

# 重力レンズの基礎と応用

大栗 真宗

(東京大 RESCEU/物理/Kavli IPMU)

slides available at:


<http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~oguri/lecture/2017yitp/>

2017/3/22-24 集中講義@京大基研

# 目次

1. イントロ+重力レンズの基礎

2. 強い重力レンズ

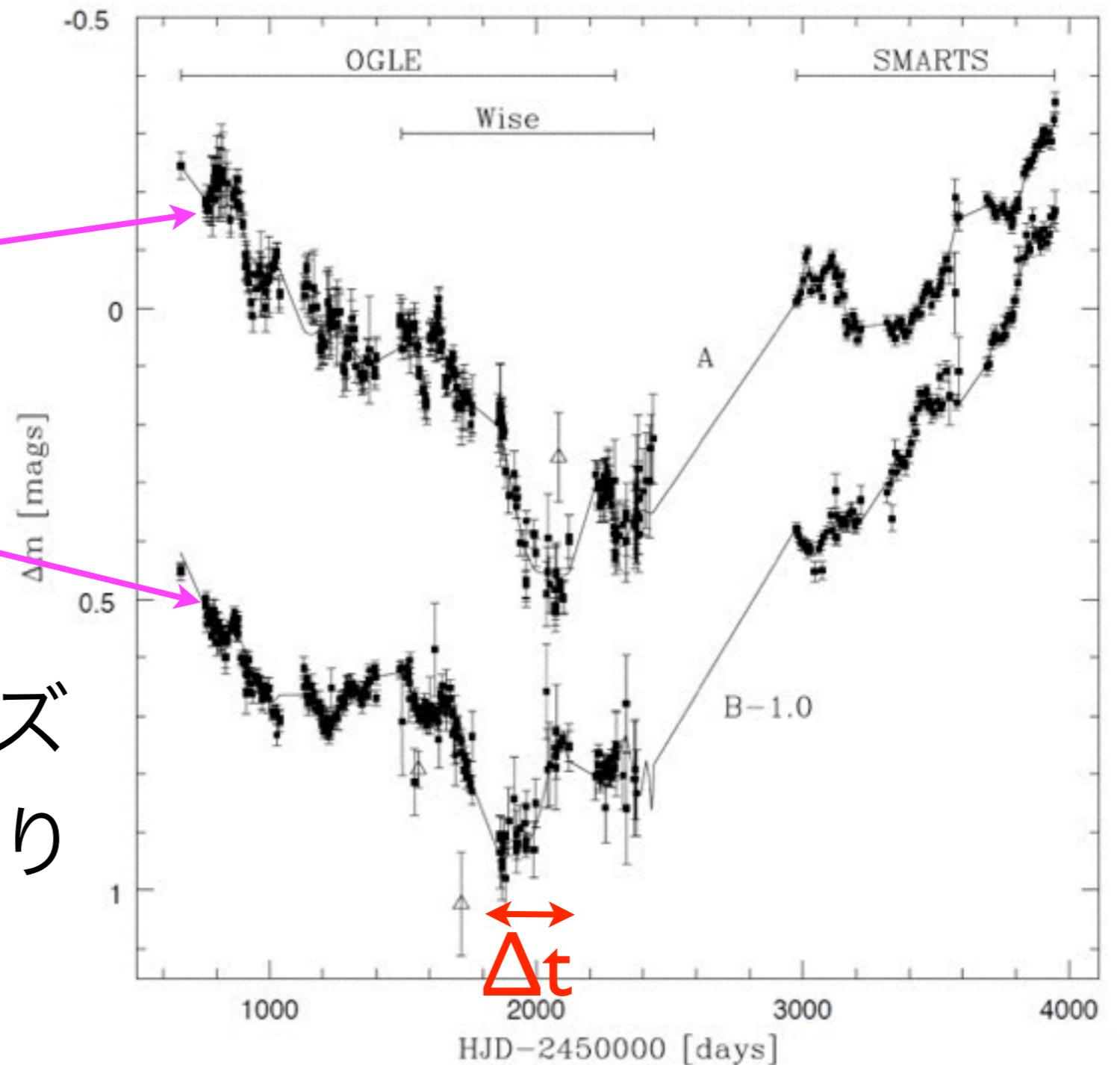
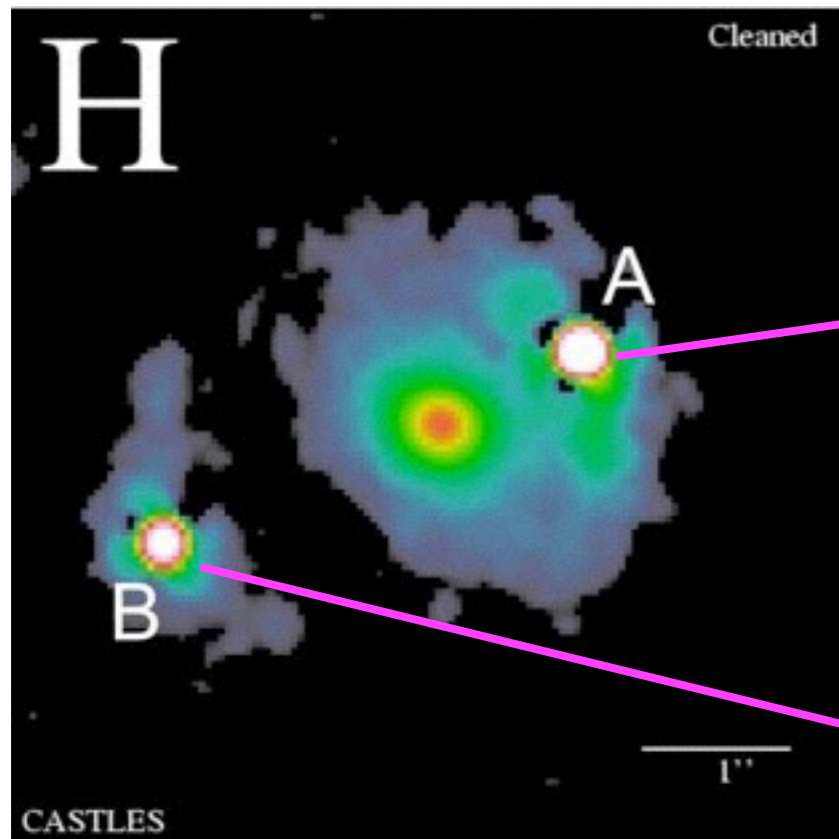
 3. 強い重力レンズの応用  
(時間の遅れ、サブストラクチャ、遠方銀河)

4. 弱い重力レンズ

5. 弱い重力レンズの応用

(銀河団質量分布、密度揺らぎ問題、HSCサーベイ)

# クエーサー複数像間の時間の遅れ



- クエーサー重力レンズ  
長期モニタリングより  
時間の遅れが測定可  
(~20の系ですでに測定)

Poindexter et al. (2007)

# 時間の遅れと $H_0$

- 時間の遅れは絶対距離スケール  $H_0$  を測定できる貴重な手法 (Refsdal 1964)

$$c\Delta t_{\text{obs}} = (1 + z_l) \underbrace{\frac{D_A(z_l) D_A(z_s)}{D_A(z_l, z_s)}}_{\text{観測 (}\theta\text{) + 質量モデル}} \left[ \frac{1}{2} |\vec{\theta} - \vec{\beta}|^2 - \psi \right]$$

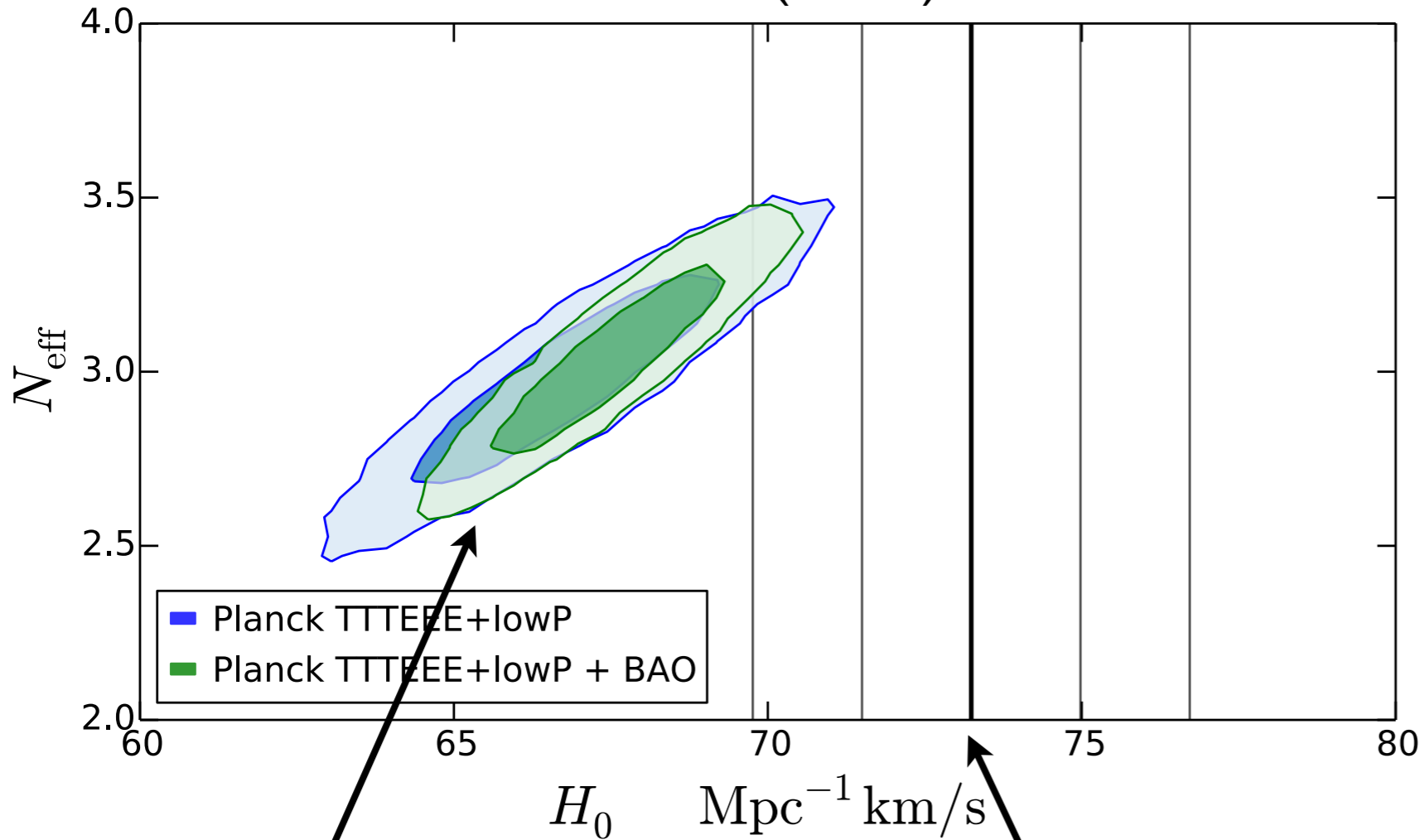
観測  
(典型的には  
数ヶ月)

観測 ( $\theta$ ) +  
質量モデル

三つの距離の比  
 $\propto H_0^{-1}$

# ハッブル定数 ( $H_0$ ) 問題

Bernal, Verde & Riess (2016)



CMBゆらぎ  
による $H_0$ 推定  
(Planck collab. 2016)

近傍距離はしごの  
 $H_0$ 測定 (Riess et al. 2016)

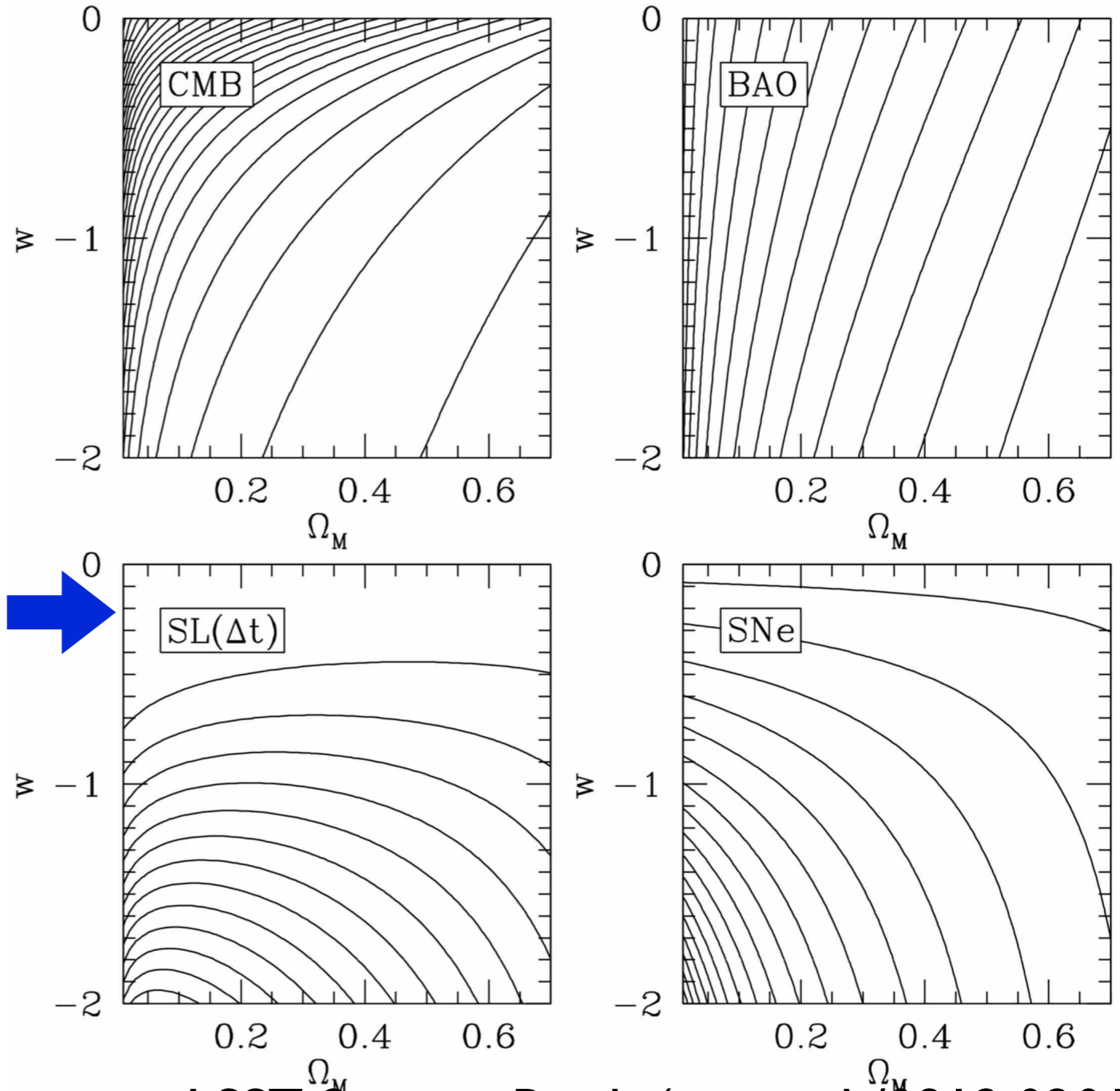
- 近傍 ( $h \sim 0.73$ ) とCMB ( $h \sim 0.68$ ) の $H_0$ の矛盾 ( $\sim 3\sigma$ 程度)
- 系統誤差？  
new physics？
- 精確な $H_0$ の測定は今後ますます重要！

# Time delay distance

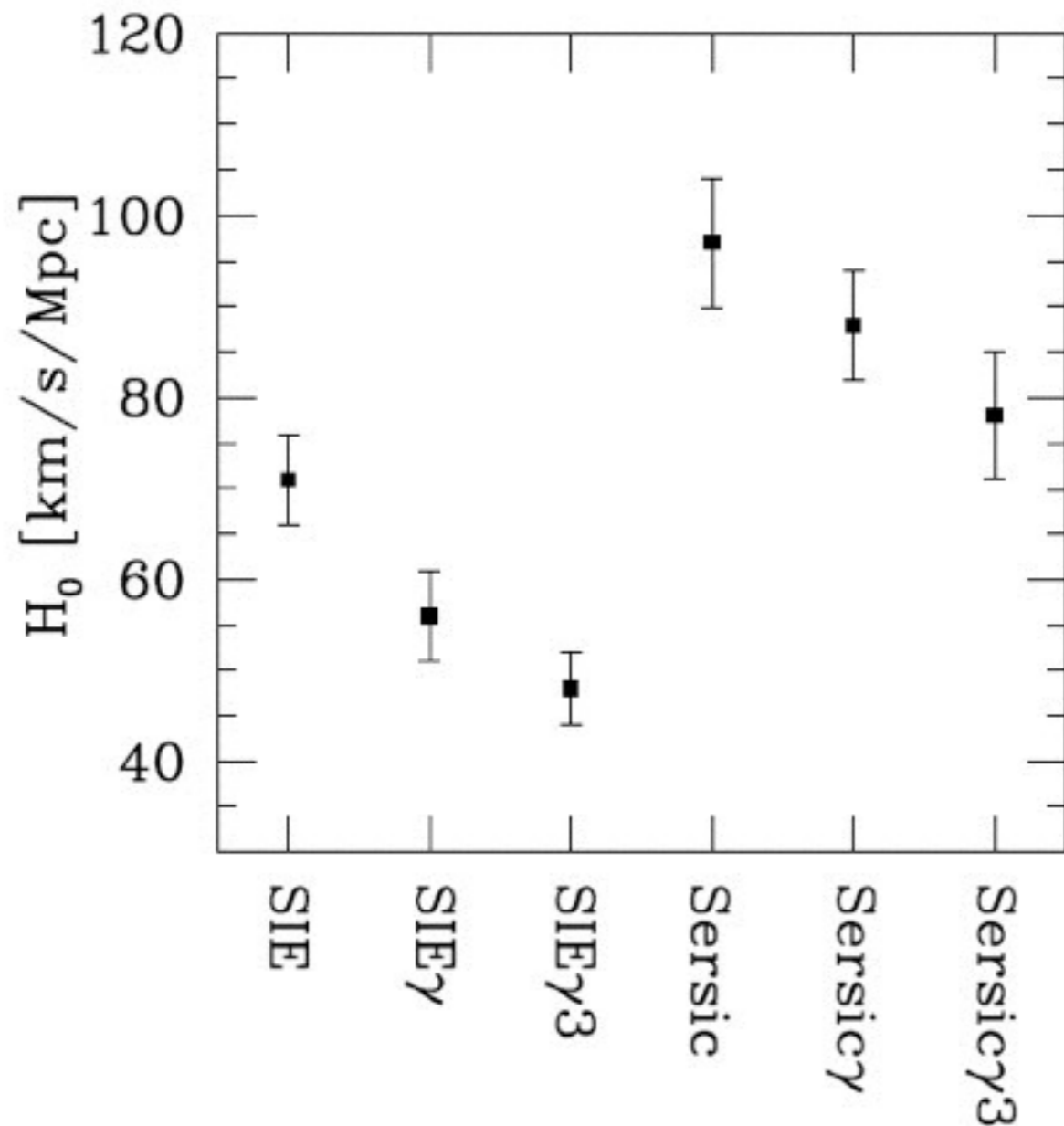
- 時間の遅れは三つの距離の比を測定 (time delay distance)

$$(1 + z_l) \frac{D_A(z_l) D_A(z_s)}{D_A(z_l, z_s)}$$

- 他の宇宙論パラメータ依存性もある
- 他の距離測定法と比べても相補的



# 困難: 質量モデルの不定性



(仮定した質量モデルの名前)

- 四重像クエーサー重力レンズ PGI115+080 の質量モデリング (*glafic*)
- 最終的な $H_0$ の制限は仮定する質量モデルに非常に強く依存する

