SUBARU Mid-IR image



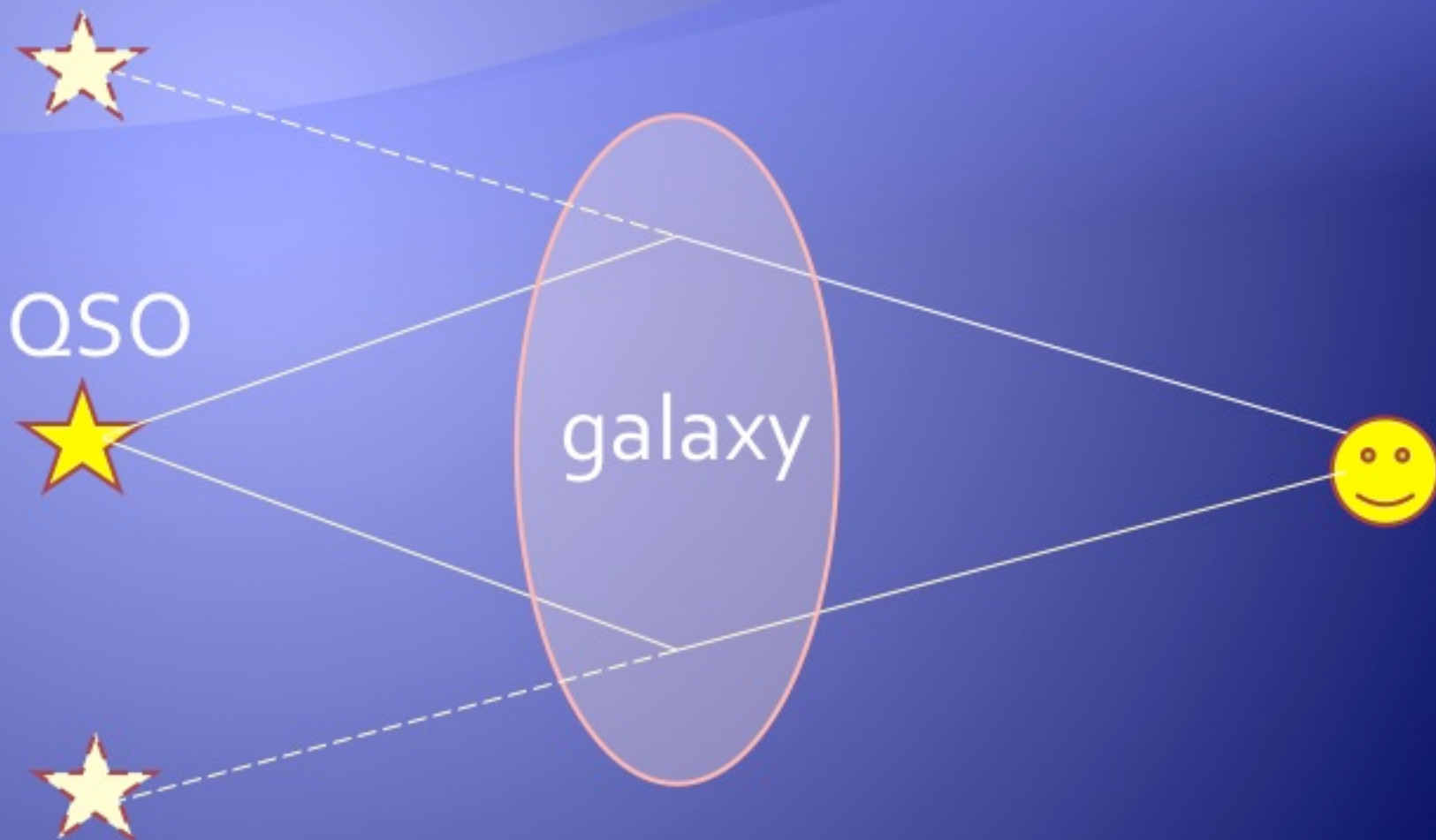
- 位置はよく合う。
- フラックス比は合わない。
- サブハローが原因？
($10^{(9-10)}$ 太陽質量)

Cusp-caustic relation

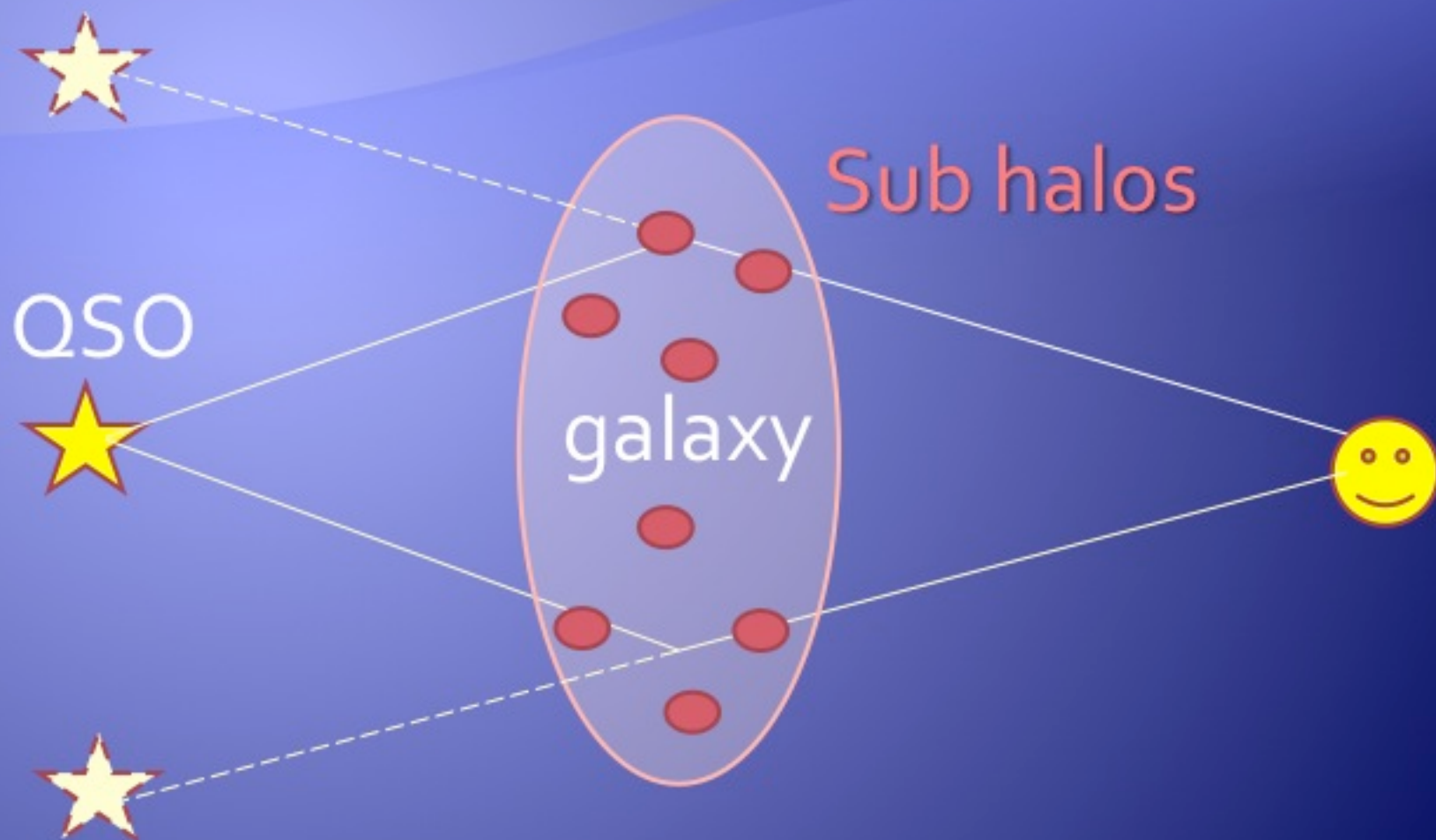
$$\frac{A+B+C}{|A|+|B|+|C|} = 0$$

(Mao & Schneider '98
Metcalf & Madau'01,
Chiba '02, Dalal &
Kochanek'02)