# どうやって克服するか

## (1) 「golden lens」方式

多くの観測的制限 (速度分散、ホスト銀河...)  
を使い個々のレンズ天体に対しポテンシャル  
を精密に決め  $H_0$  測定

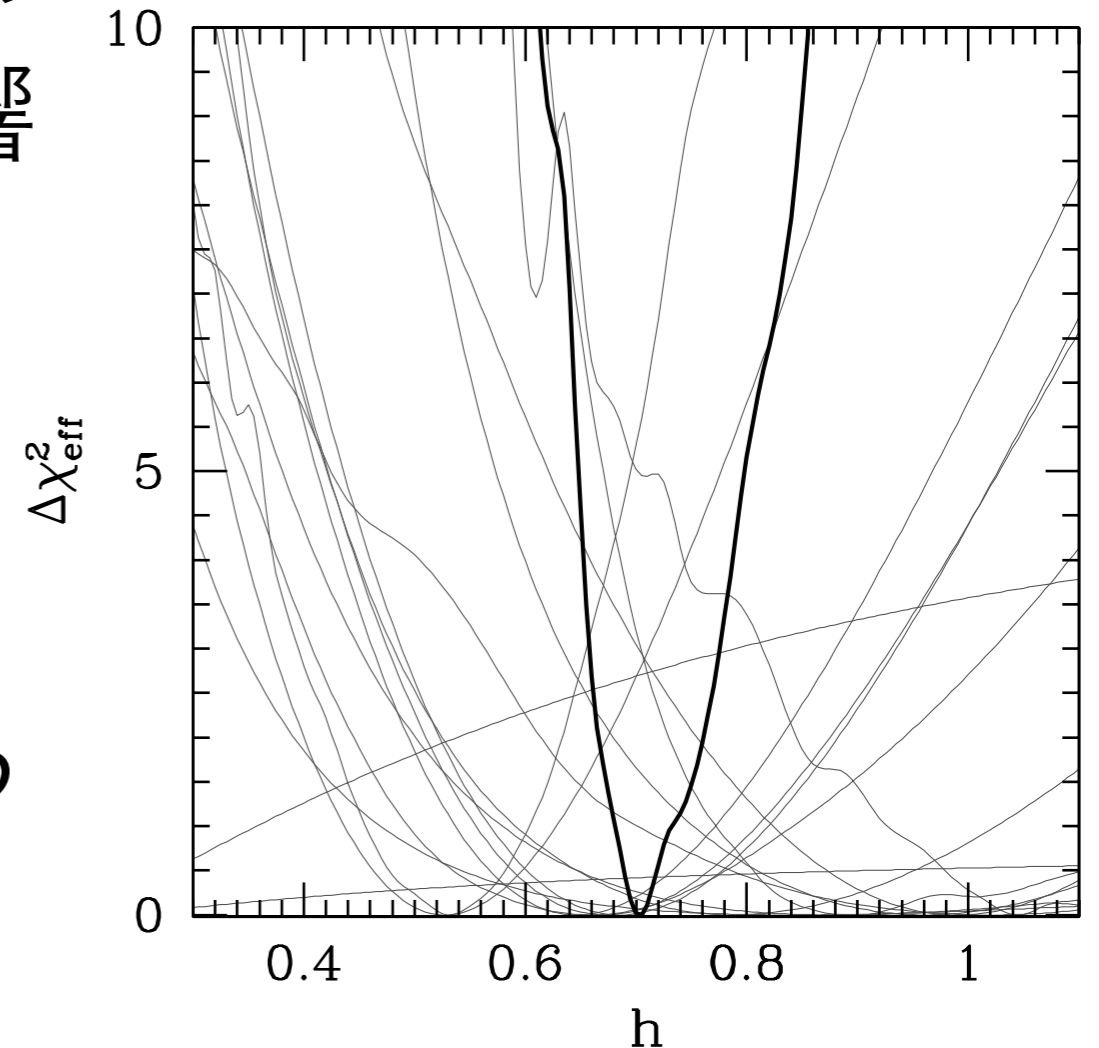
## (2) 「ensemble of lenses」方式

多くのレンズ系を統計的に組み合わせ、レン  
ズポテンシャルの依存性を平均化することで  
減少させる、ないし見積もり  $H_0$  測定

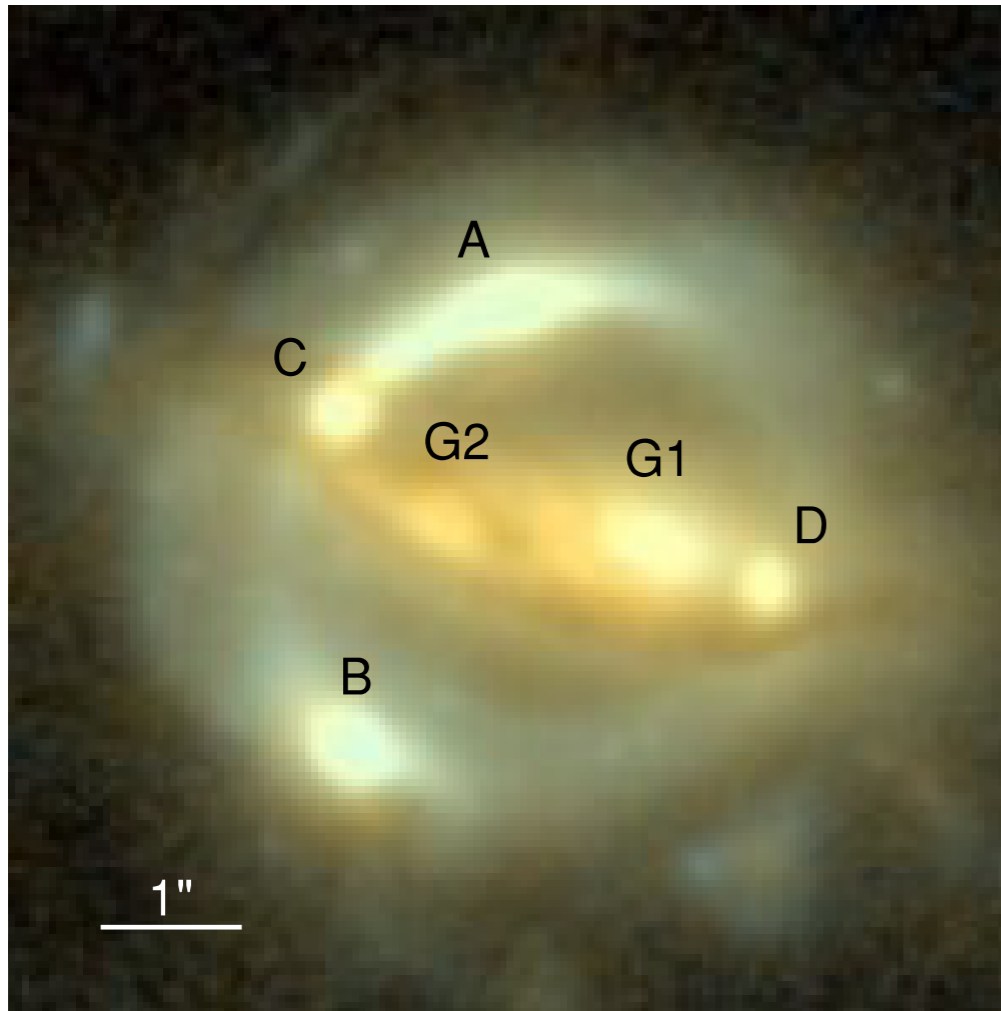


# 「Ensemble of lenses」方式

- アイデア: レンズポテンシャルの複雑さの時間の遅れの影響を定量化する「reduced time delay」を定義する
- 平均をとるとレンズポテンシャル依存性が消せるという意味で便利な量
- 16の系での時間の遅れの観測から  $H_0 = 68 \pm 6(\text{stat.}) \pm 8(\text{syst.}) \text{ km/s/Mpc}$



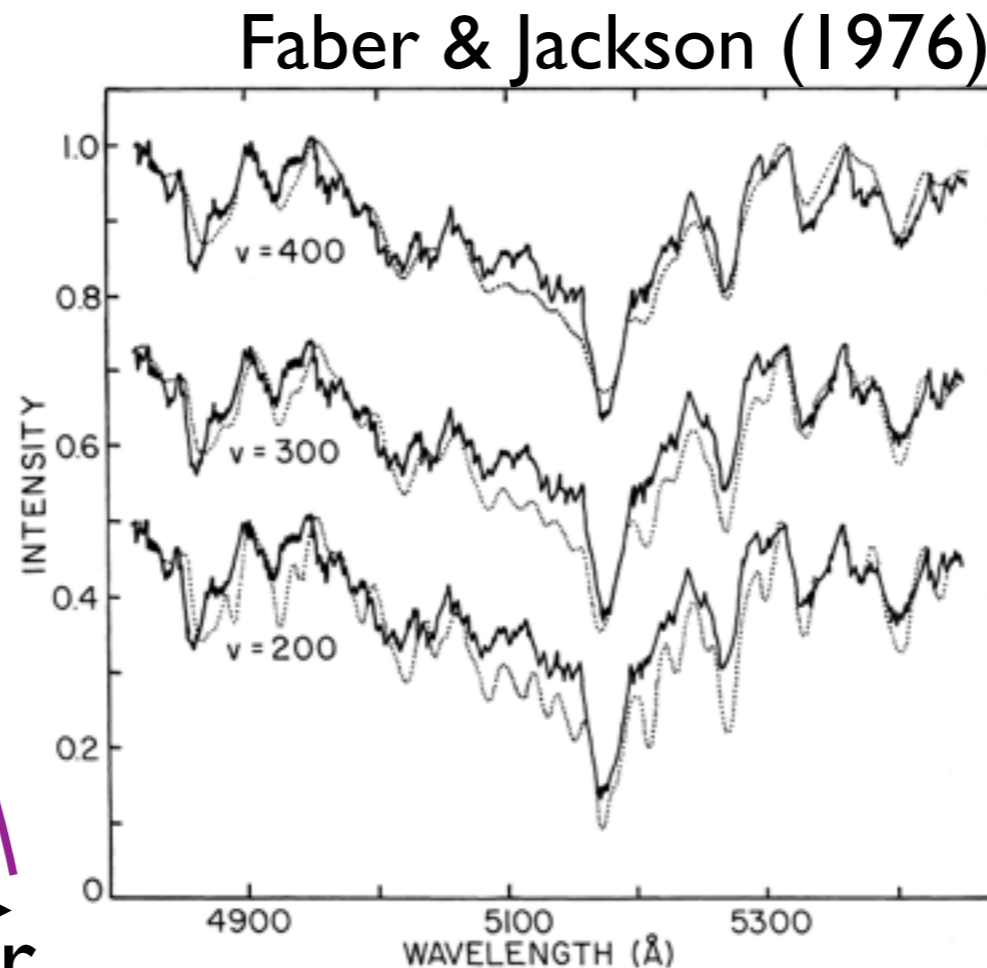
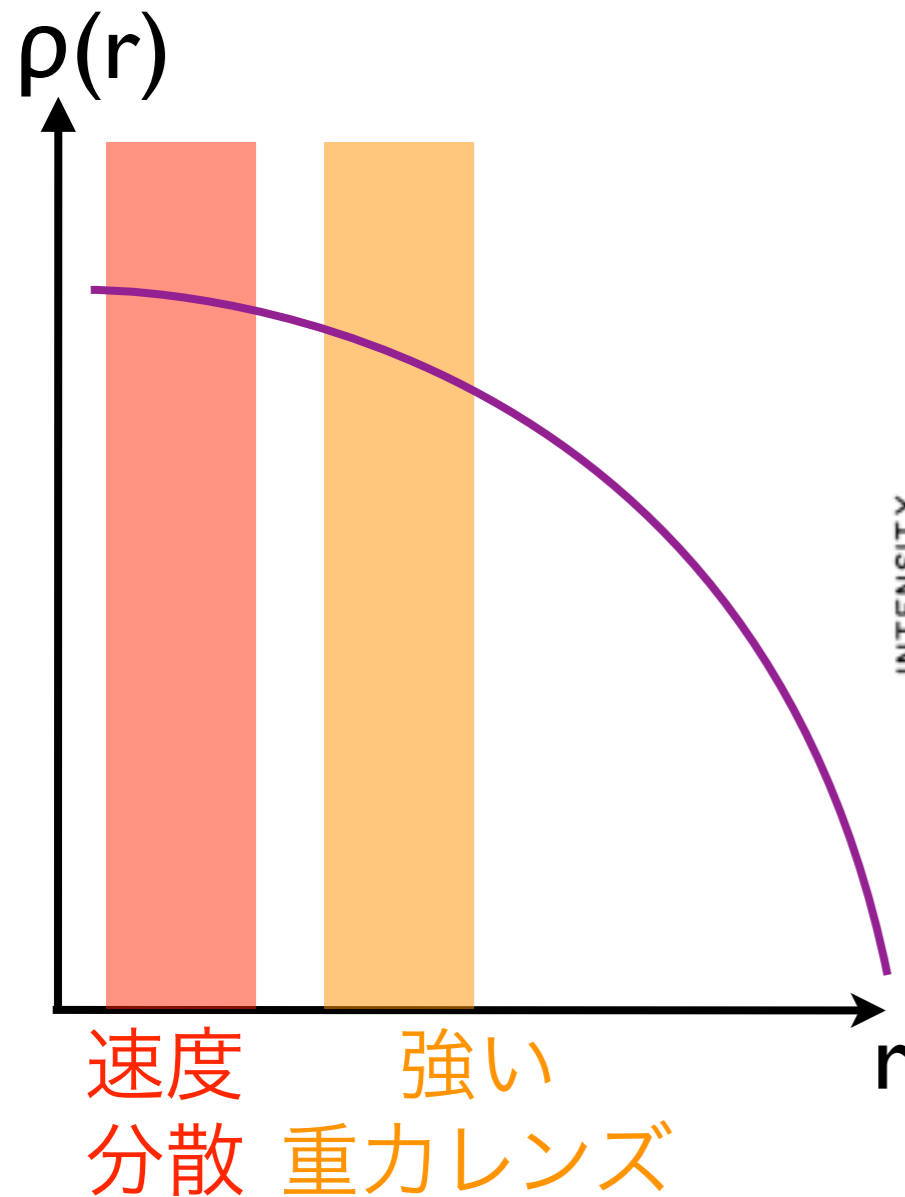
# 「golden lens」方式



BI 608+656 (Suyu et al. 2010)

- クエーサーの四重像に加え他の制限を足してポテンシャルを決める
  - レンズ銀河の速度分散
  - 母銀河 (アーク)
  - レンズ環境効果

# レンズ銀河の速度分散



スペクトルの幅から銀河の速度分散 (星の運動速度) 測定

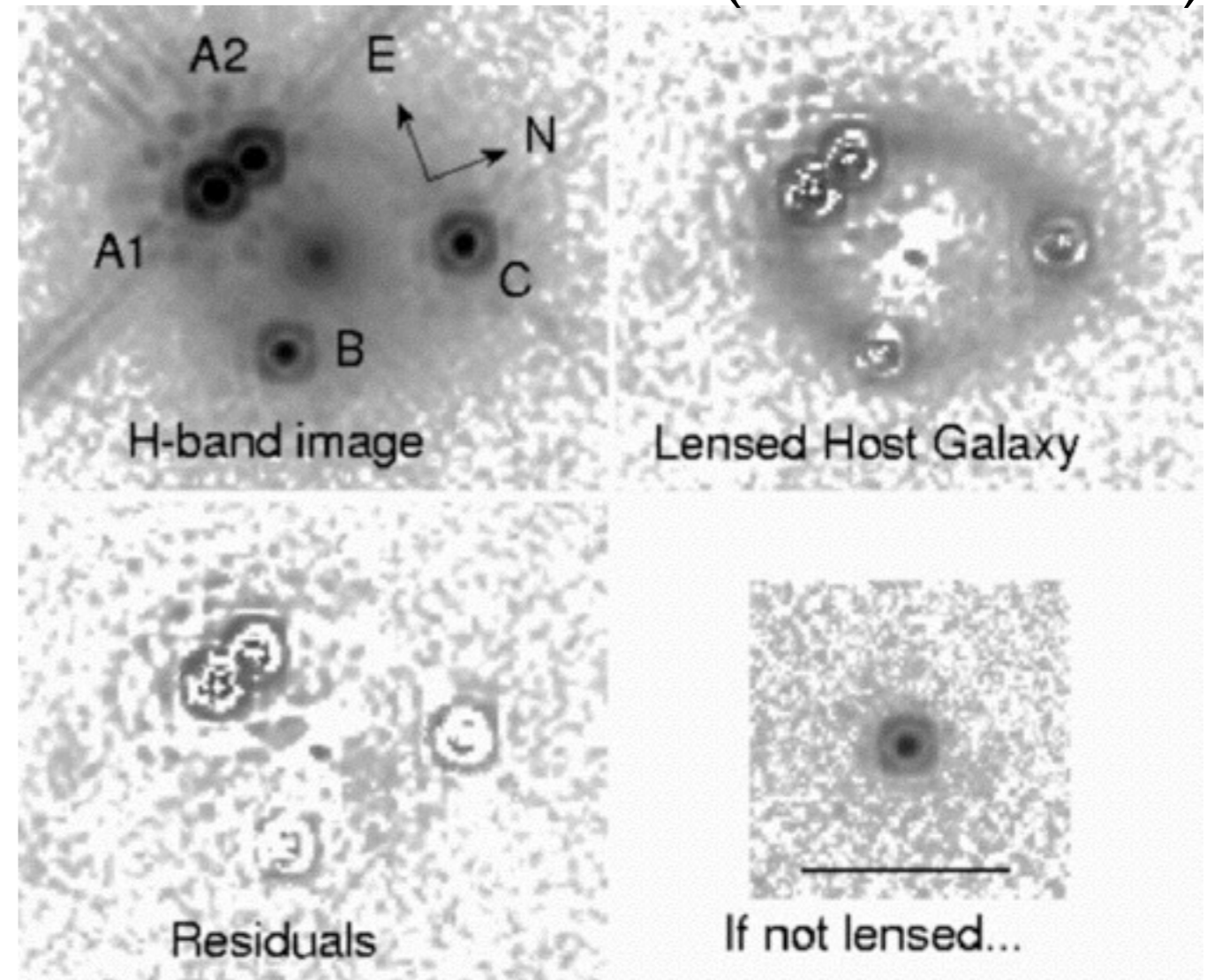
- 強い重力レンズ ( $\sim R_e$ ) よりも典型的に内側 ( $< 0.5 R_e$ ) の質量を測定  $\rightarrow$  動径密度分布を制限 (e.g., Treu & Koopmans 2003, Koopmans et al. 2006, ...)

# 重力レンズを受けた母銀河

- クエーサーは銀河の活動銀河核  
→ 母銀河も重力レンズ効果を受ける
- 広がった母銀河アークからレンズポテンシャルの構造をより強く制限できる

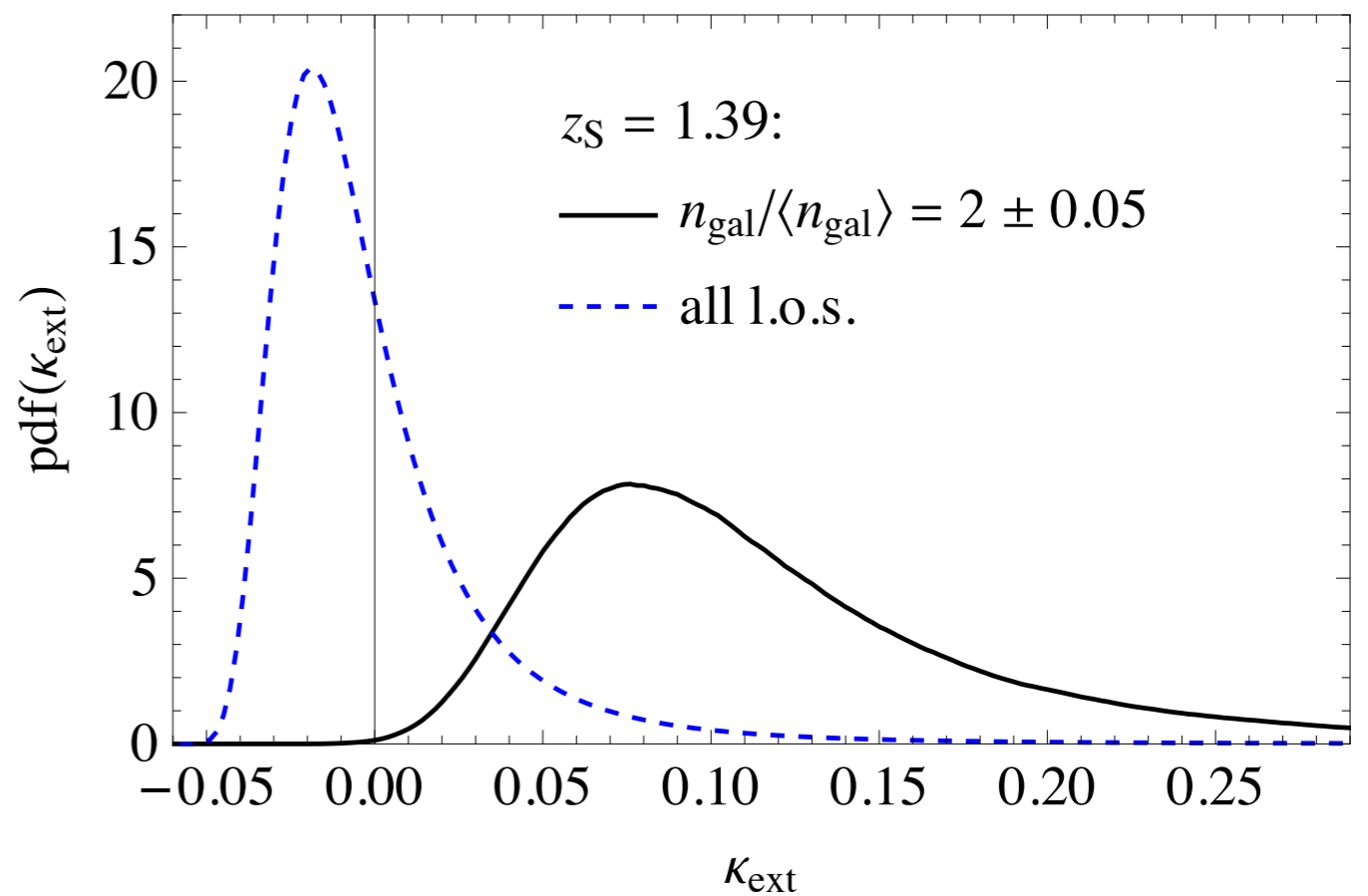
(e.g., Kochanek et al. 2001)

PG1115+080 (Kochanek 2006)

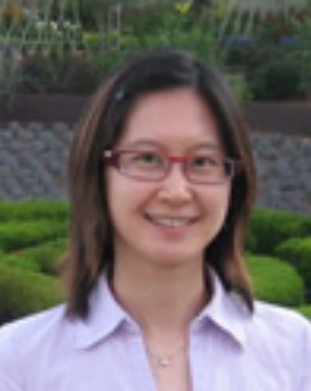


# レンズ環境効果 ( $K_{\text{ext}}$ )

- 視線方向の積分した密度の揺らぎ (方向による違い) の効果は convergence ( $K_{\text{ext}}$ ) で表される
- mass-sheet縮退により質量モデリングでは決定できない (現在最も重要な誤差要因の一つ)
- 複数のレンズ系で平均をとる、周辺の銀河の number counts から推定、等



Suyu et al. (2010)



PI: Sherry Suyu (MPA)

# H0LiCOW

- 複数の重力レンズクエーサーの詳細観測 (HST, Keck, Subaru, ...)、解析から  $H_0$  を測定
- 5つの系を観測、すでに3つの系の解析結果が出版されている