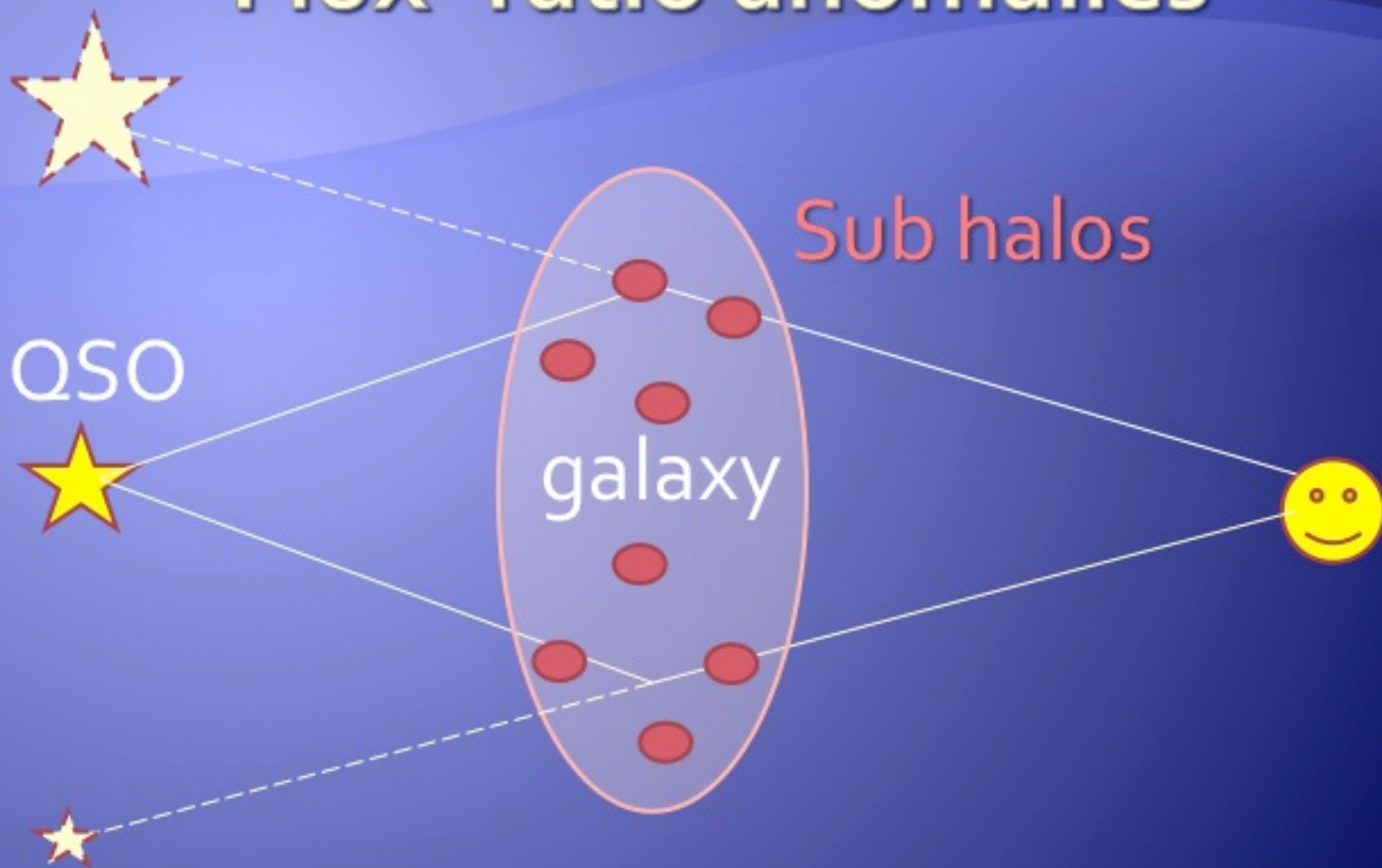
Flux- ratio anomalies



Flux- ratio anomalies



Flux- ratio anomalies



フラックス比異常

- 理論計算ではサブハローが足りない。

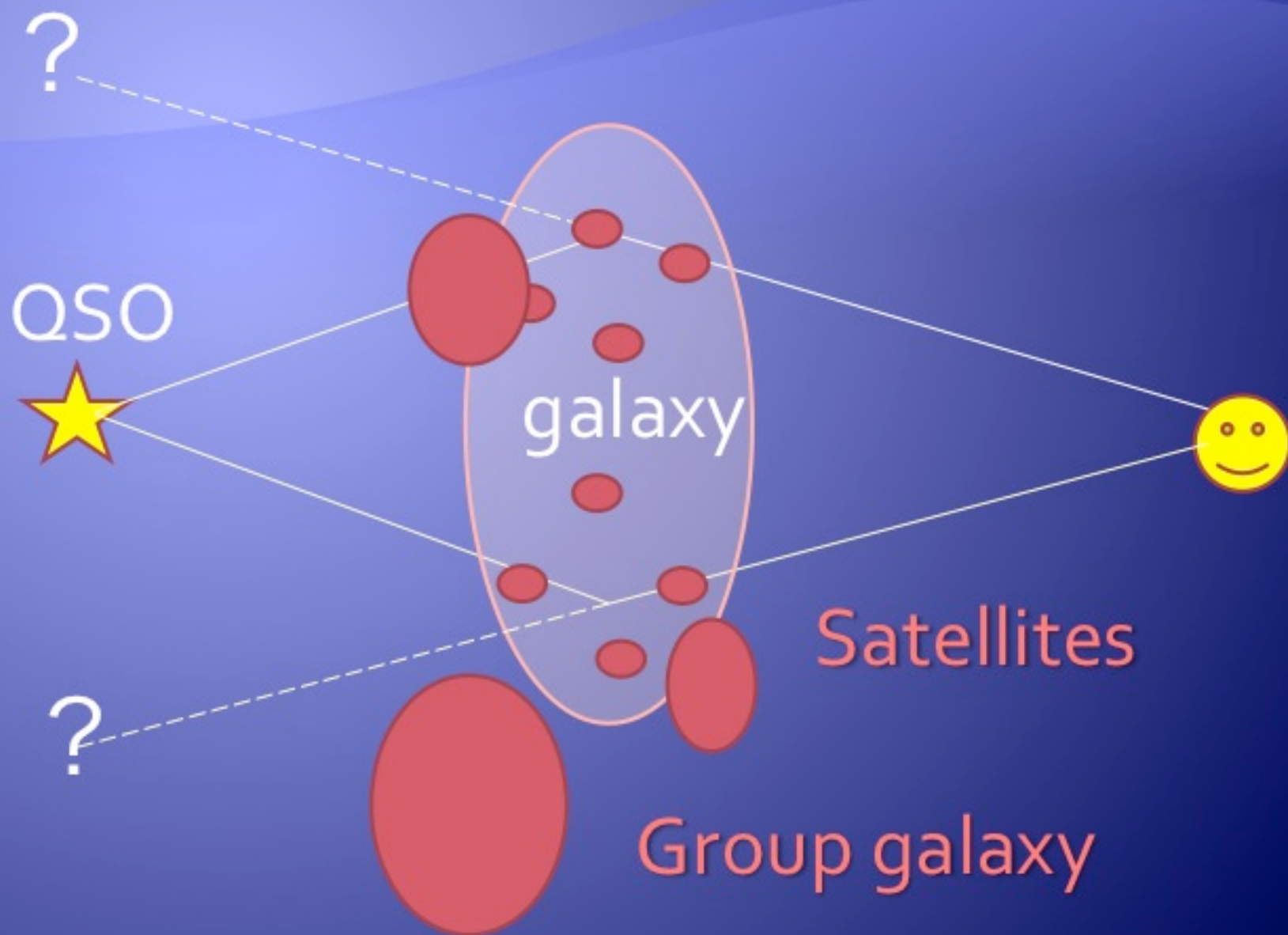
(Maccio & Mirranda 2006, Amara et al. 2006;
Xu et al. 2009, 2010; Chen 2009; Chen et al. 2011)