WFI2033-4723

RXJ1131-1231

HE0435-1223

HE1104-1805

BI608+656



analyzing

done

done

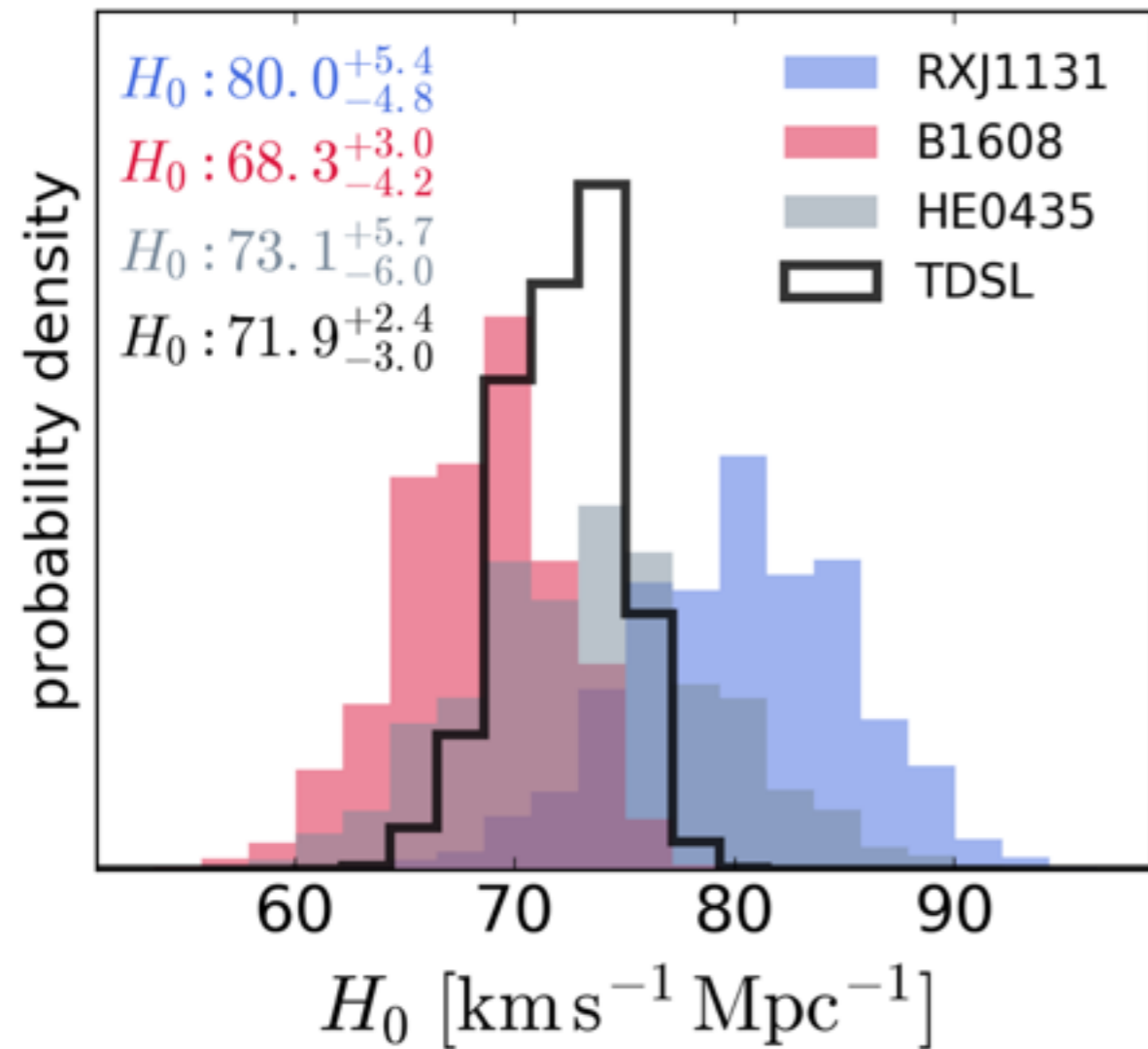
analyzing

done

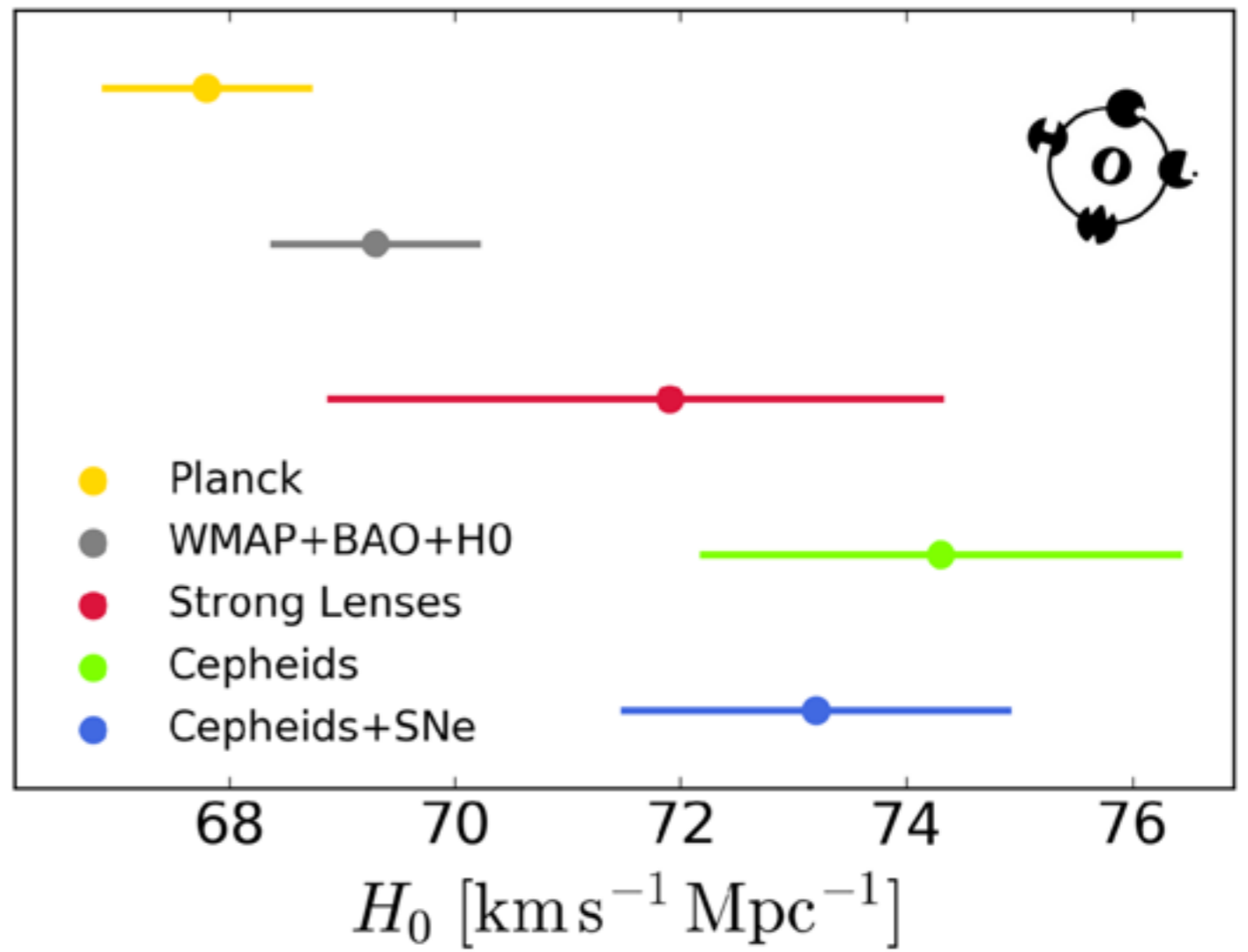
# 現在の制限

- ~4%で $H_0$ を制限、Planckよりも高めの値

$\Lambda$ CDM



$\Lambda$ CDM



Bonvin et al. (2017)

[flat, parameters:  $H_0, \Omega_m$ ]

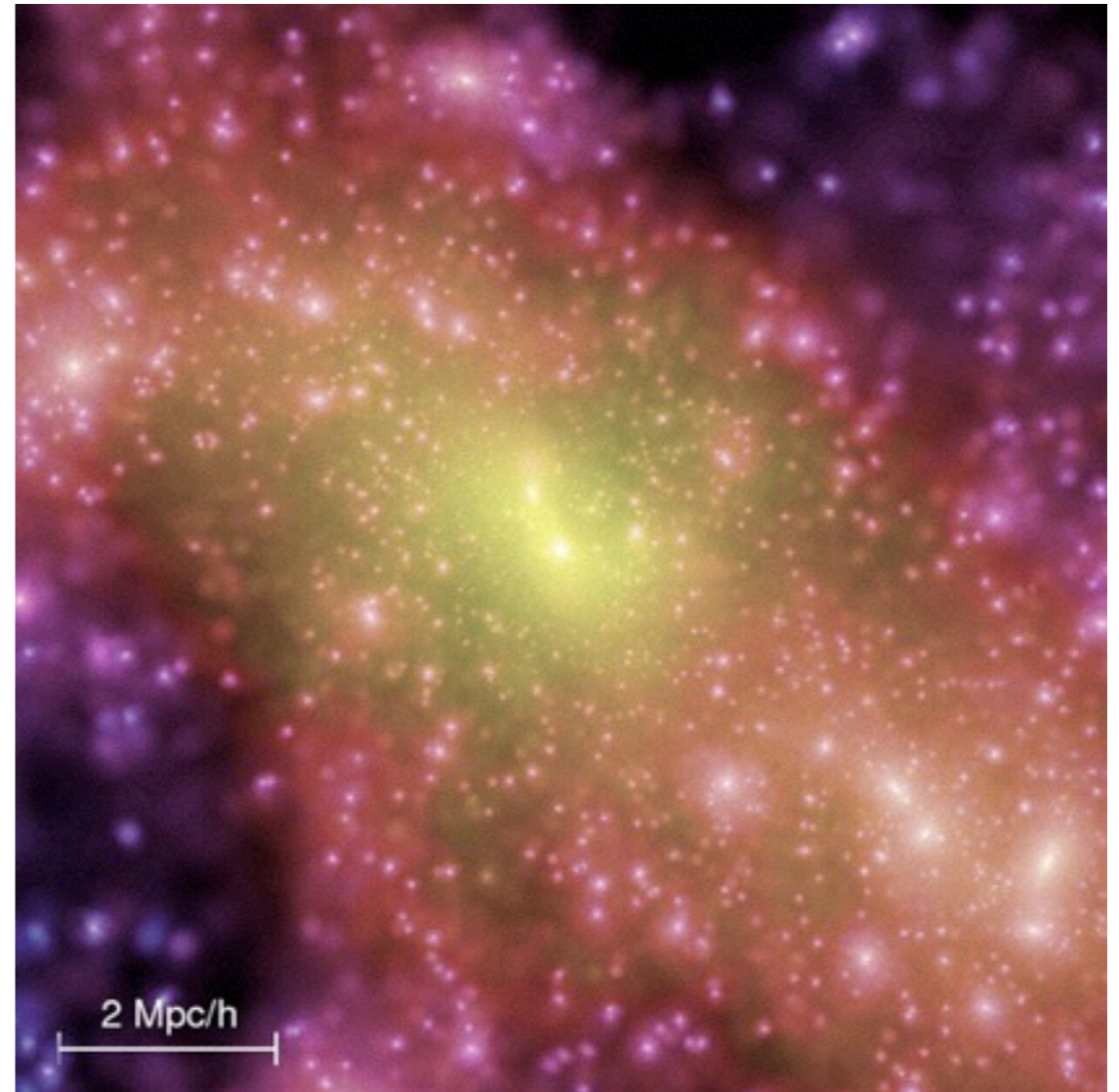
# 時間の遅れ: まとめ

- 時間の遅れは  $H_0$  を決定する貴重な手法
- 一番の困難は質量モデルとの縮退
- 詳細な質量モデリング、ないし適切な統計的取り扱いにより克服
- 現行、および将来のサーベイ観測 (HSC, DES, LSST, ...) により重力レンズ系の数も増えさらに強い制限が課せられると期待出来る



# ダークマターモデルの観測的検証

- 現在の標準理論（仮定）：  
冷たい無衝突ダークマター  
(collisionless CDM モデル)
- その性質の仮定はダーク  
マター分布に本質的に重要
  - NFW分布
  - 大きな非球対称性
  - 細かいサブ構造  
(substructure/subhalo)

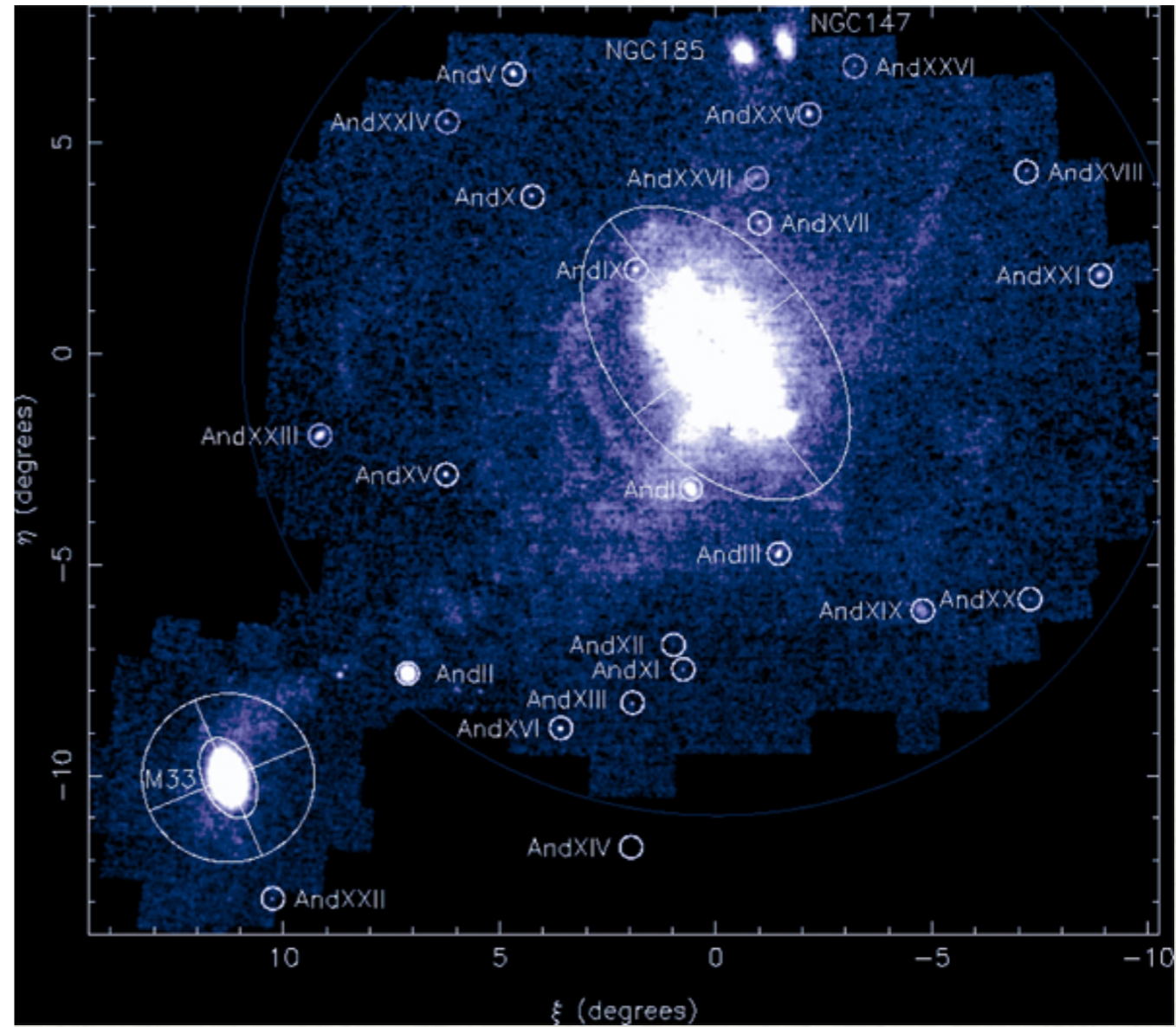


<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>

# 矮小/衛星銀河



Fornax 矮小銀河

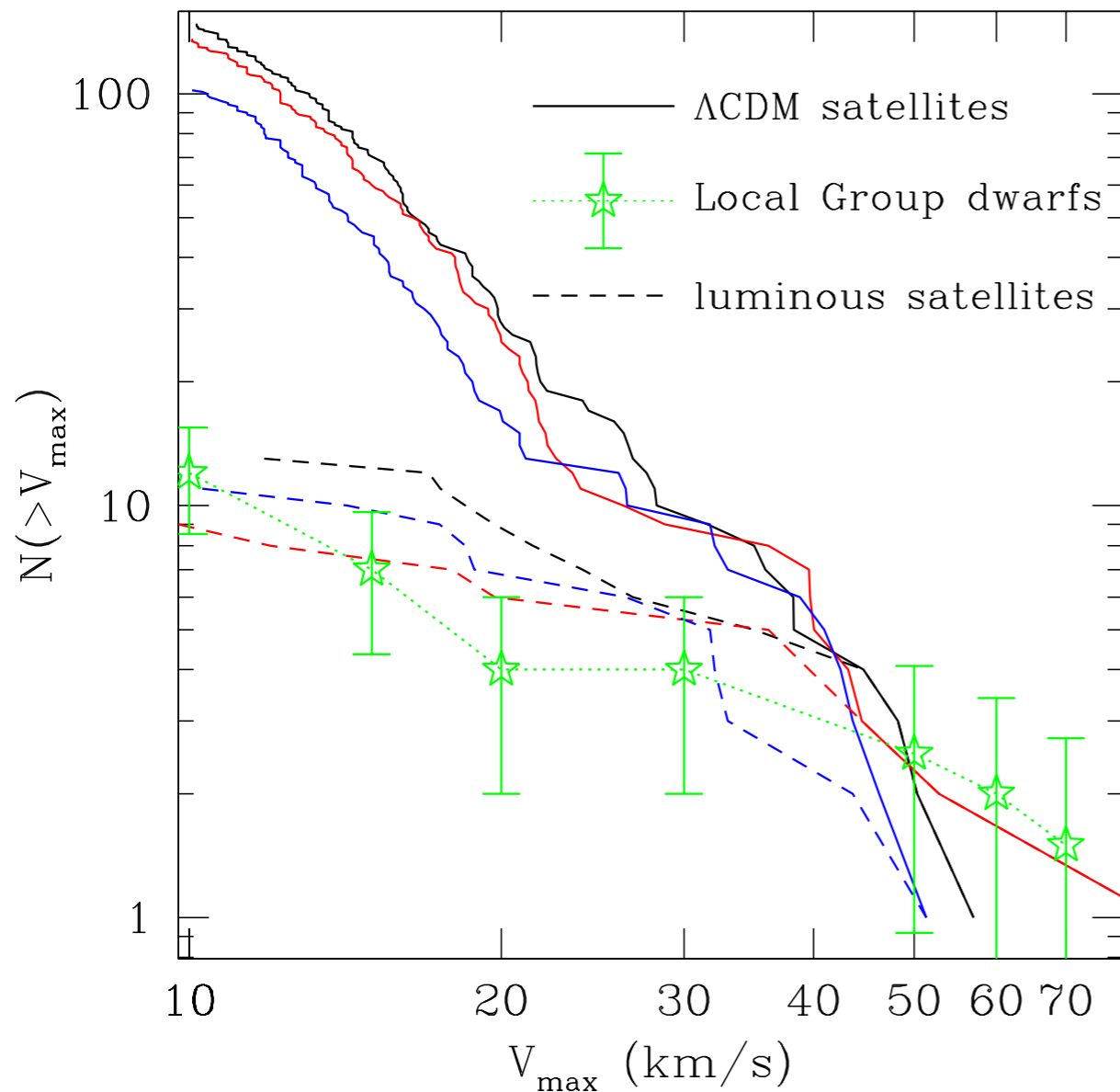


Pan-Andromeda Archeological Survey  
アンドロメダ銀河 (M31)

ΛCDMシミュレーションに見られるsubhaloに対応

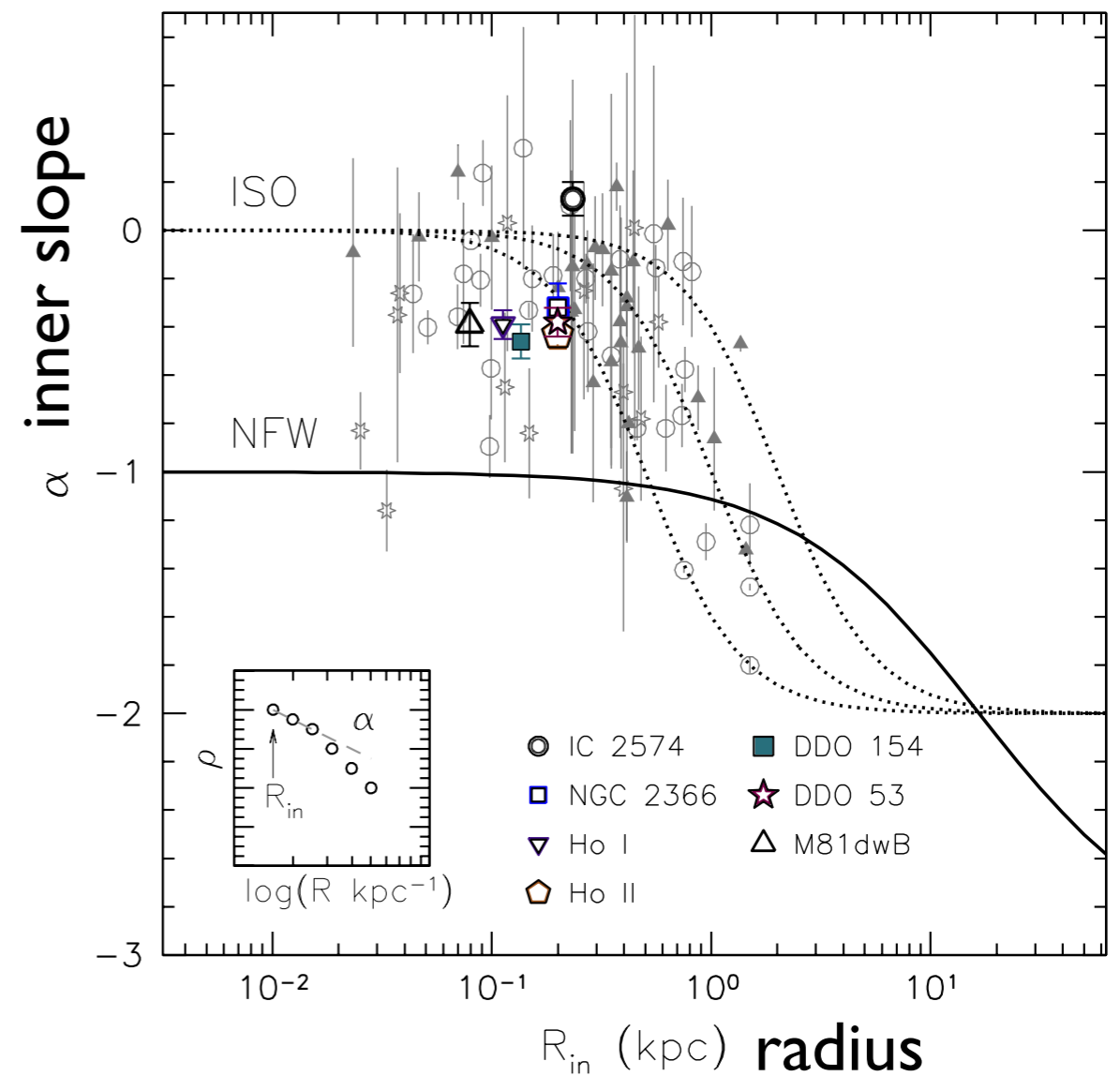
# $\Lambda$ CDMの小スケール問題 (I)

## missing satellite 問題



Kravtsov et al. (2004)

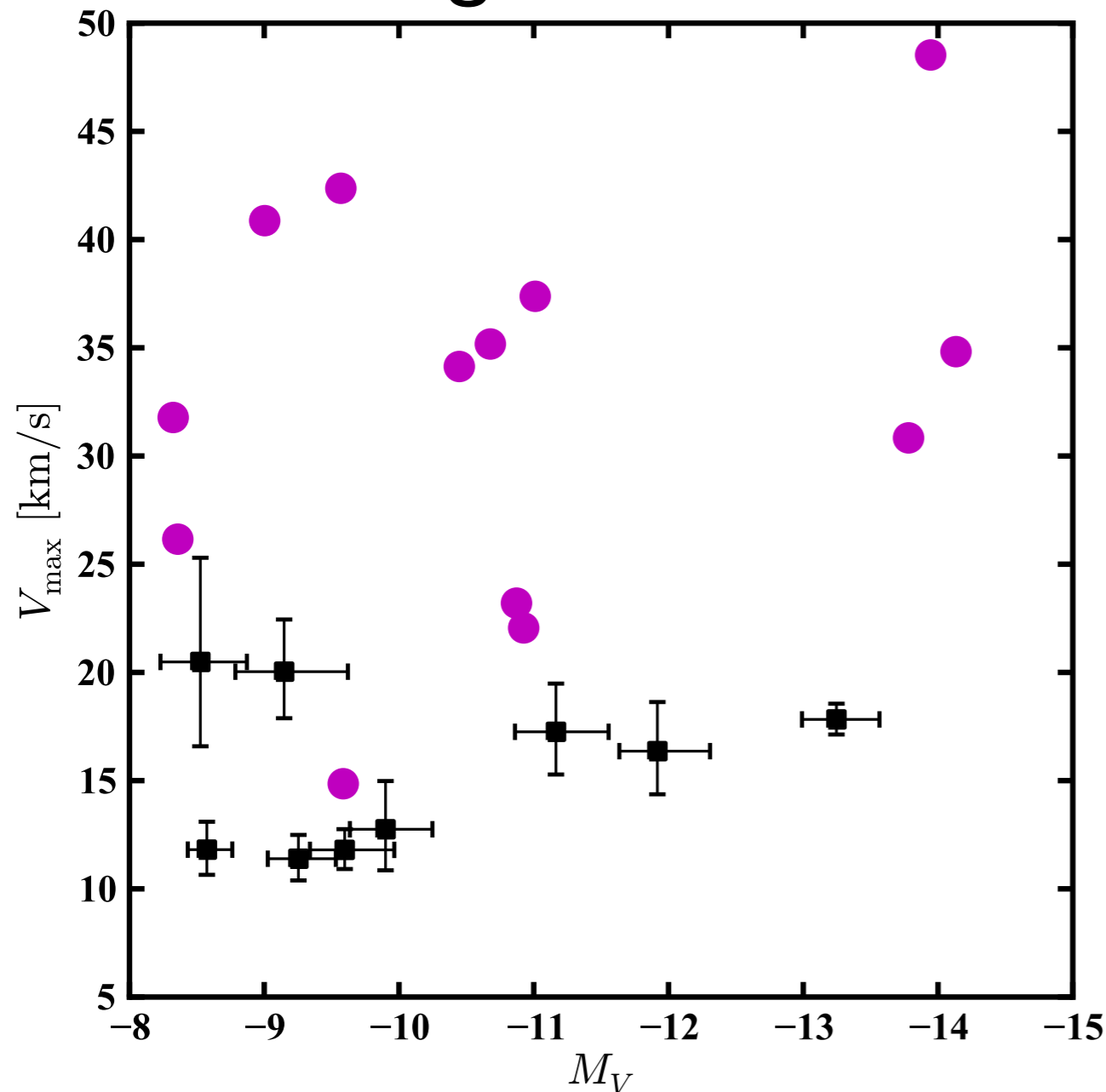
## core-cusp 問題



Oh et al. (2011)

# $\Lambda$ CDMの小スケール問題 (II)

## too-big-to-fail 問題



N体シミュレーションの  
予言 (abundance matching)

観測された衛星銀河

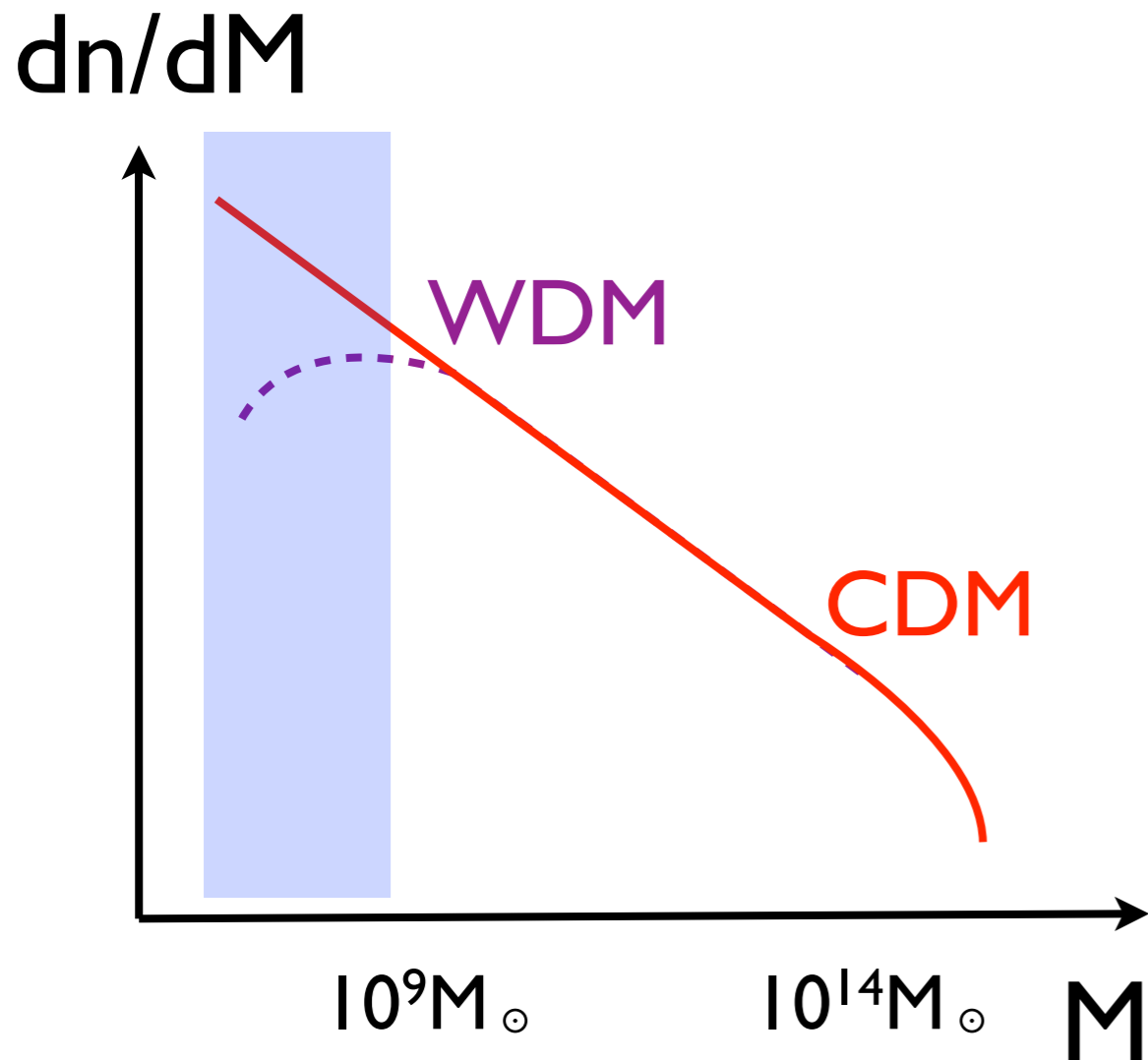
明るい衛星銀河が  
思ったほど重くない

Boylan-Kolchin et al. (2012)

# $\Lambda$ CDMの小スケール問題 (III)

- 様々な問題
  - 衛星/矮小銀河の数が少なすぎる?
  - 衛星/矮小銀河の中心密度分布がコア的?
  - 明るい衛星銀河が期待より軽い?
- 解決法
  - (1) ダークマターモデルを変える  
(例えば Warm Dark Matter)
  - (2) バリオンの物理によって説明する  
(フィードバック、最イオン化、星形成、)

# ハロ一質量関数



ハロ一質量関数

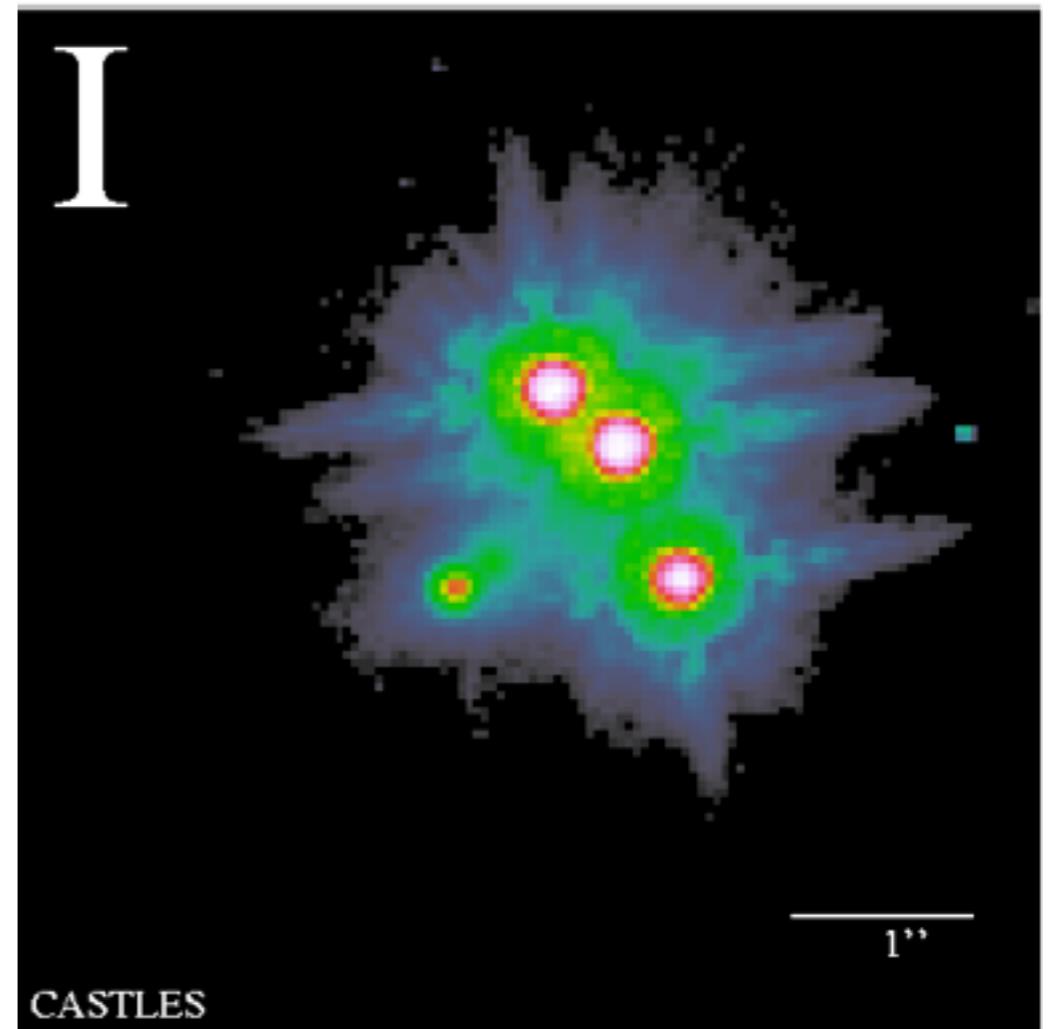
- CDMの描像が正しければハロ一質量関数は低質量まで冪で伸びている  
(質量関数  $dn/dM \sim M^{-2}$ )
- 非常に低質量ではポテンシャルも浅く星形成せず  
→ バリオン効果も小さい
- CDMの検証に非常に大切

# 重力レンズフラックス比異常

- クエーサー重力レンズの質量モデリングでは像の位置はよく再現
- ただし複数像間のフラックス比はしばしば再現できない

→ レンズ銀河内のサブ構造の証拠？

(Mao & Schneider 1998)



BI422+23I (CASTLES webpage)

# なぜフラックス比？

- 曲がり角は摂動に対し線形の寄与

$$\kappa \rightarrow \kappa + \delta\kappa$$

$$\alpha \rightarrow \alpha + \delta\alpha$$

- 増光率はもう少し複雑

$$\mu^{-1} = (1 - \kappa)^2 - \gamma^2$$

$$\mu^{-1} \rightarrow \underline{\mu^{-1}} - 2(1 - \kappa)\delta\kappa - 2\gamma\delta\gamma$$

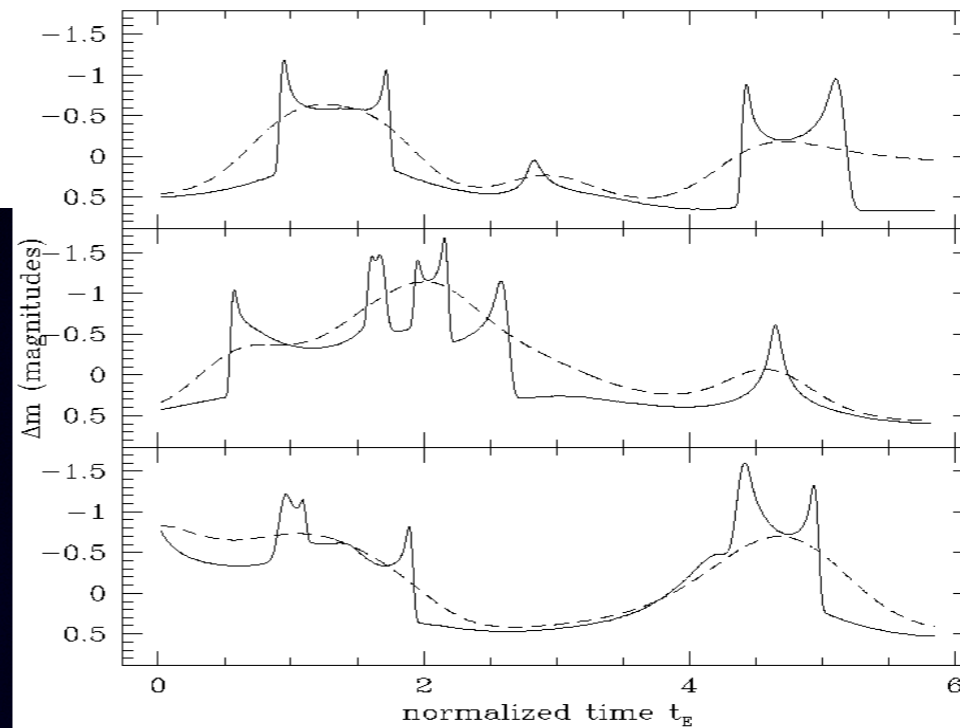
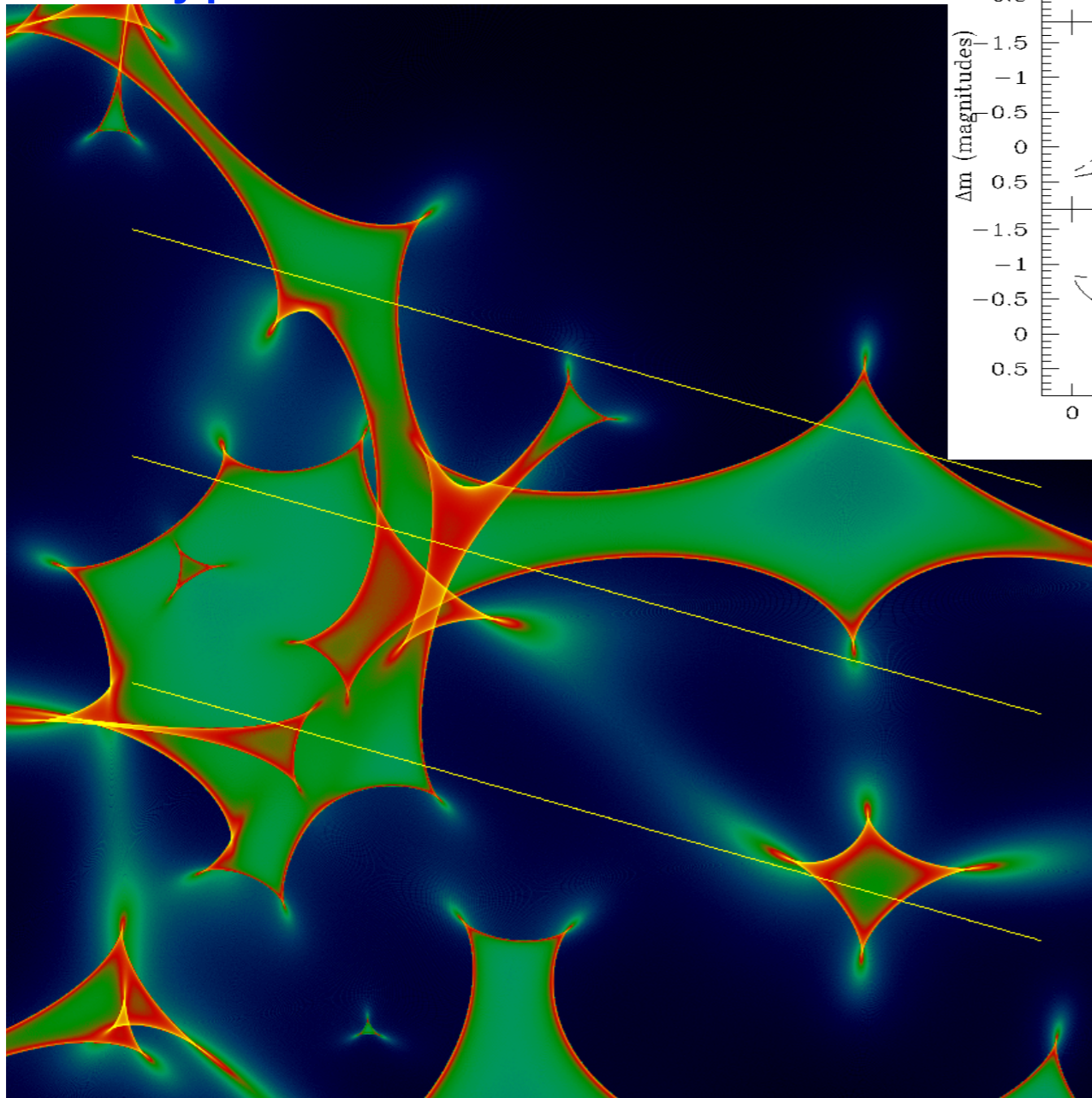
高増光率の像では≪1