- 明るい伴銀河も寄与？

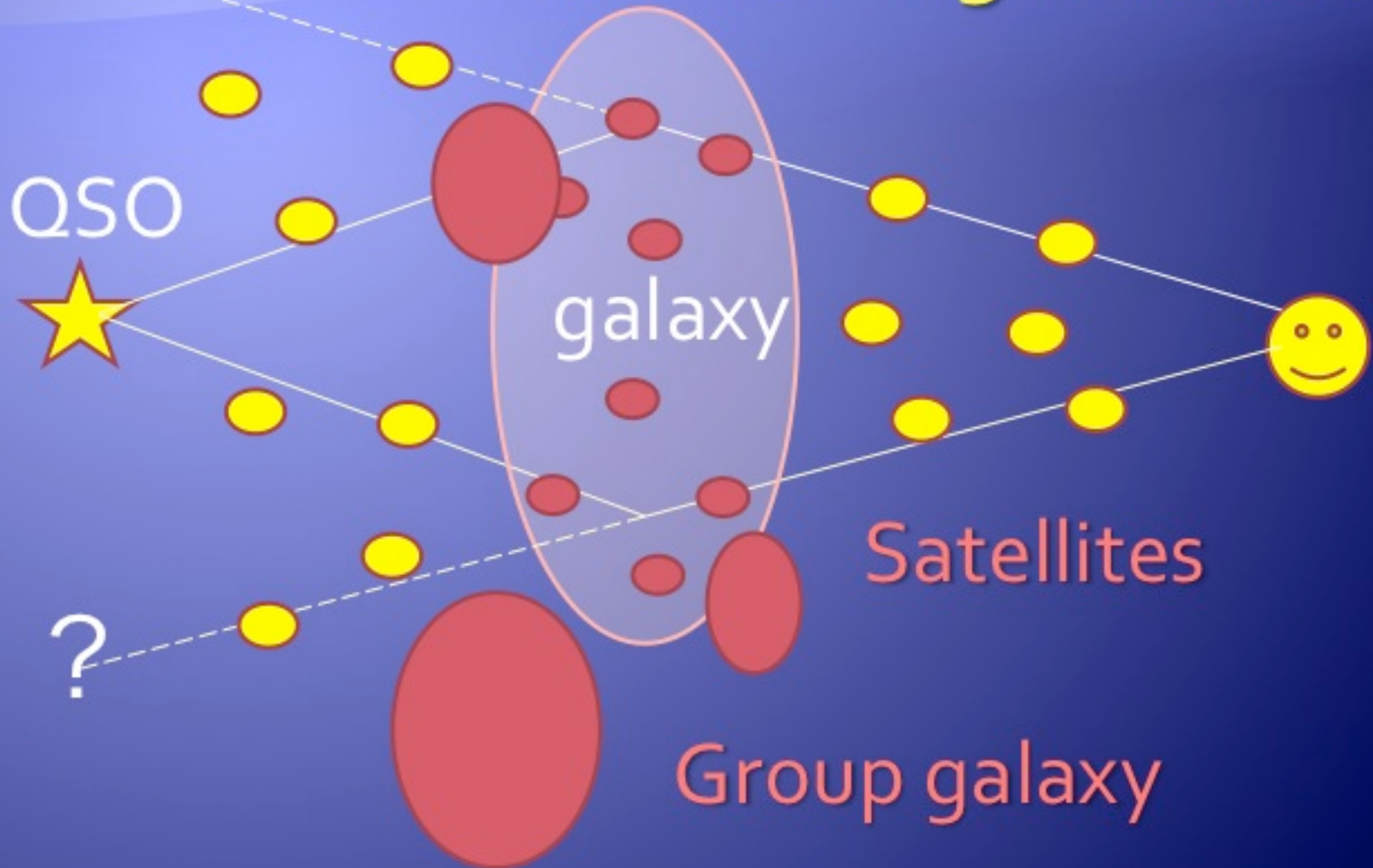
(McKean et al. 2007, Shin & Evans 2008;
MacLeod et al. 2009)

- 視線方向のハロー？

(Chen et al. 2003, Metcalf 2005, Xu et al. 2011)



Line-of-sight halos



フラックス比異常

- 理論計算ではサブハローが足りない。

(Maccio & Mirranda 2006, Amara et al. 2006;
Xu et al. 2009, 2010; Chen 2009; Chen et al. 2011)

- 明るい伴銀河も寄与？

(McKean et al. 2007, Shin & Evans 2008;
MacLeod et al. 2009)

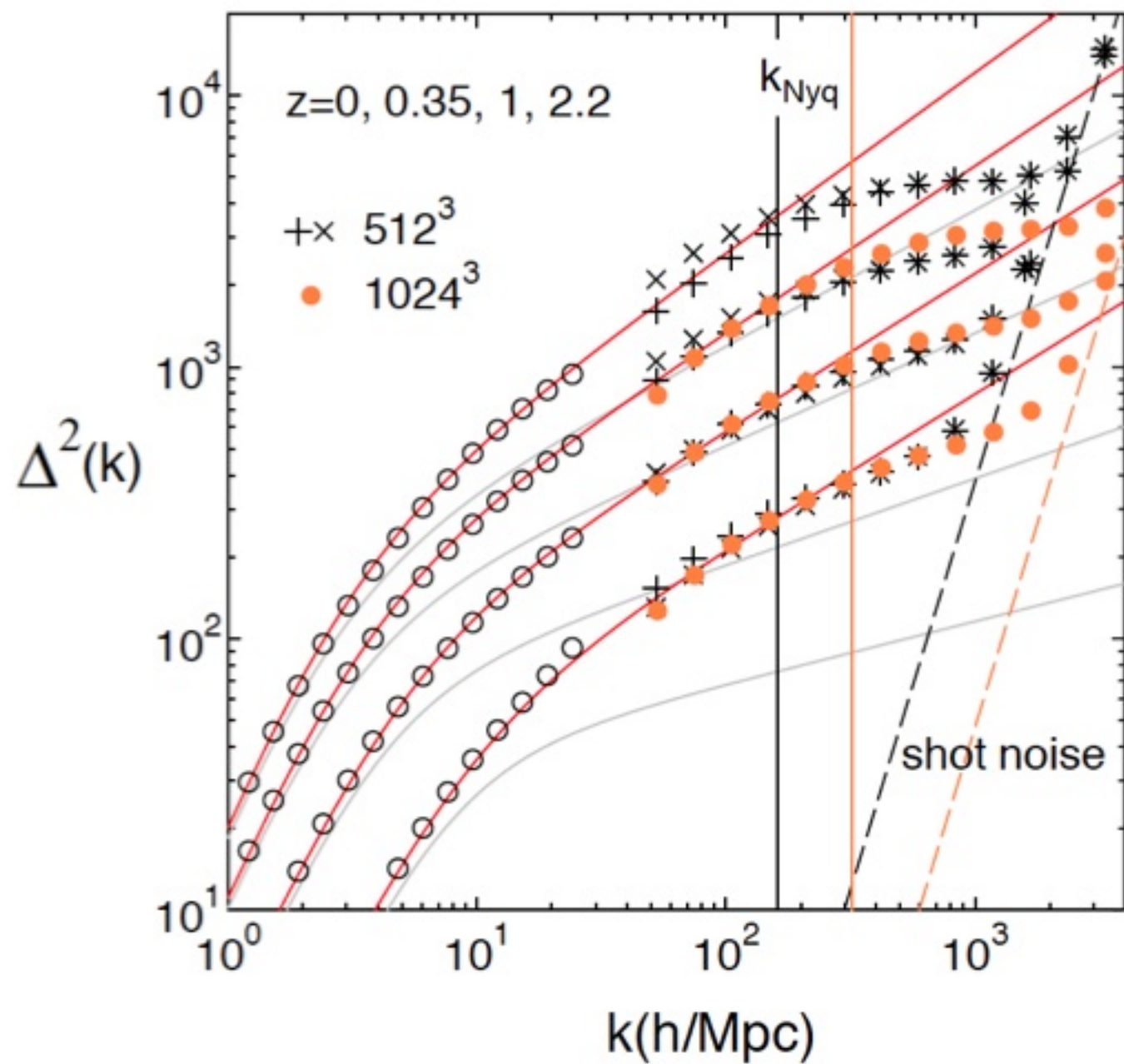
- 視線方向のハロー？

(Chen et al. 2003, Metcalf 2005, Xu et al. 2011)