小さい摂動が大きな効果を生みうる



# Quasar microlensing

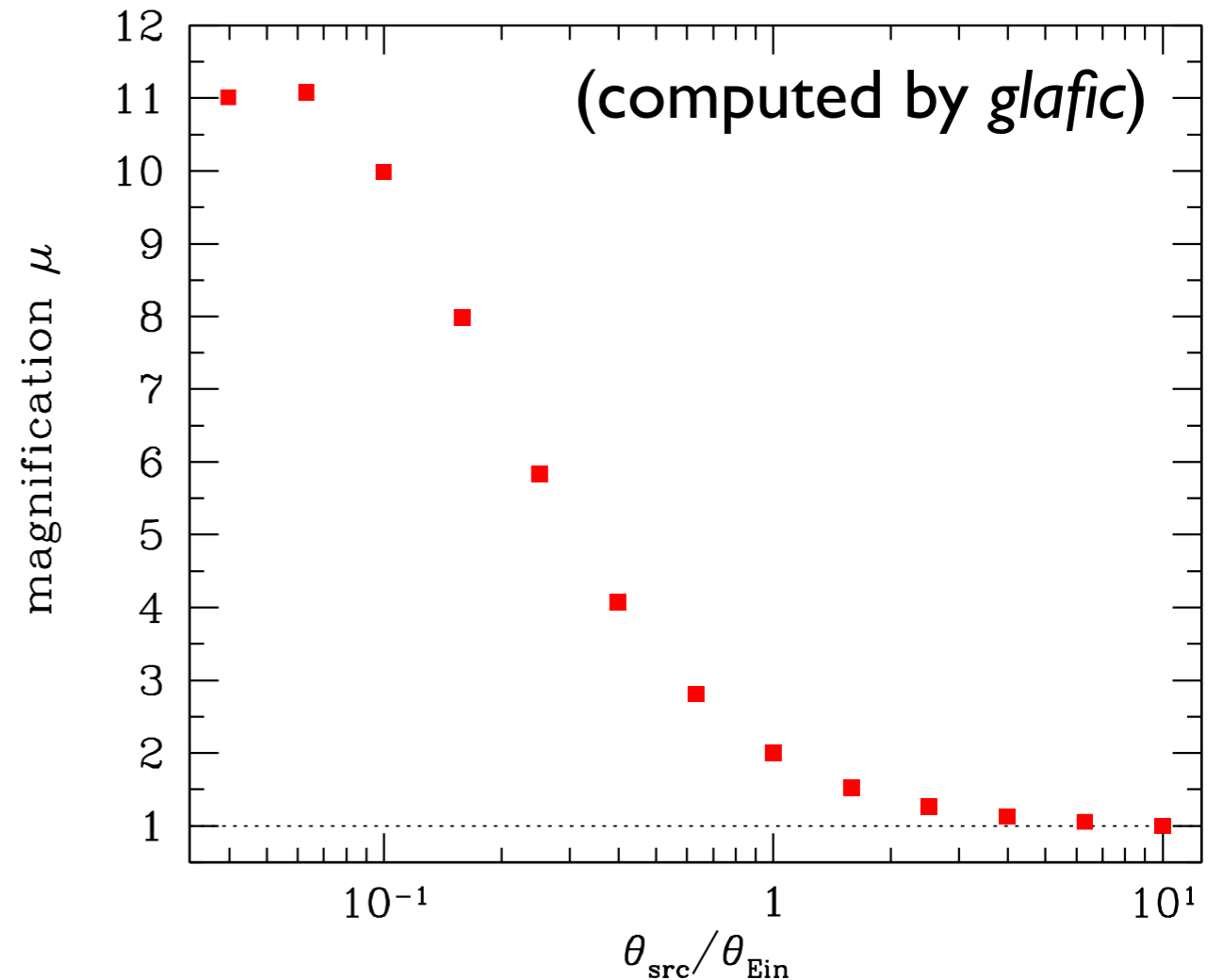
Quasar microlensing:  
typical simulations



レンズ銀河内の  
の星でさえも  
フラックス比  
を変えうる

# 増光率のサイズ依存性

- 大きく広がったソースに対しては増光率は小さい (表面輝度保存)
- ソースサイズ  $\theta_{\text{src}} < \theta_{\text{Ein}}$  が重力レンズによる効率的な増光に必要



point mass レンズ

Sersic ソース  $\theta_{\text{src}} = R_e, n=1$

ソース位置  $\beta/\theta_{\text{Ein}} = 0.1$

# クエーサーの放射領域

- 異なる波長の光は異なる領域からくる

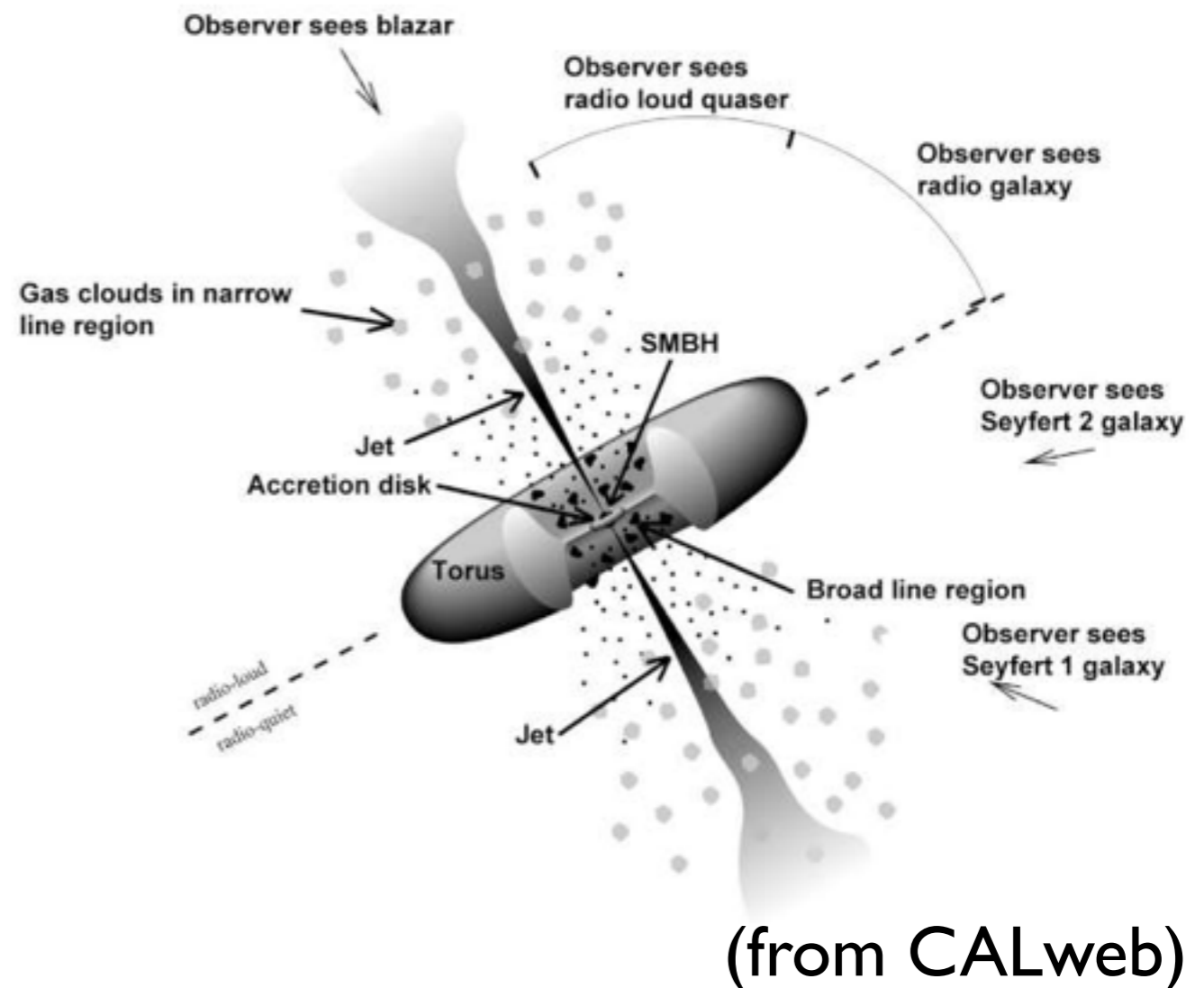
可視連続光 ( $\sim 10^{-2}$  pc)

広輝線領域 ( $\sim 1$  pc)

狭輝線領域 ( $\sim 100$  pc)

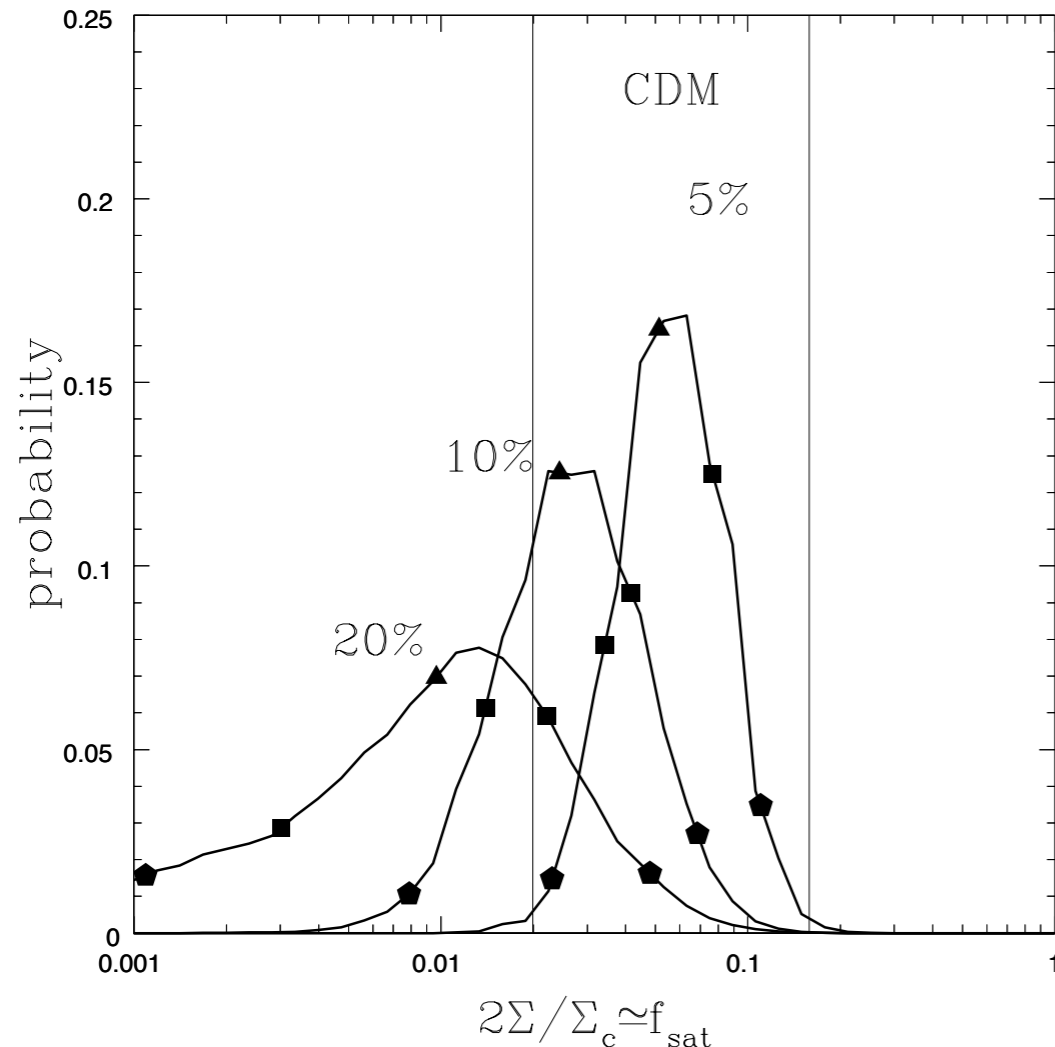
ダストトーラス ( $> 1$  pc)

電波放射 ( $> 1$  pc)

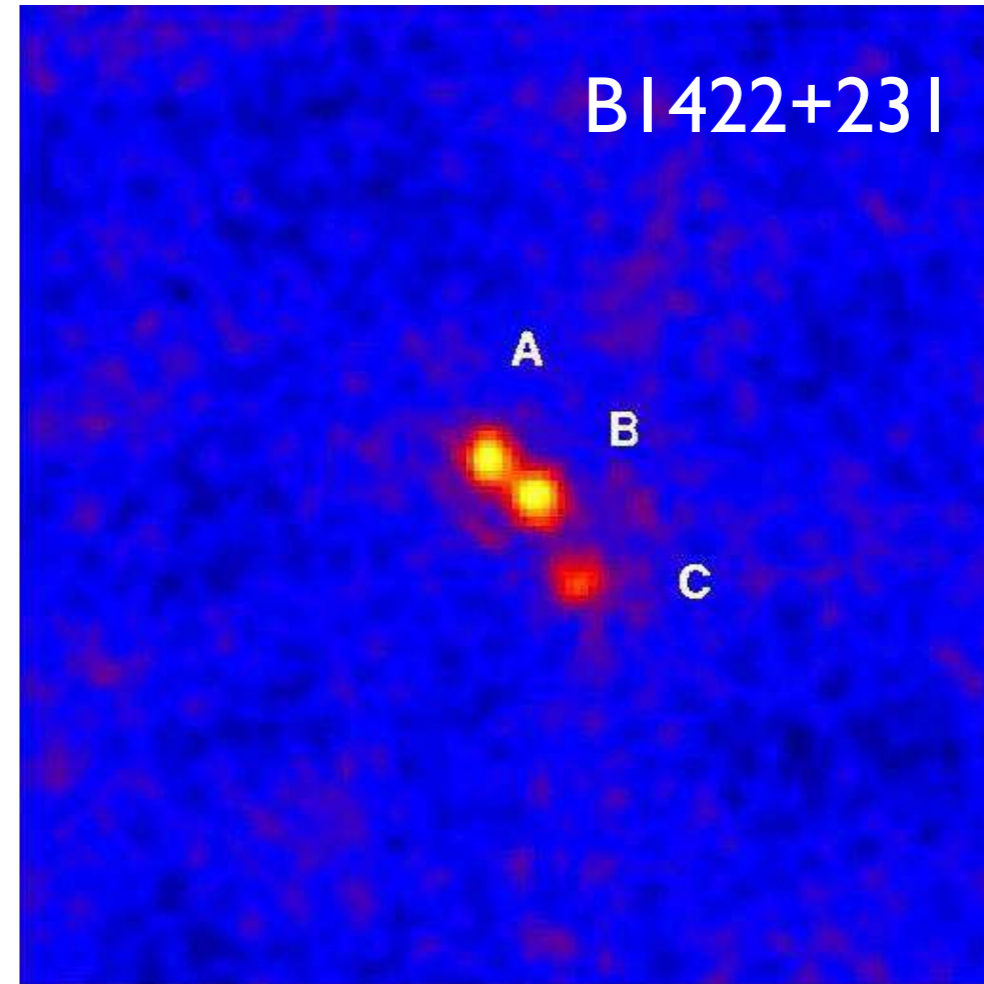


- サイズ依存性を利用しサブ構造による重力レンズとquasar microlensingを分離

# これまでの結果



電波フラックス比解析  
(Dalal & Kochanek 2002)



MIR観測 (Chiba et al. 2005)

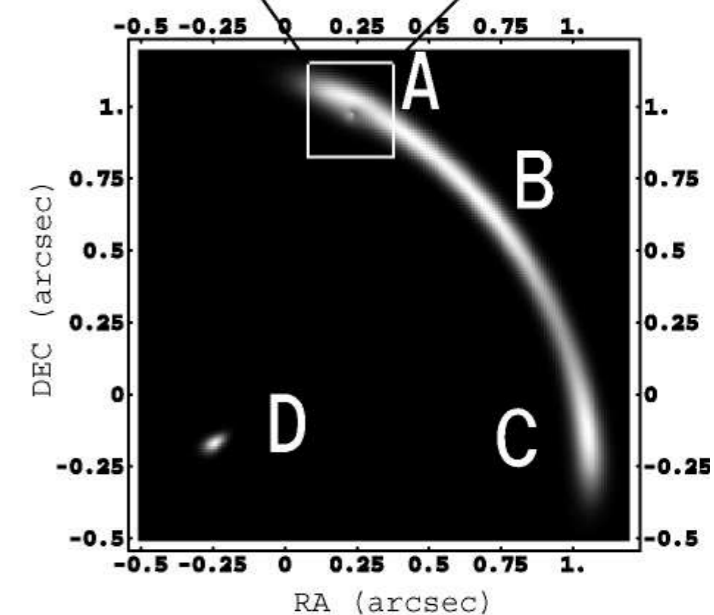
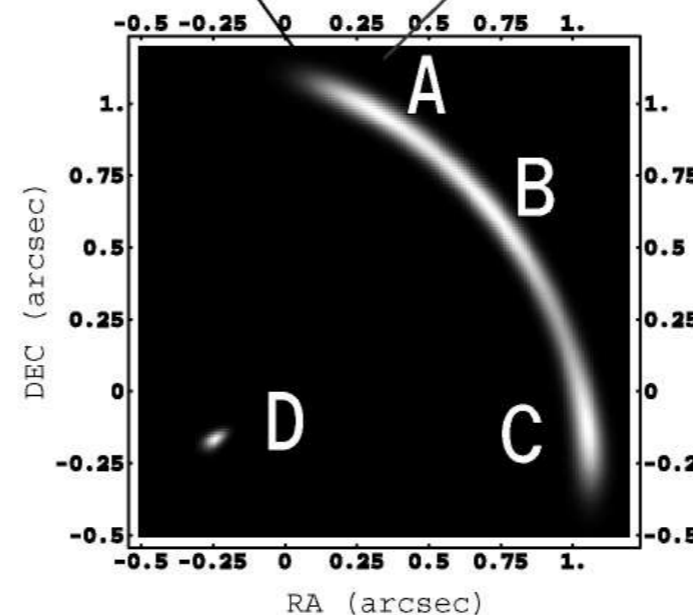
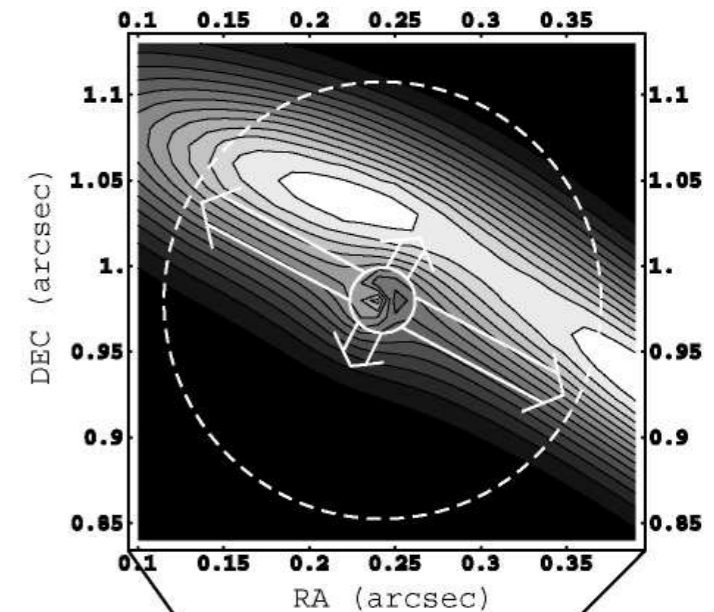
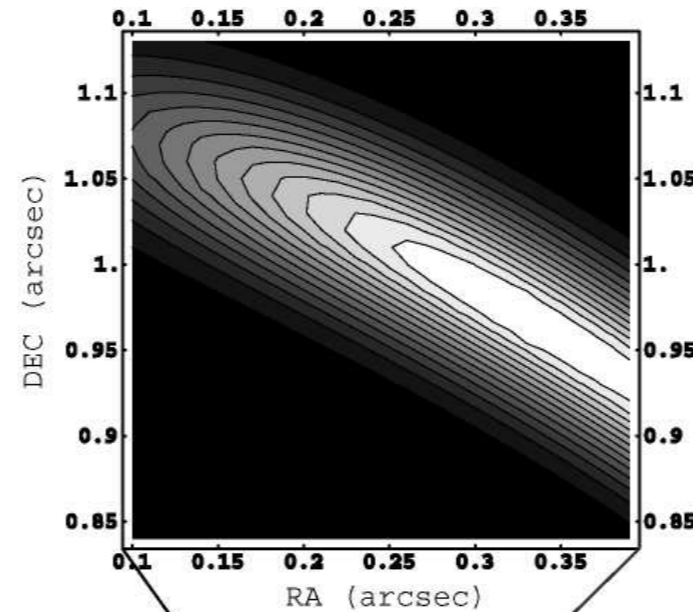
- CDMとおおよそコンシステント、但しサンプル数が少なくはっきりした結論は難しい

# 他のアプローチ: アーク像解析

- 広がった重力レンズアーク像にサブ構造の痕跡を探す

(e.g., Koopmans 2005)

- アークが細かい構造をもっていたほうが有利 (のっぺりだと痕跡みえず)



(Inoue & Chiba 2005)

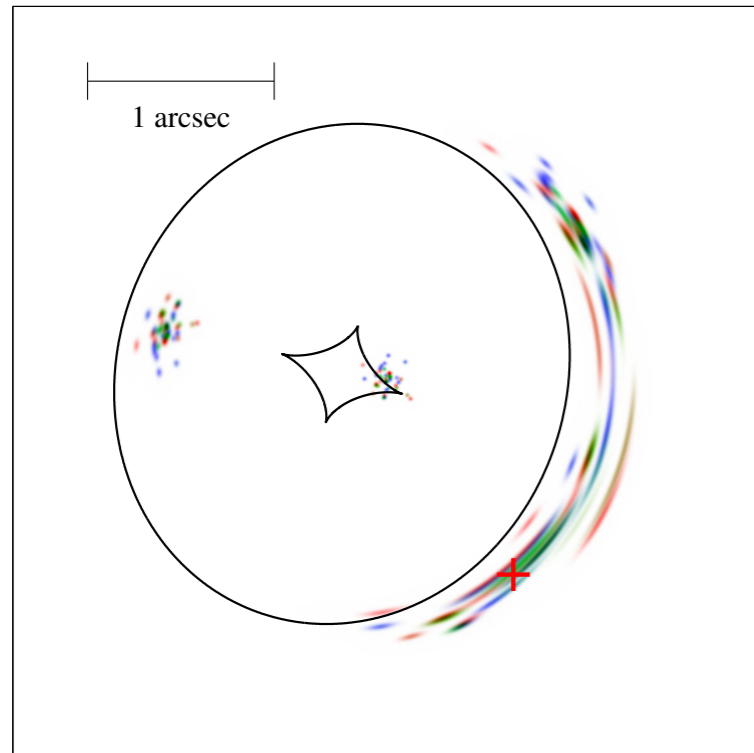
# 最近の進展: アルマ望遠鏡

- ちに建設された大型電波干渉計
- 日米欧台の国際共同プロジェクト
- 2014年頃より本格稼働
- 大きな基線長により超高分解能観測が可能



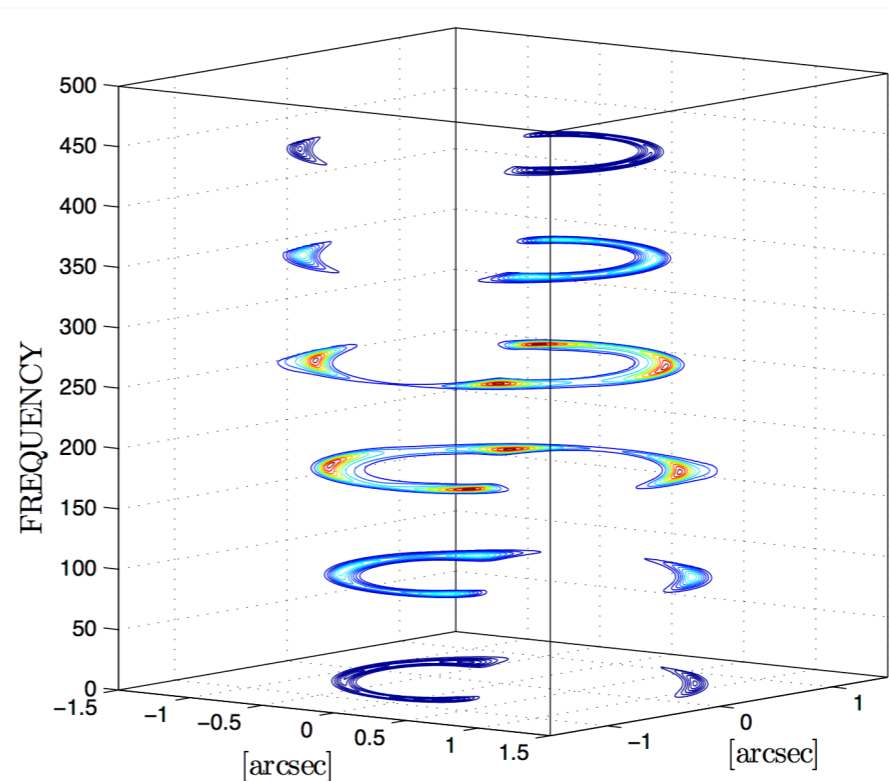
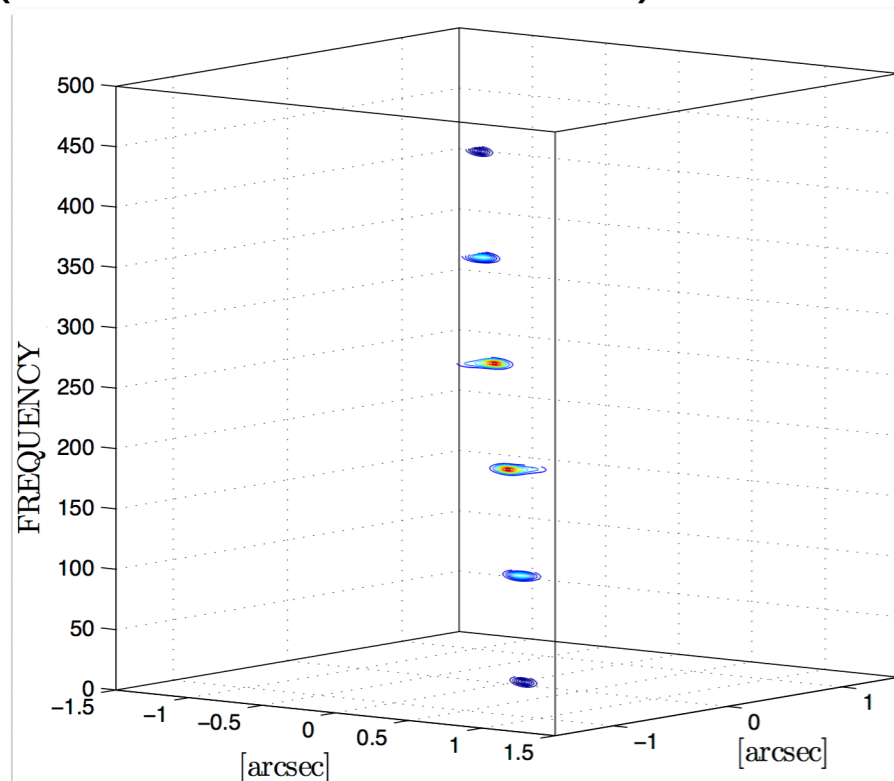
NAOJ webpage

# アルマによるサブ構造探査



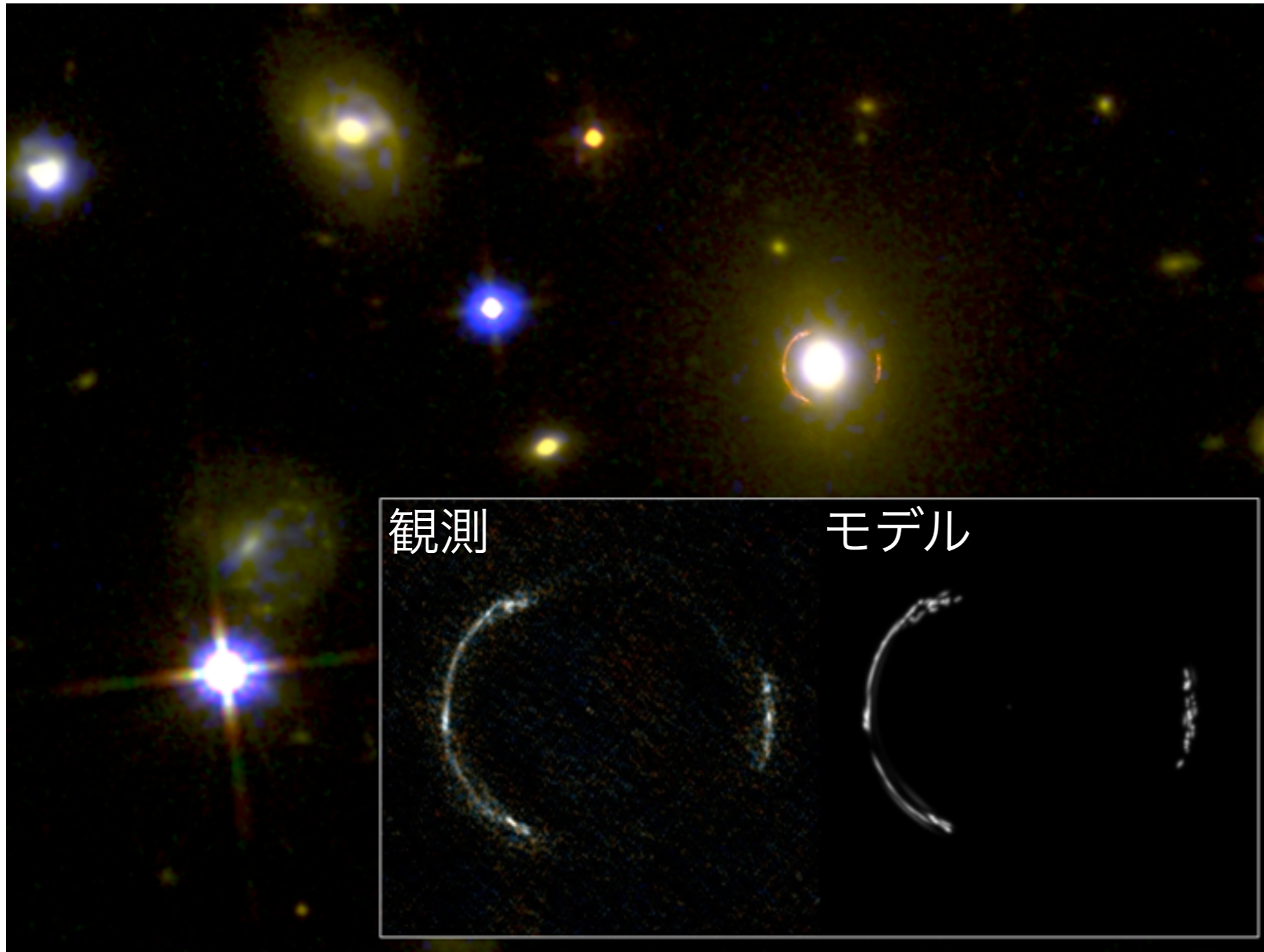
(Hezaveh et al. 2013)

- $\sim 0.03''$  の高い空間分解能 (ハッブル望遠鏡を凌駕)
- 速度構造の観測によりサブ構造の検出効率をさらに高める!



(Neal Dalal)

# 重力レンズ SDP.81



長基線観測の  
テストのため  
ALMAチーム  
により観測、  
データ公開

$z_s=3.042$

$z_l=0.299$

空間分解能

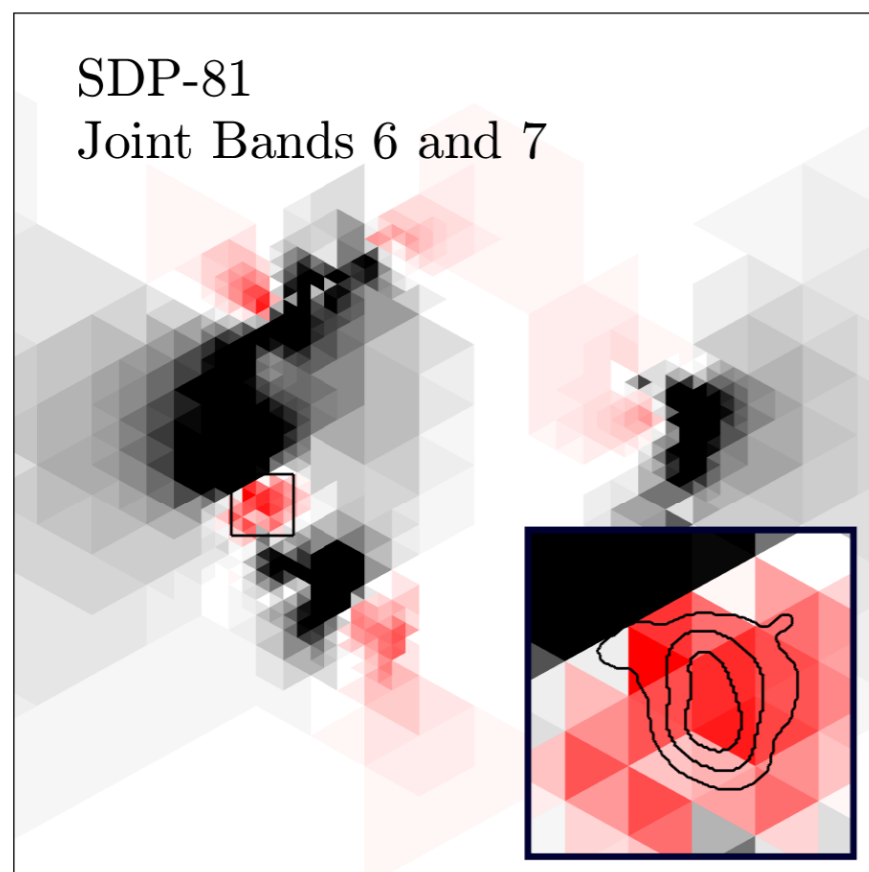
$\sim 0.03''$  !

Tamura, Oguri, et al. (2015)

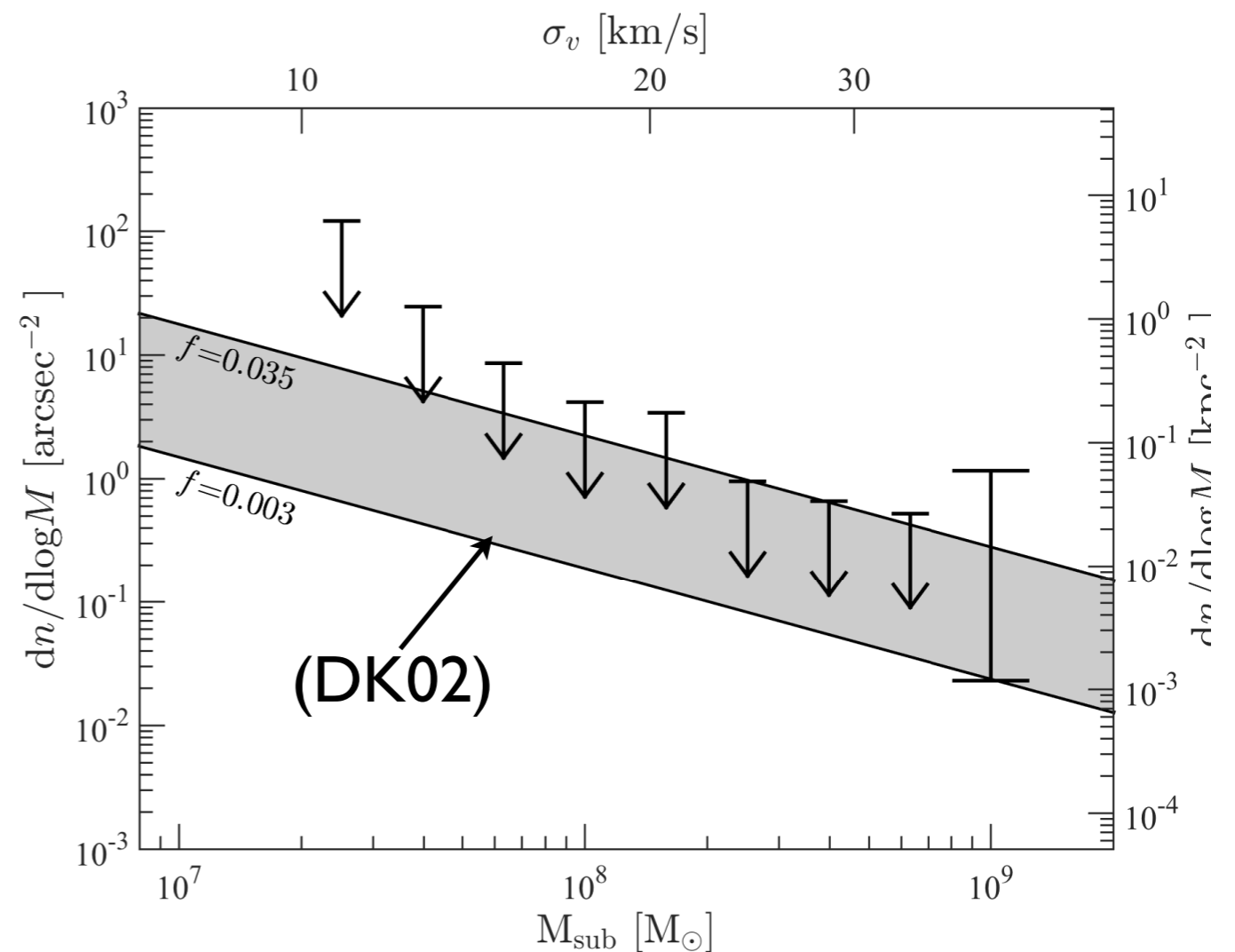


# SDP.81のサブ構造解析

- レンズ解析より $\sim 10^9 M_{\text{sun}}$ のサブハローを検出  
(Hezaveh et al. 2016; Inoue et al. 2016)
- 連続光のみでまだ速度構造は使用せず、今後の進展に期待



(Hezaveh et al. 2016)



# 小スケール観測: まとめ

- 複数像のフラックス比、ないし広がったソースの解析からサブ構造に制限
- 現状はCDMとコンシステントだがまだまだ統計が足りない
- アルマ望遠鏡観測により大きな進展が見込める

# 増光を利用した遠方銀河探査

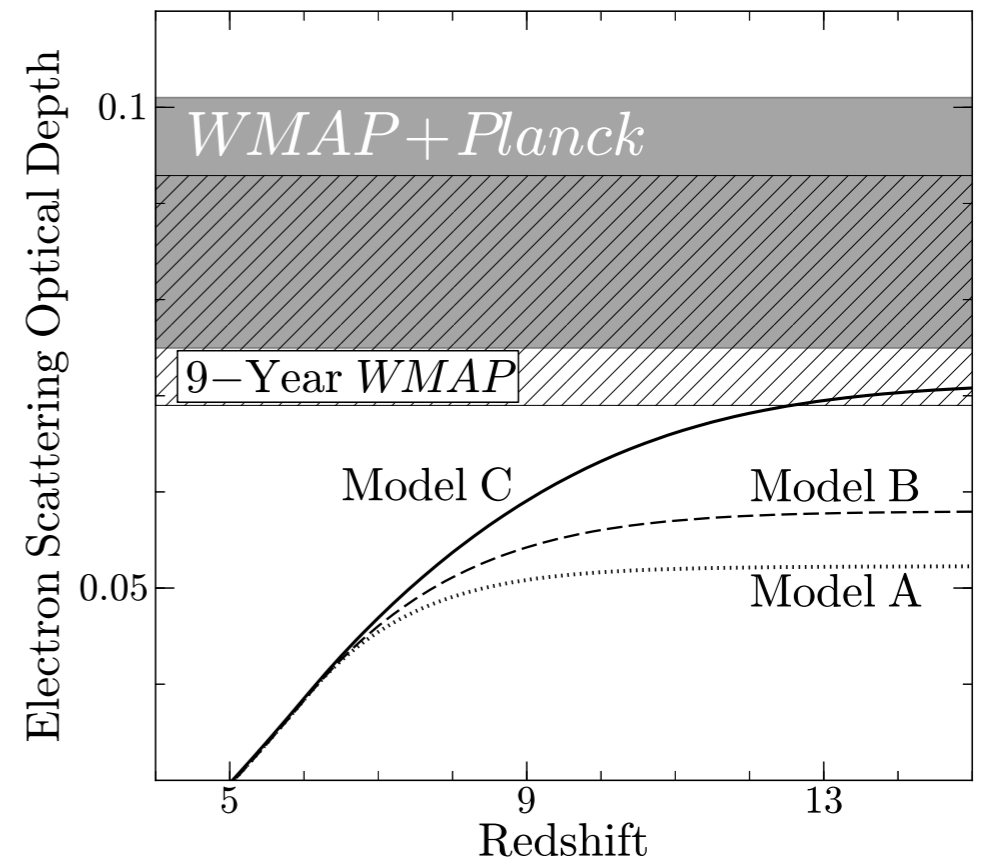
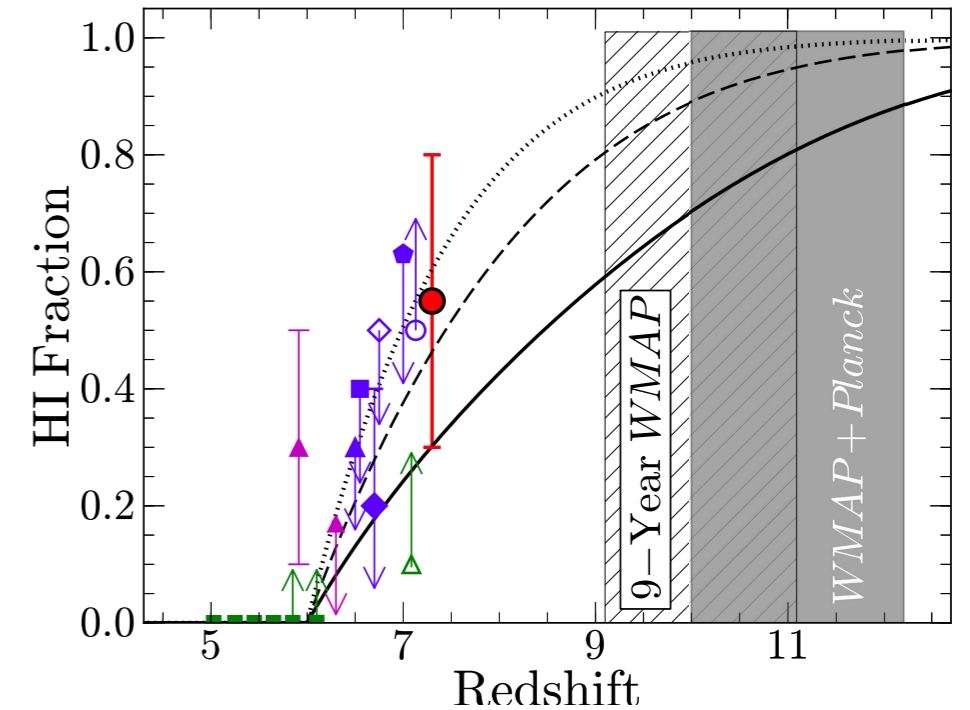


Abell2218 (Kneib et al. 2004)