ミニハローによる 重力レンズ

視線方向ハローのレンズ効果

- Semi-analytic estimate based on VERY high resolution N-body simulation **fully incorporating clustering effects** of $M > 10^5$ solar mass line-of-sight halos
- **Effects of voids & outskirts of halos**
- **Astrometric shifts** taken into account
- **Assume** weak lensing limit (spatial deflection change is small)



6 quadruple lenses

B1422+231

Cleaned

I

1"

CASTLES

MG0414+0534

Cleaned

I

1"

Falco et al. (1997)

H1413+117

Cleaned

I

1"

Turrishek et al. (1994)

PG1115+080

Cleaned

I

1"

Schechter et al. (1997)

Q2237+030

Cleaned

H

1"

CASTLES

RXJ1131-1231

Cleaned

I

1"

CASTLES

MIR images

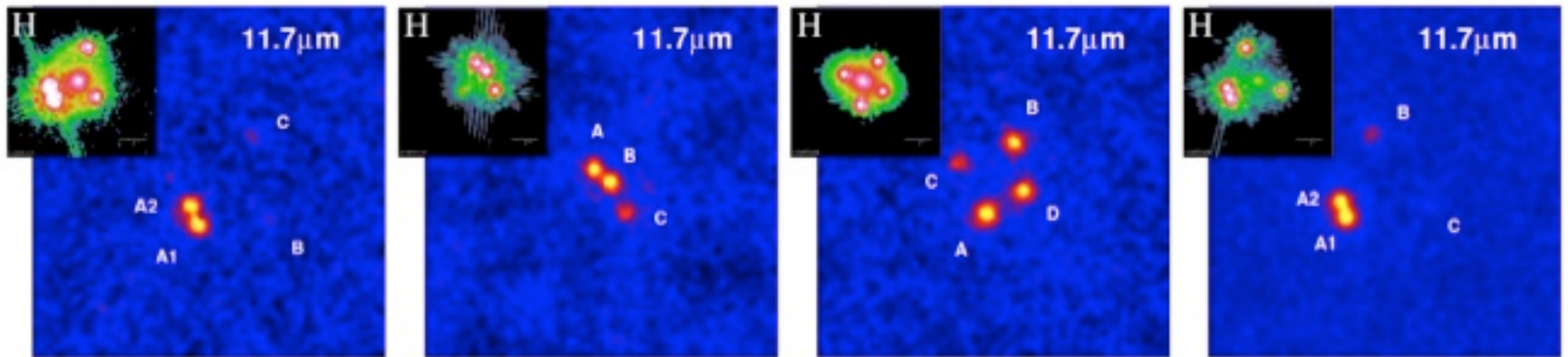
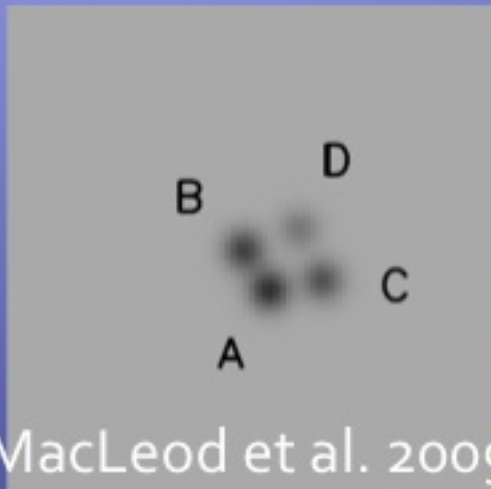


Figure 2: The mid-infrared images of quadruply lensed QSOs obtained by COMICS attached on Subaru telescope. From left to right, PG1115+080, B1422+231, Q2237+030, and MG0414+0534. The insets are their HST images for comparison (taken from CASTLES, <http://cfa-www.harvard.edu/glensdata/>).

(Chiba et al 2005 & Minezaki et al. 2009)



(MacLeod et al. 2009)



(Sugai et al. 2009)

MIR images

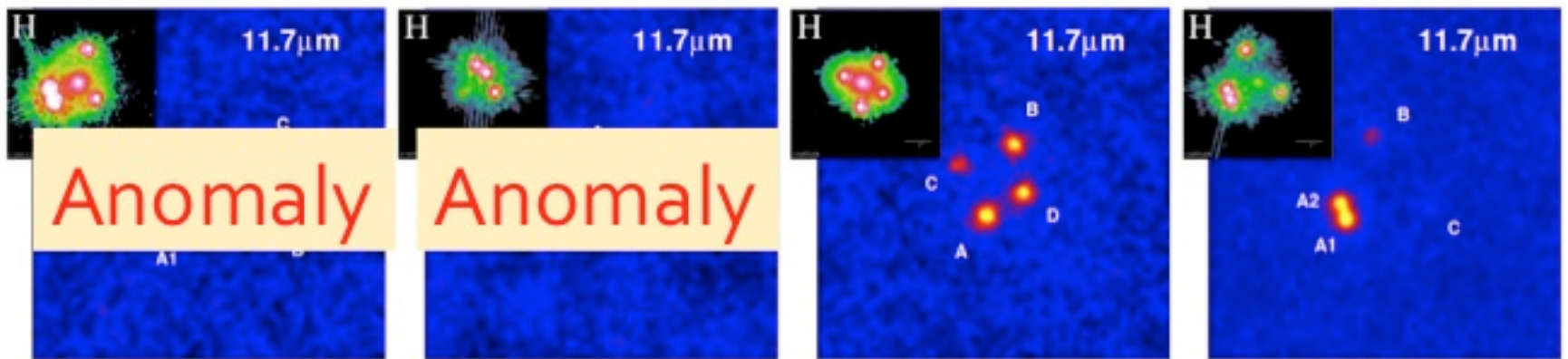
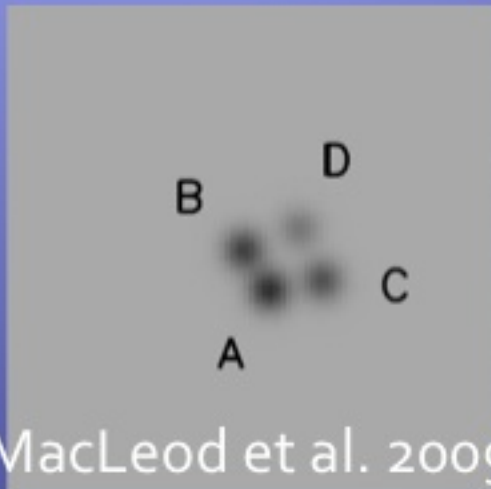


Figure 2: The mid-infrared images of quadruply lensed QSOs obtained by COMICS attached on Subaru telescope. From left to right, PG1115+080, B1422+231, Q2237+030, and MG0414+0534. The insets are their HST images for comparison (taken from CASTLES, <http://cfa-www.harvard.edu/glensdata/>).