- 重力レンズ増光を利用して遠方の暗い銀河を詳しく調べる
- Zwicky (1937) によりはやくも言及

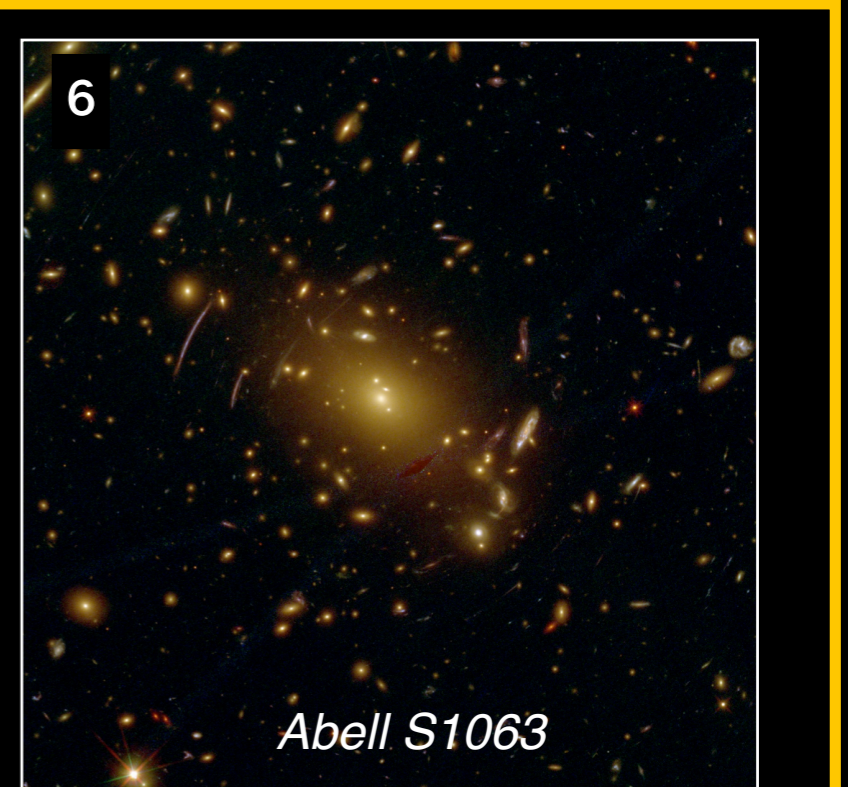
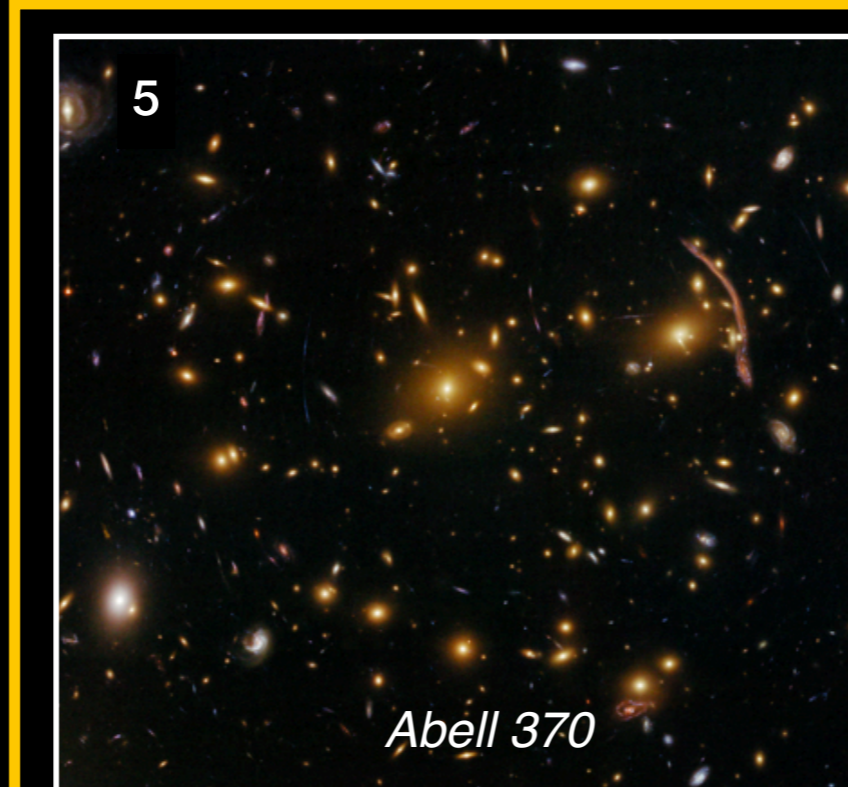
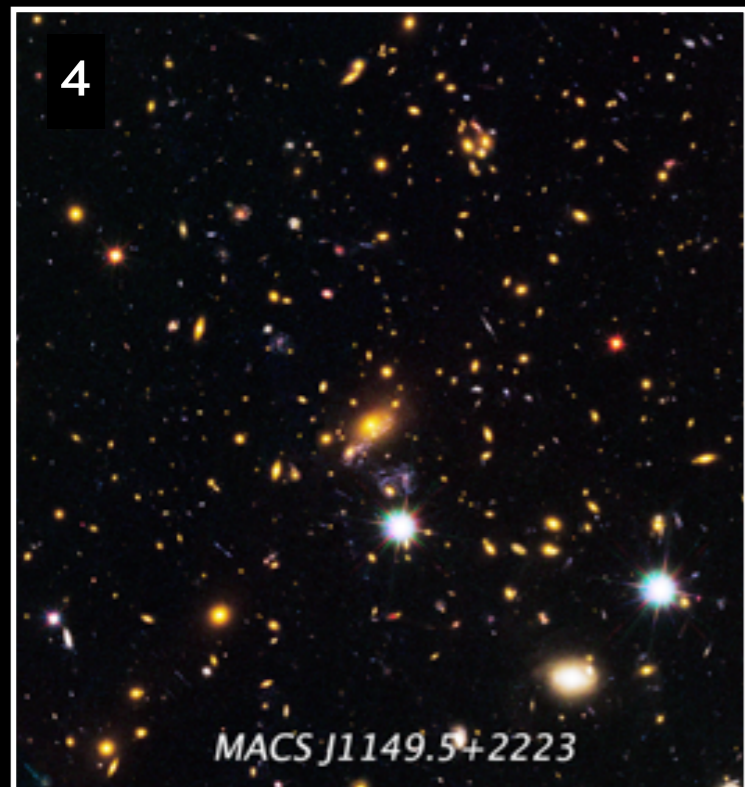
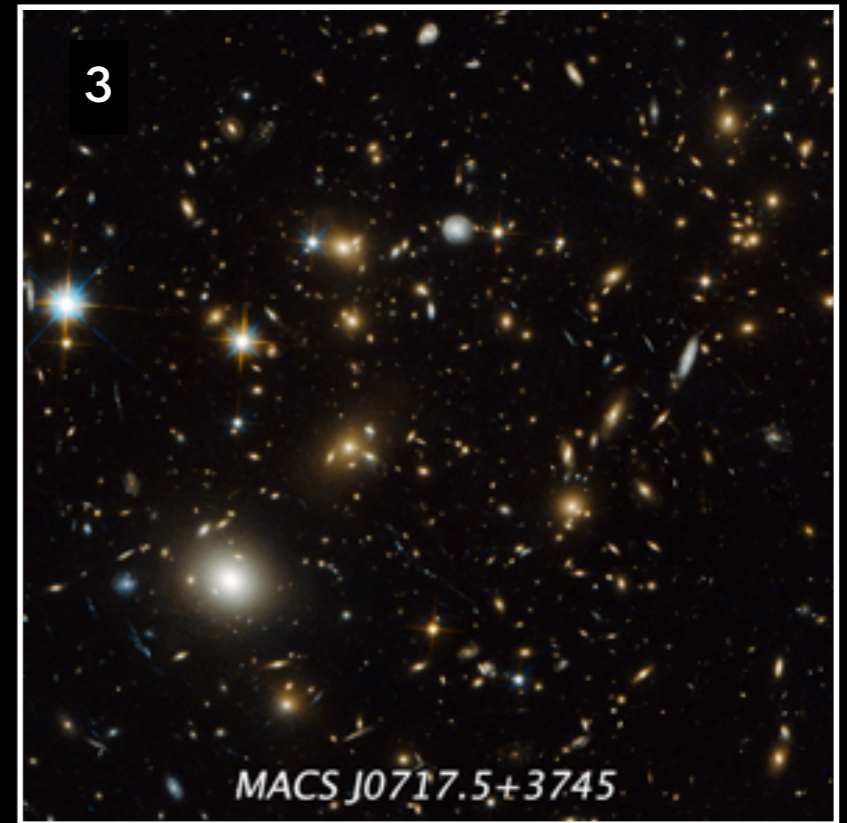
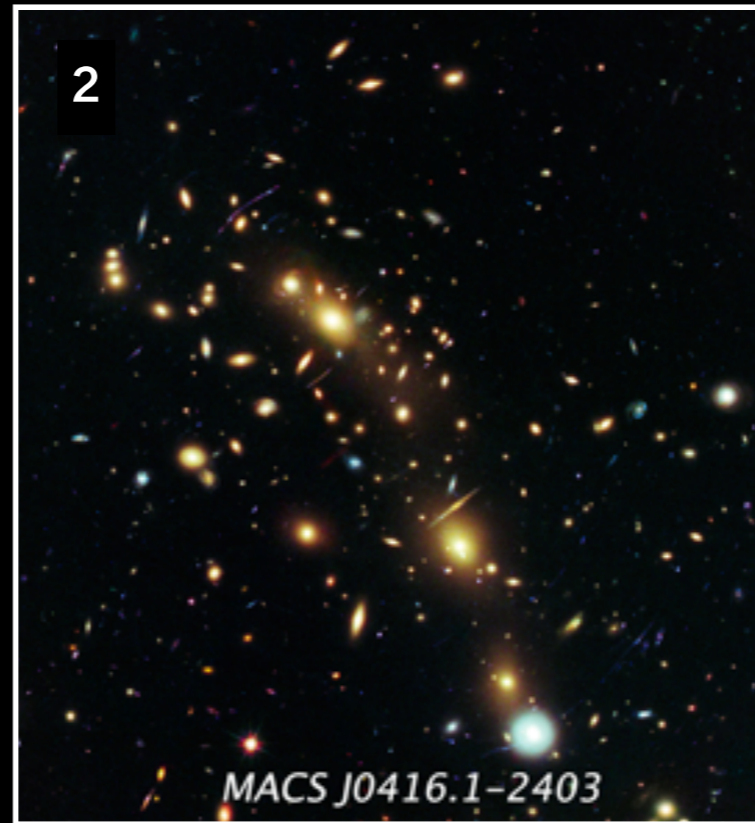
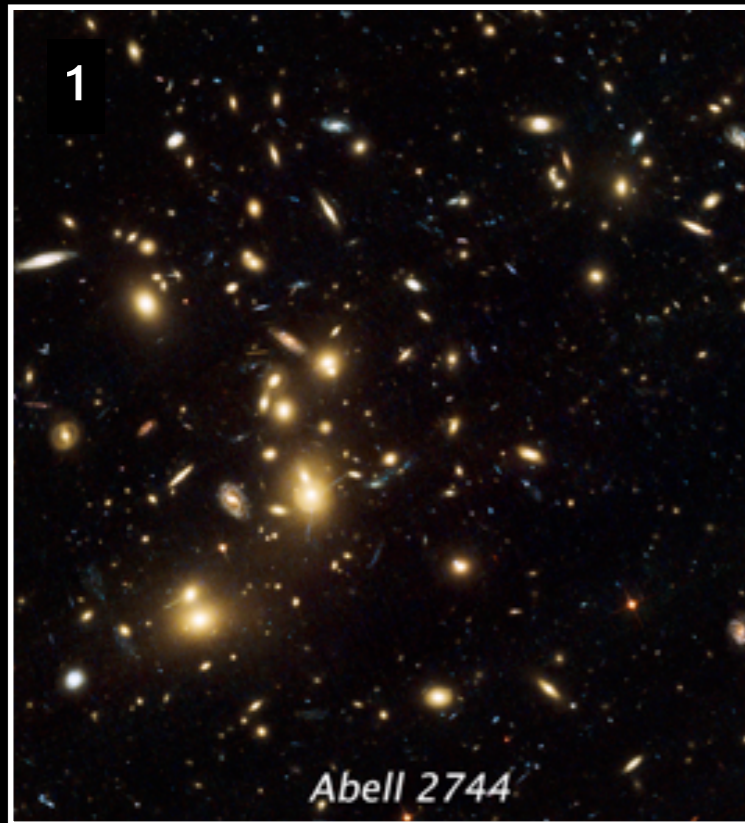
# 宇宙の再イオン化

- 宇宙は星形成による電離光子により  $z \sim 6-7$  で再イオン化
- 光子散乱の光学的厚みはCMB観測から得られる
- 銀河の紫外光度関数の観測から推定した電離光子数はCMB観測推定より少ない？



Konno et al. (2014)

# HST Frontier Fields



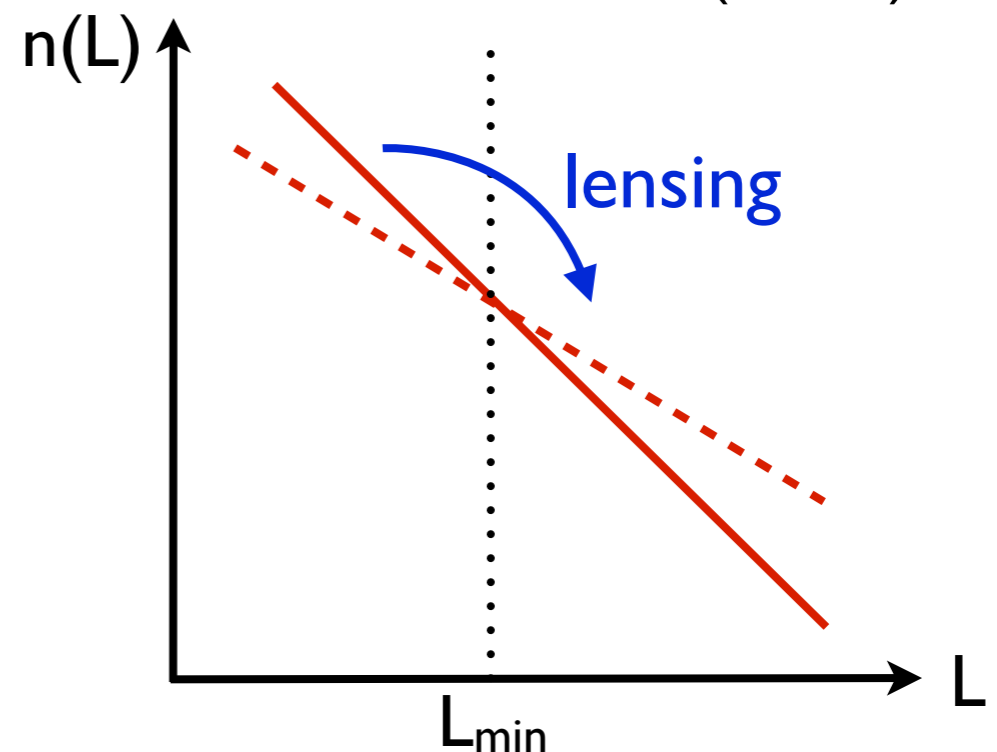
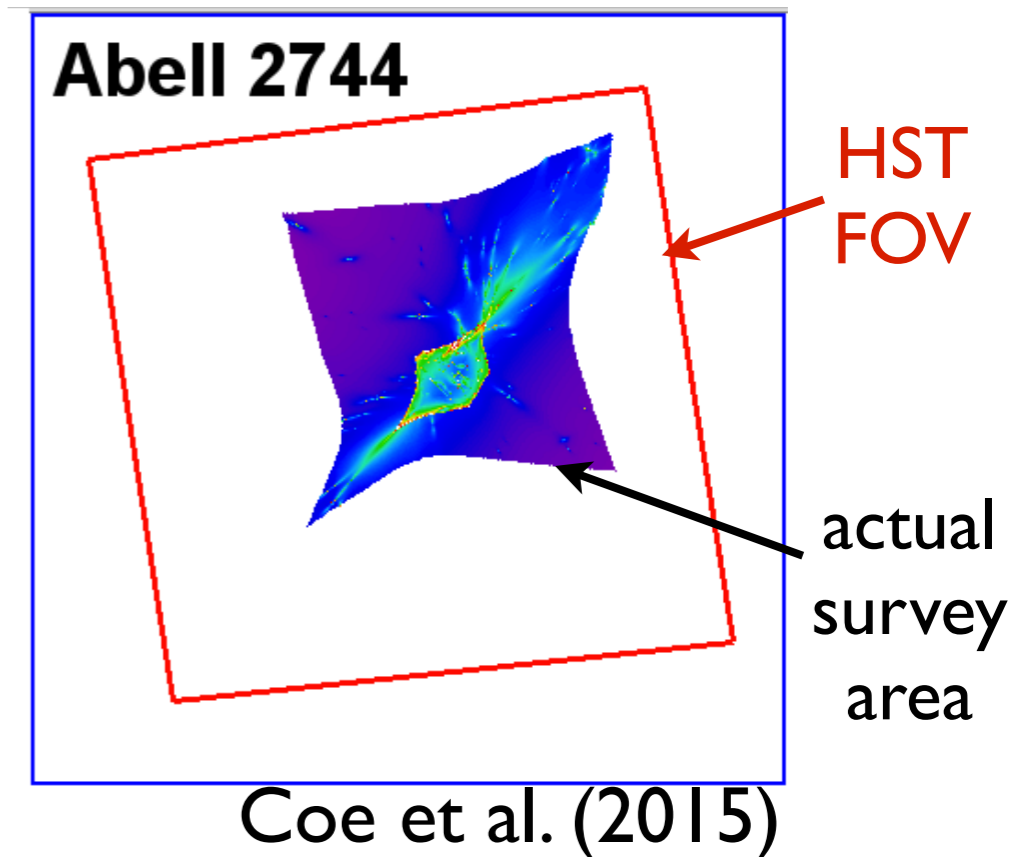
chosen based on known lensing strength, sky location, ancillary data

# Hubble Frontier Fields (HFF)

- 宇宙望遠鏡科学研究所の所長裁量時間を使ったハッブル望遠鏡のpublicサーベイ (2014-2016)
- 6つの銀河団を可視+近赤外で深く撮像
- データは即時公開される

# 銀河団領域の銀河探査

- 利点: 限界等級よりも暗い銀河をレンズ増光により検出できる
- 欠点: レンズ拡大効果により実質的にサーベイする面積が狭まる
- どちらの効果が勝つか (観測銀河数が増えるか減るか) は光度関数の傾きによる



# 不定性: 質量モデル

- 観測された銀河に対する重力レンズ効果を補正し物理量を求めるには質量モデルが必要
- 質量モデルを間違えれば結果も間違える
- 質量モデルの不定性に対処するため
  - (1) 分光観測 (e.g., VLT/MUSE) により複数像の赤方偏移をできるだけだけ測定
  - (2) 複数のチームによる質量モデル、結果の相互比較
  - (3) シミュレーションを使ったテスト



# The Frontier Fields Lens Models

- さまざまな質量モデリングの結果が公開され、誰でも使用・比較できるようになっている



Barbara A.  
**MIKULSKI ARCHIVE** OF **SPACE TELESCOPES**

MAST | STScI | Tools ▾ | Mission Search ▾ | Search Website |   Follow Us ▾ | Register | Forum

About MAST | Getting Started

[The Hubble Space Telescope Frontier Fields Data Access Pages](#)

## The Frontier Fields Lens Models

[Introduction](#)

[Lens Models and  
Input Data](#)

[Magnification  
Calculator](#)

[Acknowledgements](#)

### Latest Updates

06 Sep. 2016 - Bradač v3 models for MACS 0416, from Hoag et al. 2016, now available.

17 Feb. 2016 - The GLAFIC version 3 deflection maps and README files have been updated. Also, the Diego version 3 MACS0416 x-pixels-deflect FITS file has been replaced with the correct file.

# 質量モデリングチーム

## Acknowledgements

The Frontier Fields lensing map-making teams are:

- [+M. Bradač \(PI\)](#)
- [+The Clusters As TelescopeS \(CATS\) team \(Co-PI's J.P. Kneib, P. Natarajan\)](#)
- [+J. Merten & A. Zitrin \(Co-PI's\)](#)
- [+K. Sharon \(PI\)](#)
- [+L. Williams \(PI\)](#)

HFF開始前  
から参加

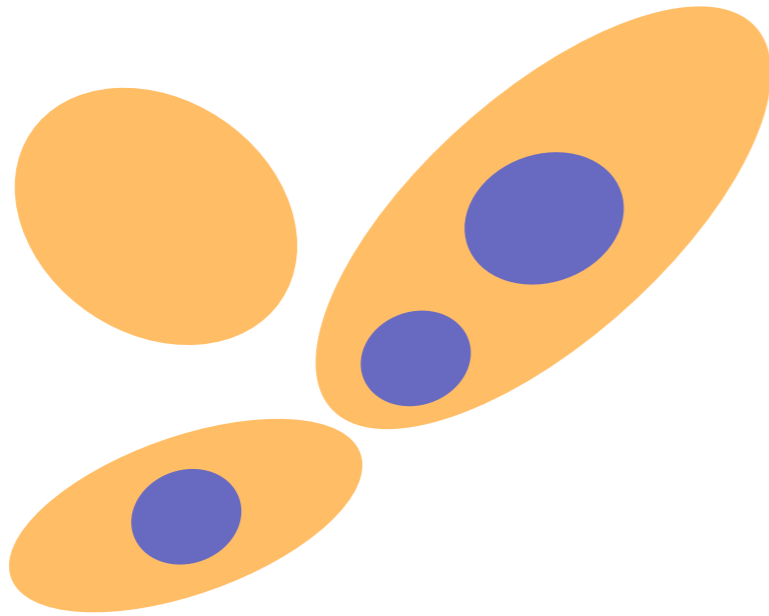
The lens models were derived based on strongly lensed galaxies identified in archival HST imaging in previous works and as part of this project. Other lens model ingredients were spectroscopic redshifts of lensed and cluster galaxies; and ground-based imaging (primarily for weak lensing analyses). The lens modelers shared all of these data prior to performing their analyses.