(Chiba et al 2005 & Minezaki et al. 2009)



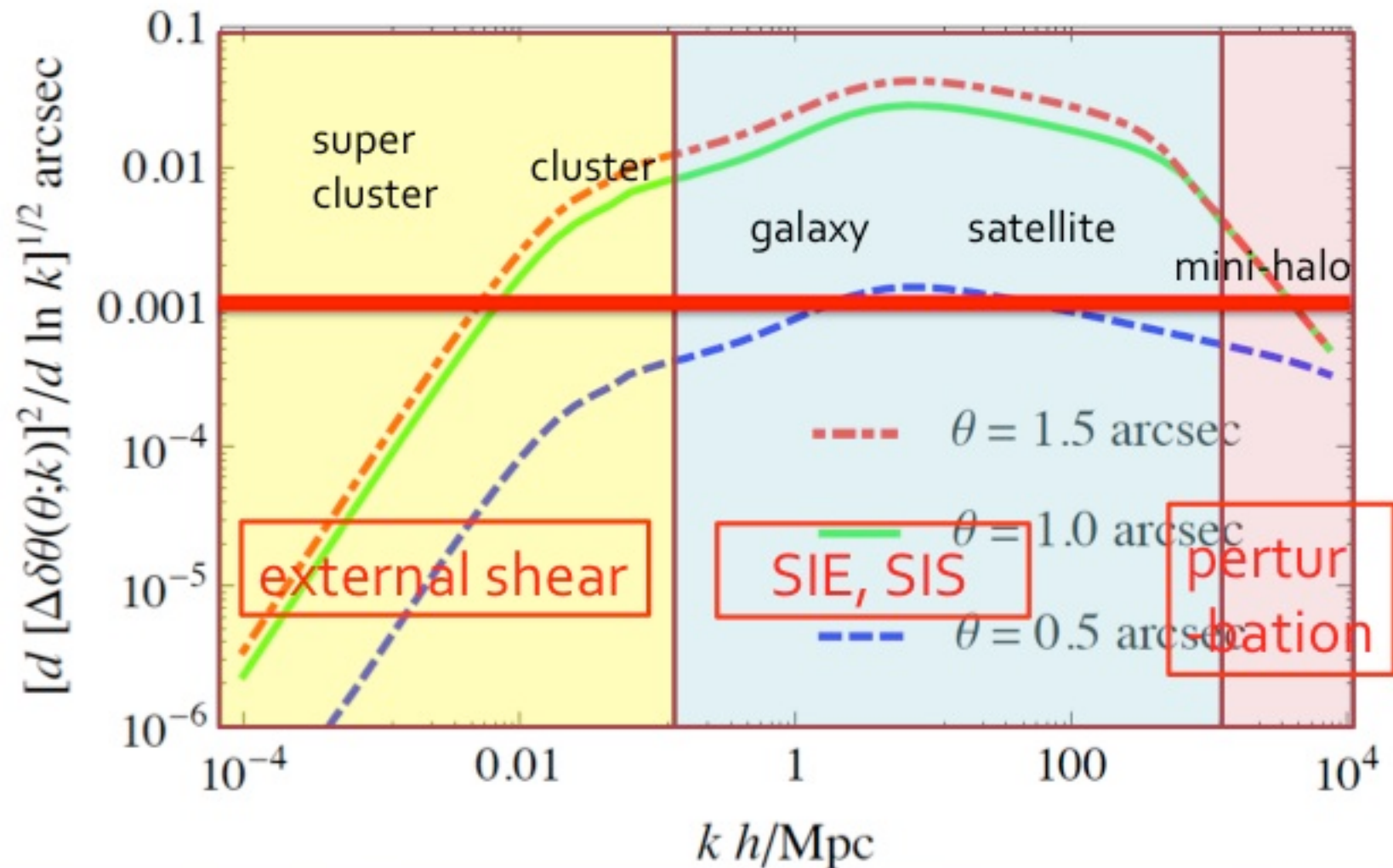
(MacLeod et al. 2009)



(Sugai et al. 2009)

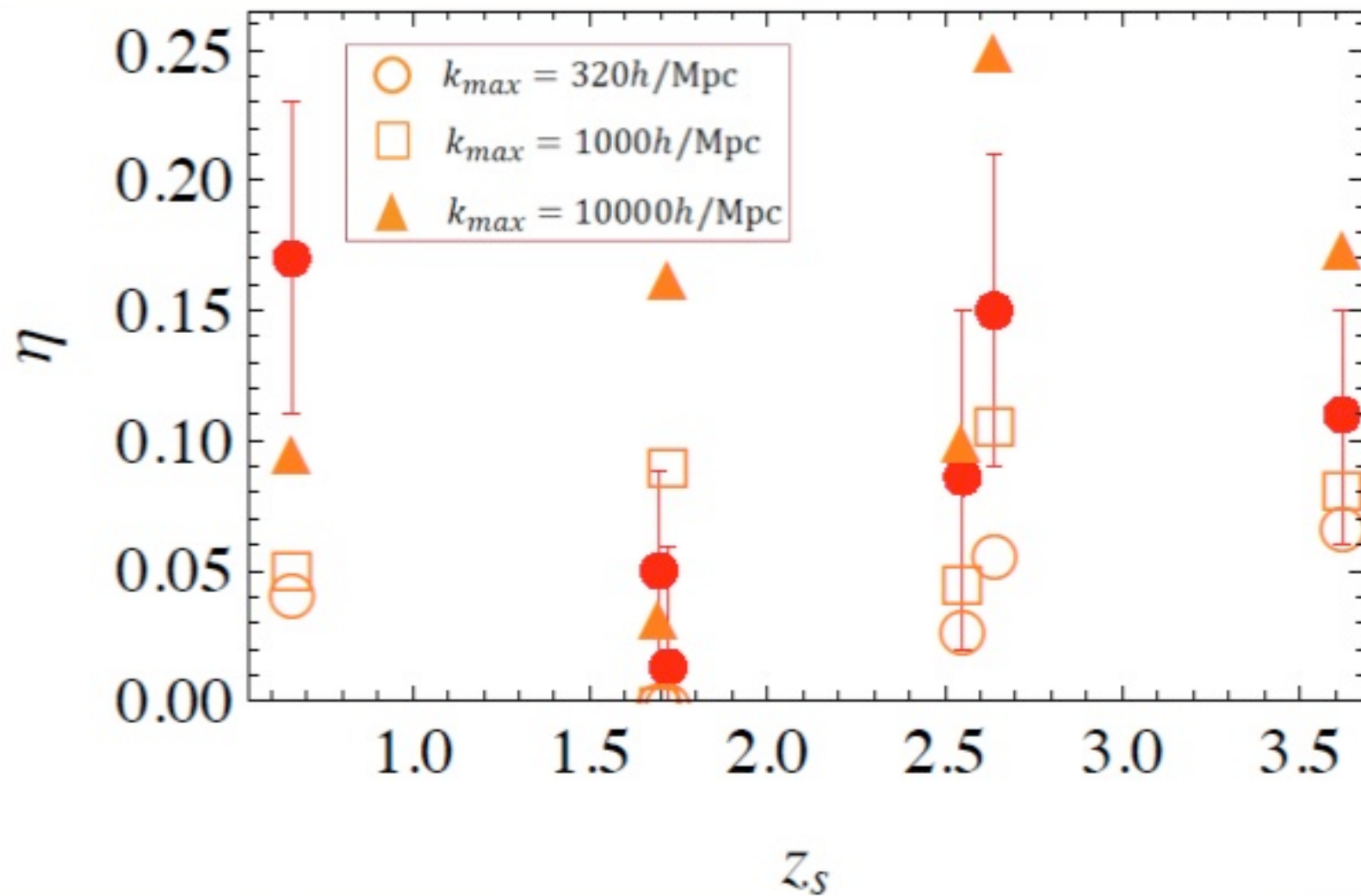
Astrometric shifts

$z_s=3$
 $z_l=0.5$

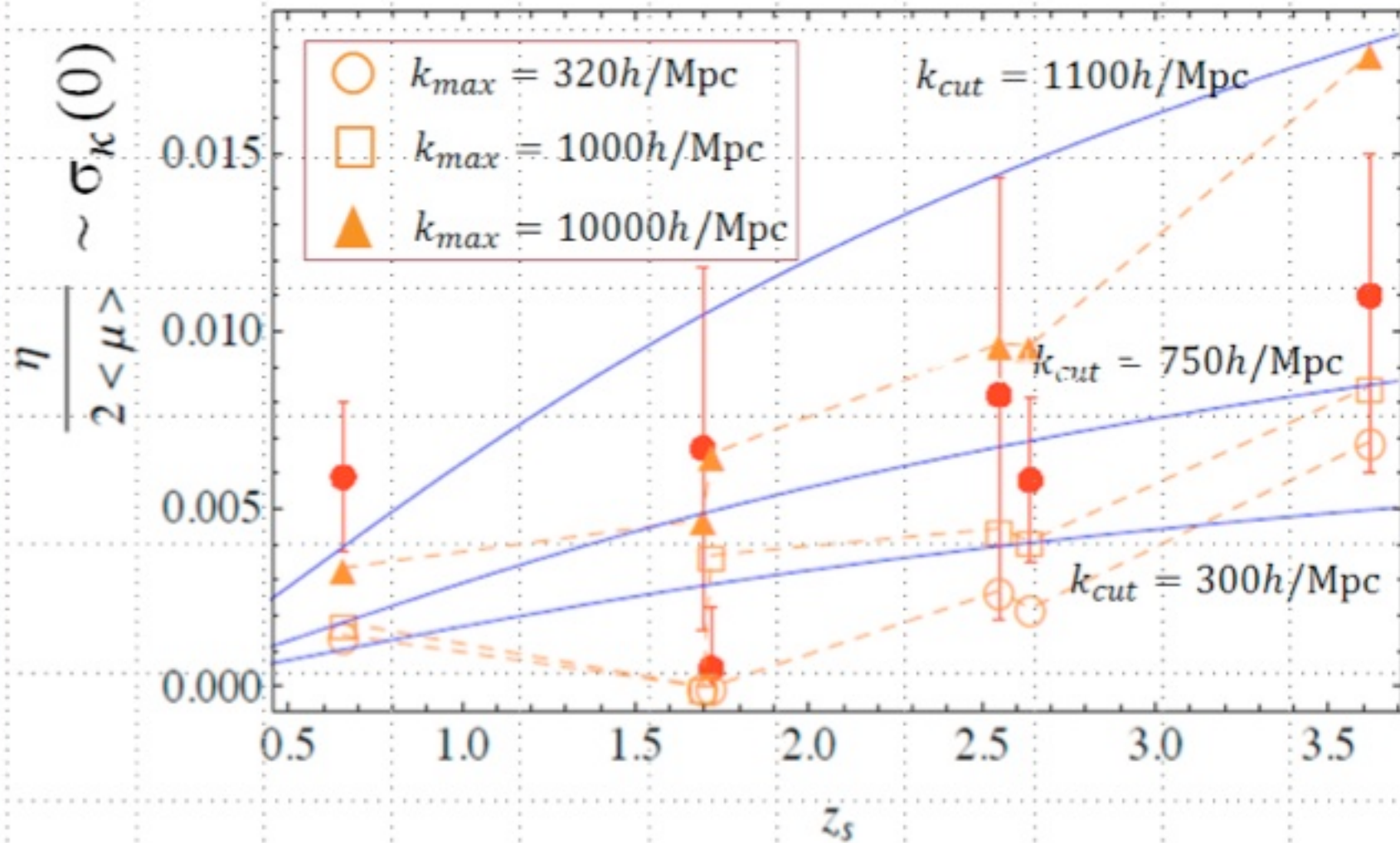


(Inoue & Takahashi 2012)

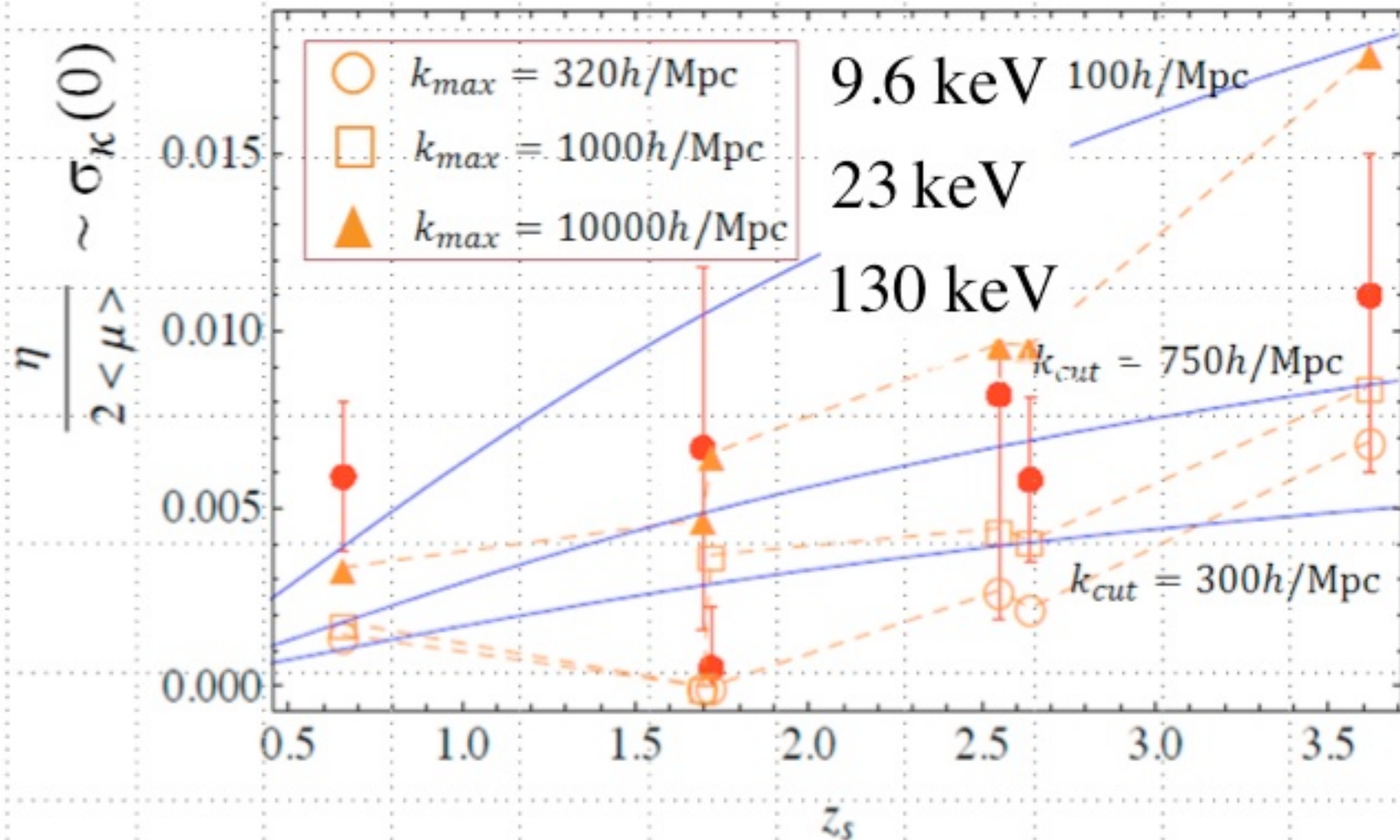
Result I



Result II



Result II





フラックス比異常は
視線方向のミニハロー
が主な原因である
可能性が高い

(Inoue & Takahashi 2012)

ミニハロー

- $<10^6$ 太陽質量の小さいダークハロー
- 小さすぎて星形成を持続的に行えない。
- どこまで小さいか？
- どのくらいあるのか？

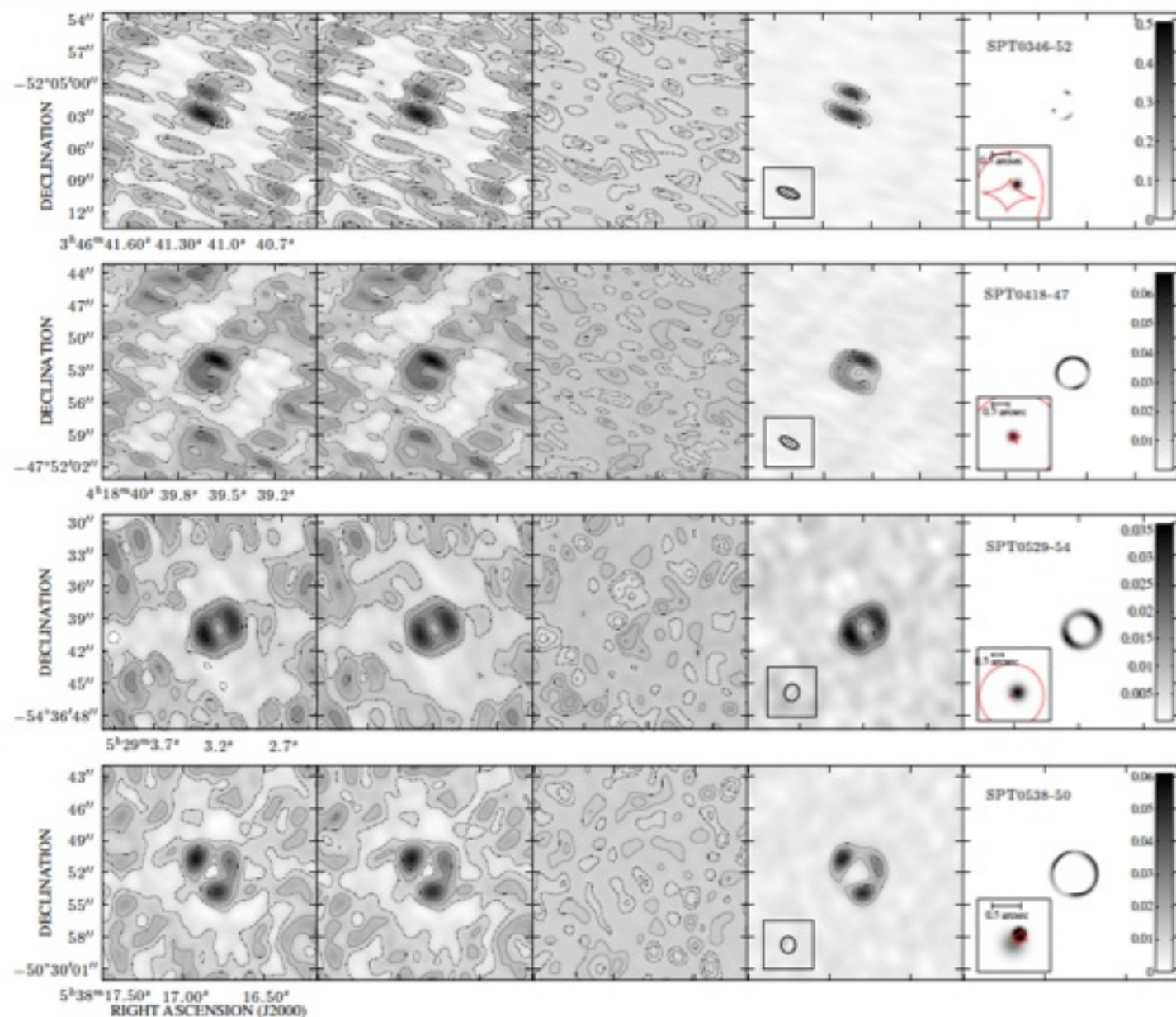
ALMA で何が分かるか？

DMの「温度」が分かる。

だろう。

サブハローか ミニハローか 分かる

だろう。



ALMA Cycle 0 Band 7 SPT selected lenses (2013 Hezaveh et al.)

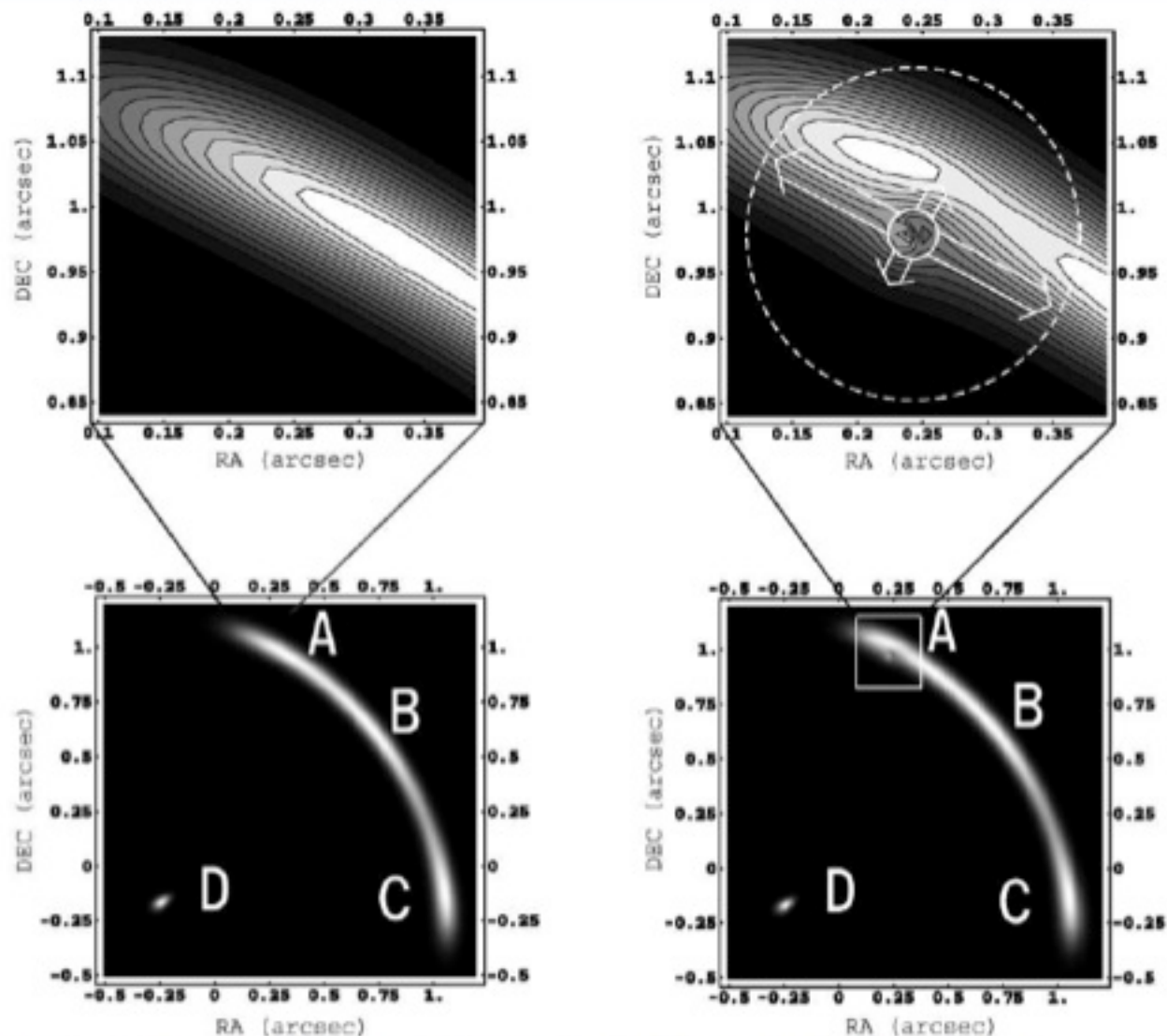


FIG. 1.— Simulated images of B1422+231 at submillimeter wavelengths without any perturbers (*left*) and with an SIS perturber (*right*) for a Gaussian circular source with a standard deviation $L = 2.5 \times 10^2$ pc. A tidally truncated SIS with a mass of $2 \times 10^8 M_\odot$ is put at the center of a thick circle (*top right*) near the A image. The dashed circle represents a circle with the tidal radius centered at an SIS perturber. The angular resolution is assumed to be 0.01 arcsec. Astrometric shifts in the tangential direction and those in the radial direction in the coordinates aligned to the shear are represented by arrows.

レンズ銀河内 レンズ銀河より手前

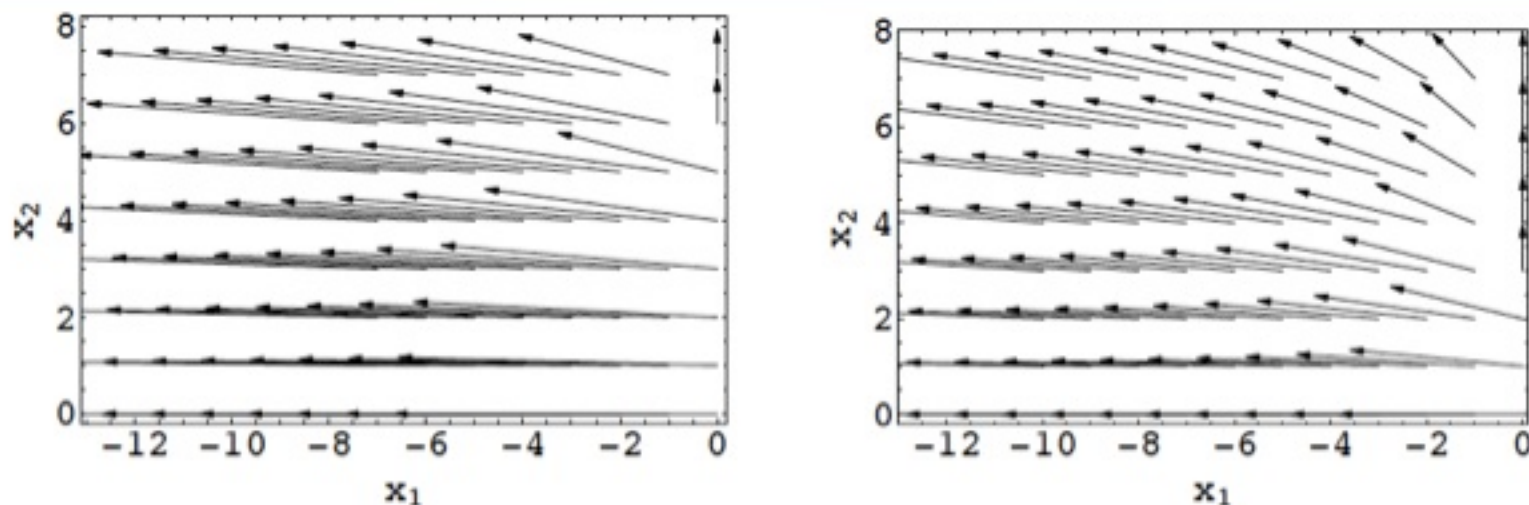
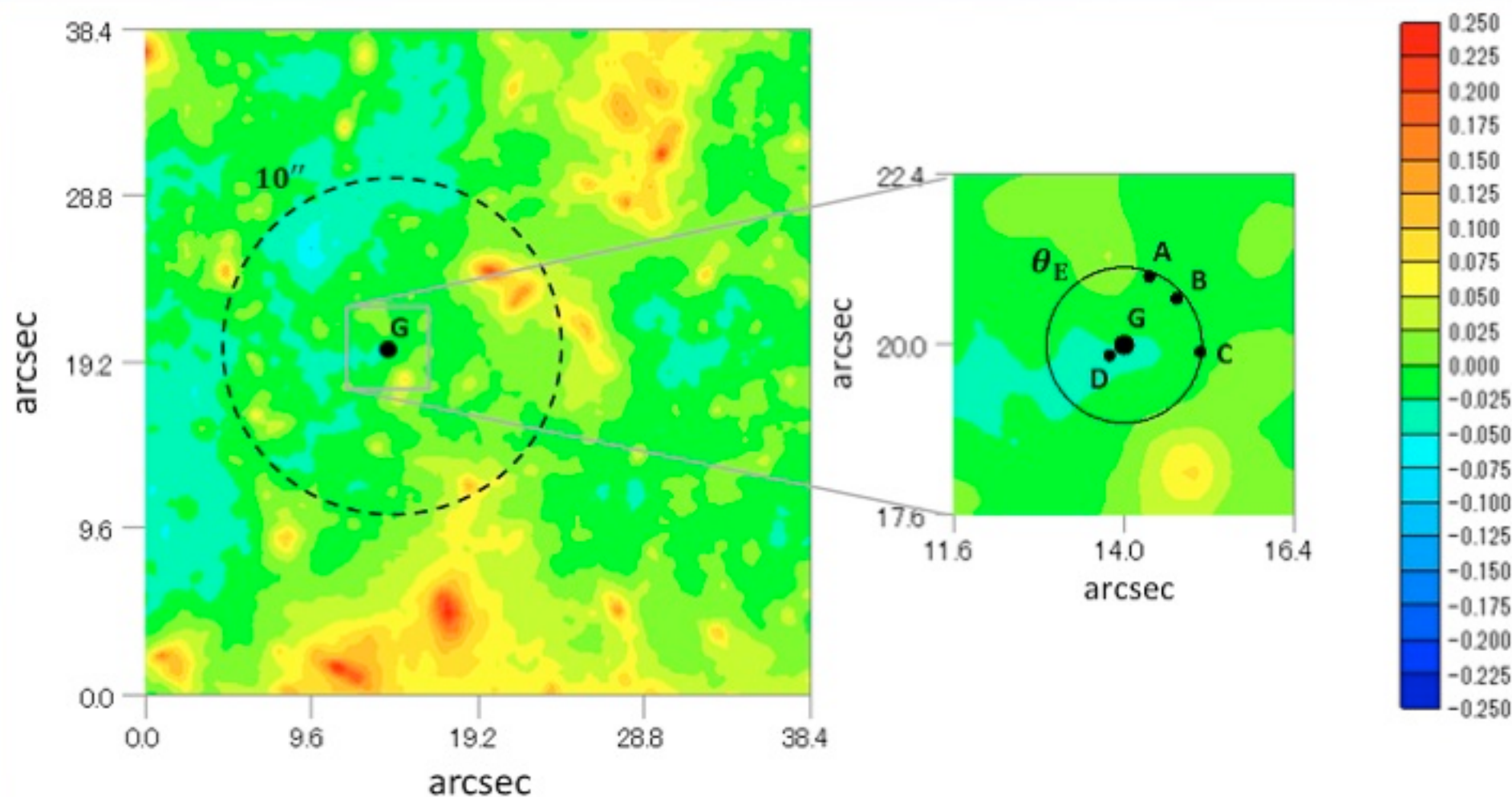


FIG. 2.— Astrometric shifts $\Delta \mathbf{x}$ for an SIS perturber in a macrolens halo for $\beta = 0$ (*left*) and those for an SIS perturber in the foreground of a macrolens for $\beta = 0.5$ (*right*) with respect to images for an unperturbed macrolens in the image plane (x_1, x_2) aligned to the shear. Both horizontal and vertical axes are normalized by the Einstein radius θ_{Ep} of an SIS perturber. We adopt a convergence $\kappa = 0.38$ and a shear $\gamma = 0.47$ for the macrolens.

(Inoue & Chiba 2005)

Convergence map due to mini-halos



(Takahashi & Inoue 2013)

観測の戦略

- 明るいサブミリ銀河レンズ&フラックス異常
- モデリングから像のシフトを測定。
($\sim 0.1\text{--}0.01''$ band 10?)
- シフトからサブハローとミニハローを区別。



まとめ

- フラックス比異常は視線方向のミニハローのレンズ効果だけで説明できる。
- ALMAでミニハローかサブハローか区別できる可能性あり。
- ALMAでDMの「温度」を測れる可能性あり。