Subsequent lens models (based in part on the Frontier Fields HST imaging) have been provided by some of the teams listed above as well as:

- [+GLAFIC \(M. Ishigaki, R. Kawamata, M. Oguri\)](#)
- [+Diego \(J. Diego, T. Broadhurst, D. Lam, J. Lim\)](#)

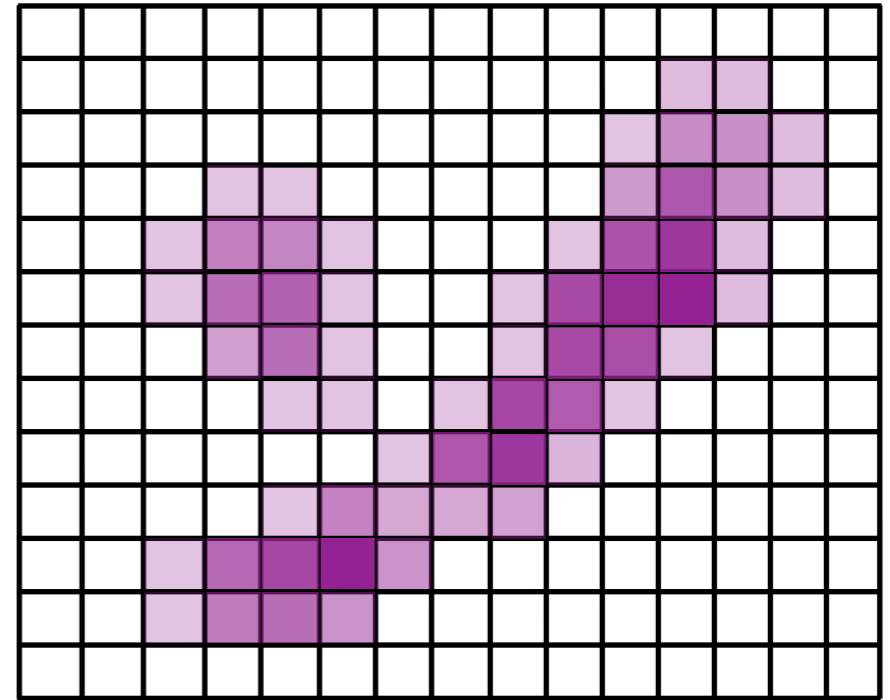
HFF開始後  
に参加

## “parametric”



- 数個のパラメタで表される component (halo, galaxy, ...) の組み合わせで質量分布を表現
- パラメタを最適化

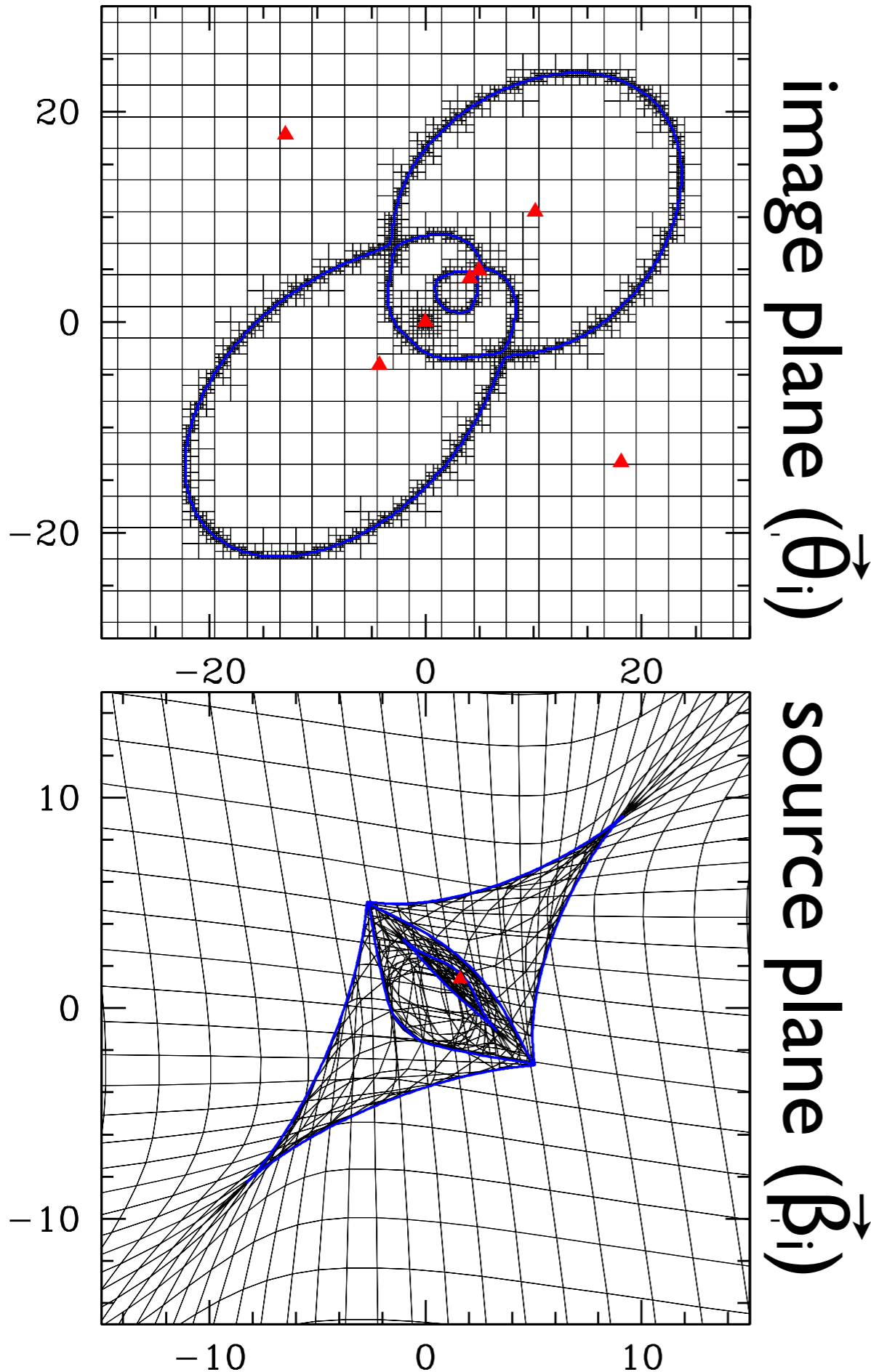
## “non-parametric”



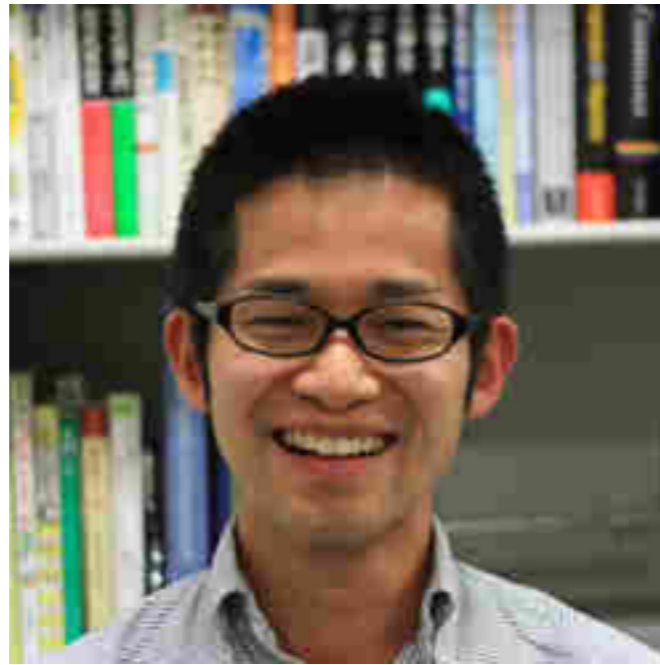
- 質量面密度をグリッドで表し質量分布を表現 (自由度高い)
- 観測を再現するように各グリッドの値を決定

# glafic

- 重力レンズ解析のための公開ソフトウェア (“parametric” mass modeling)
- 適合格子を用いた効率的なレンズ方程式解き
- 質量モデリングのための様々な機能 (e.g. MCMC)
- 興味/質問のある人は私まで



# *glafic* (Tokyo) team



Masafumi Ishigaki

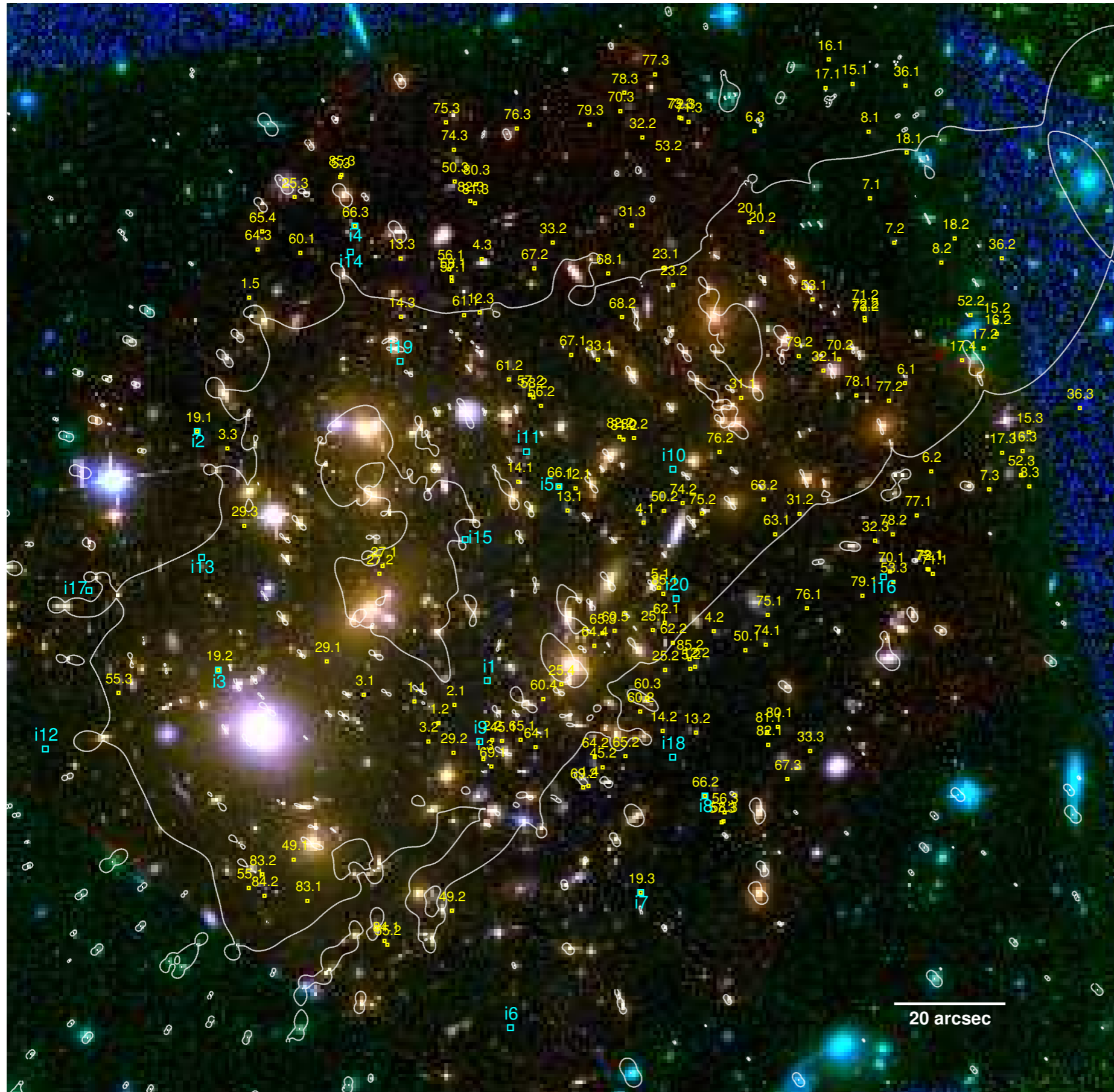


Ryota Kawamata

Masamune Oguri

Masami Ouchi

Kazuhiro Shimasaku



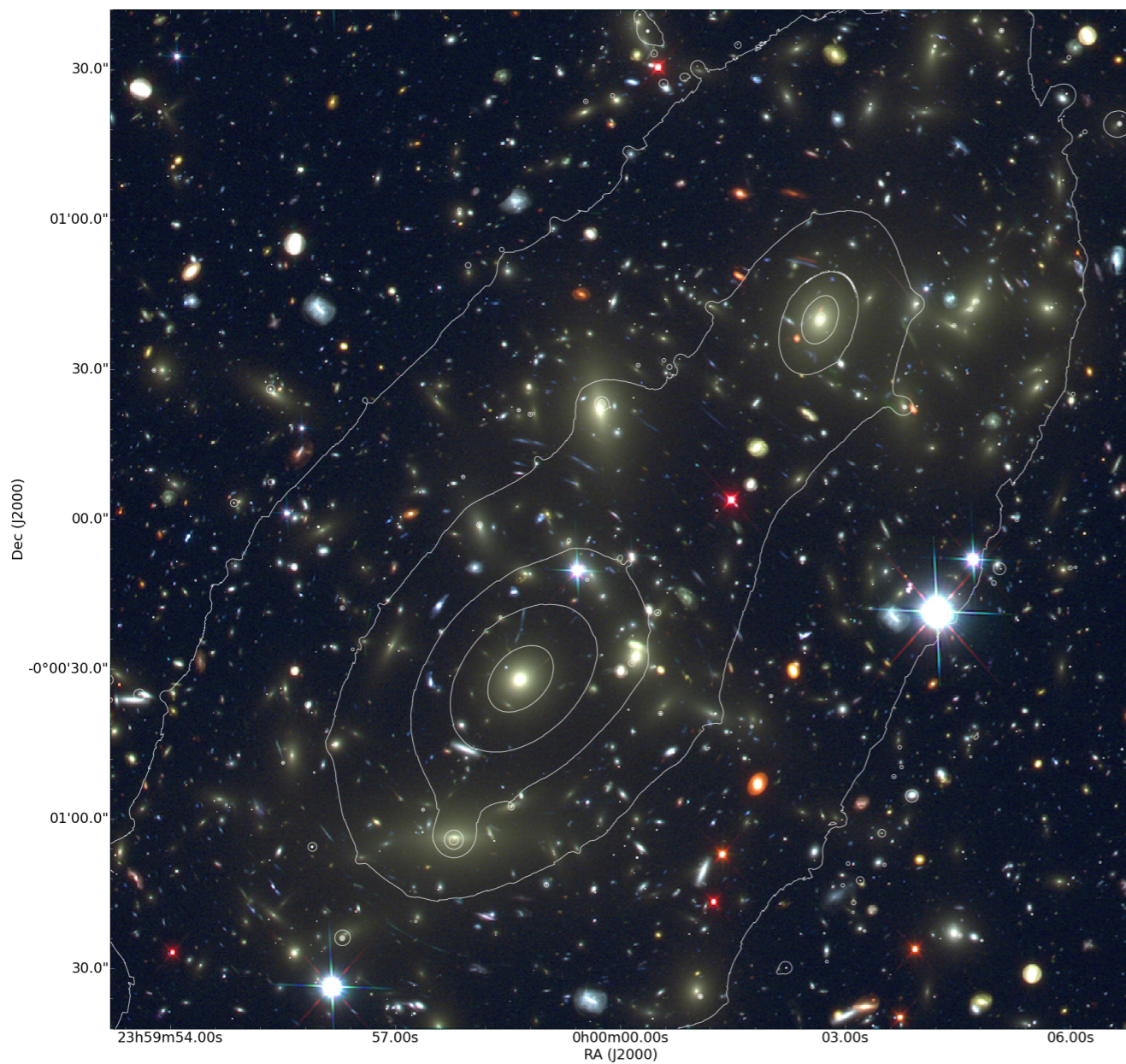
MACSJ0717.5+3745

- *glafic*を用いたモデリング
- 100個以上の複数像を再現するように質量分布決定 (~200 constraints, ~100 parameters)
- 複数像の位置を  $\text{rms} \sim 0.4''$  と良く再現

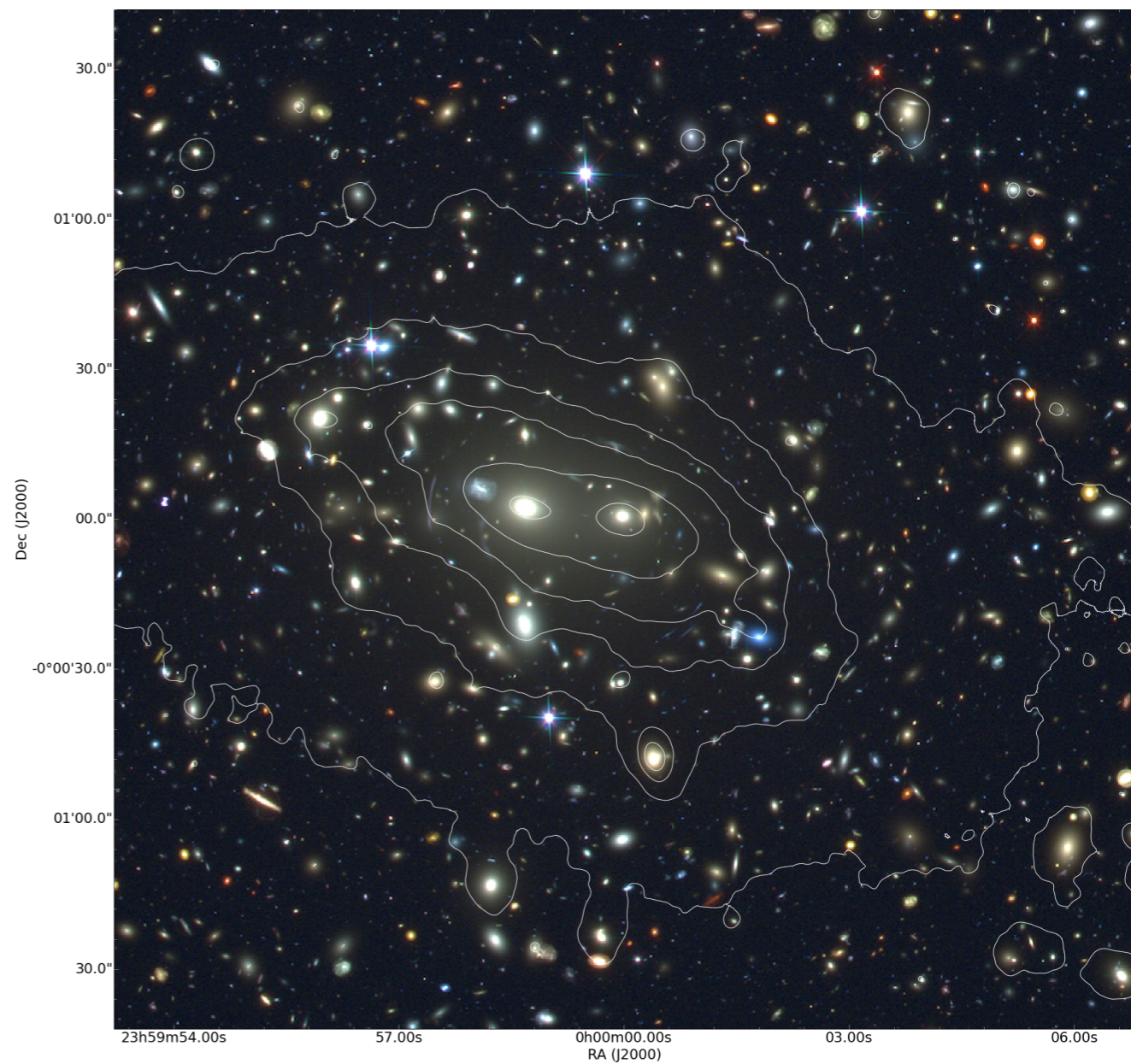
# モデル比較プロジェクト

- 観測された銀河団の質量モデリングを比較してもどれが正解かはよくわからない
- シミュレーションから重力レンズの模擬観測を行い、それをモデリングし比較すればどれがどのくらい正解に近いかチェック可
- HFFデータの解析に向け、異なる方法で作られた二つの銀河団シミュレーションの質量モデリングの比較プロジェクトを行った

# 銀河団シミュレーション

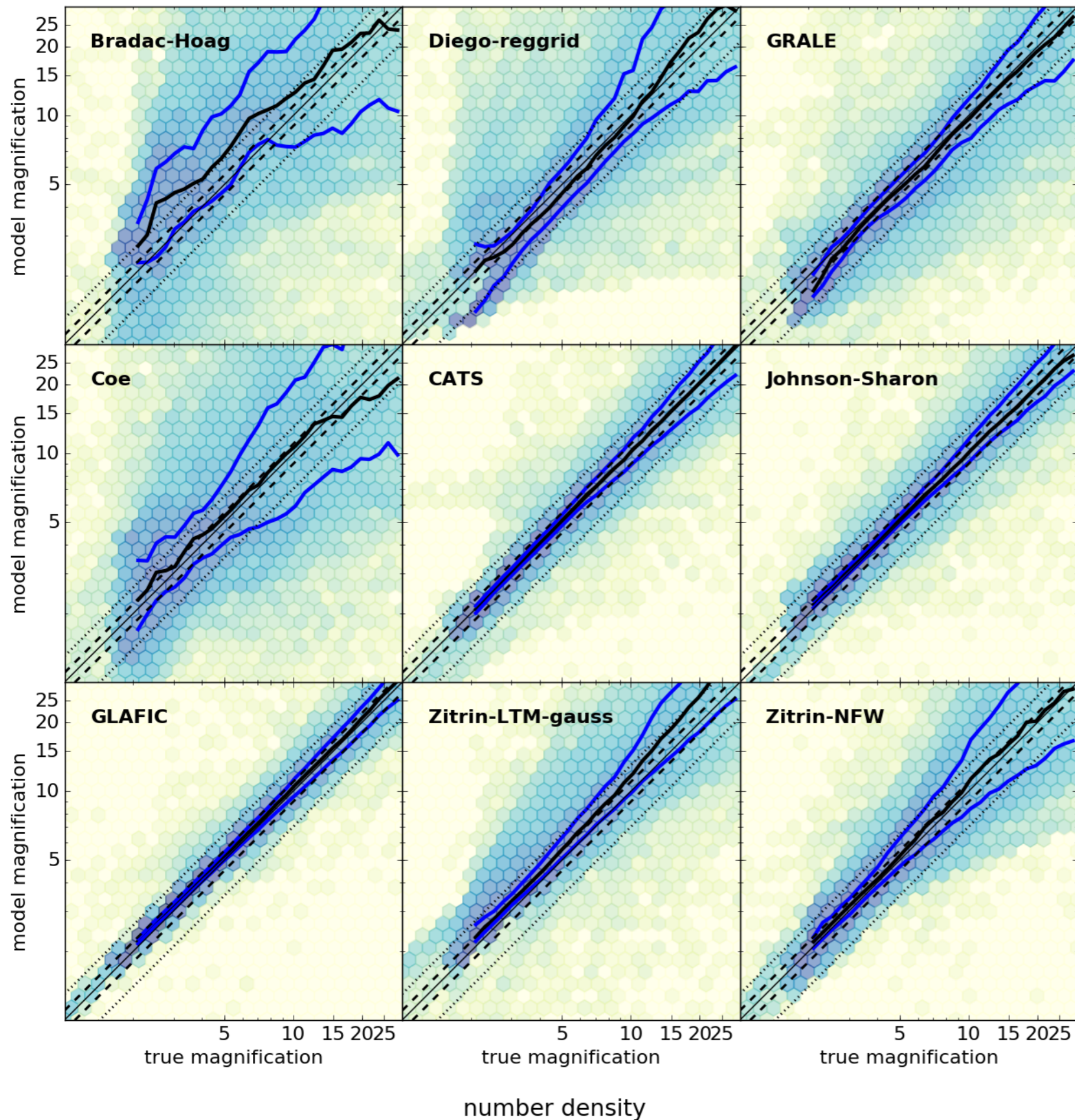


“Ares” (semi-analytic)



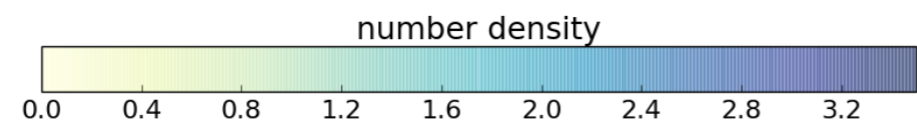
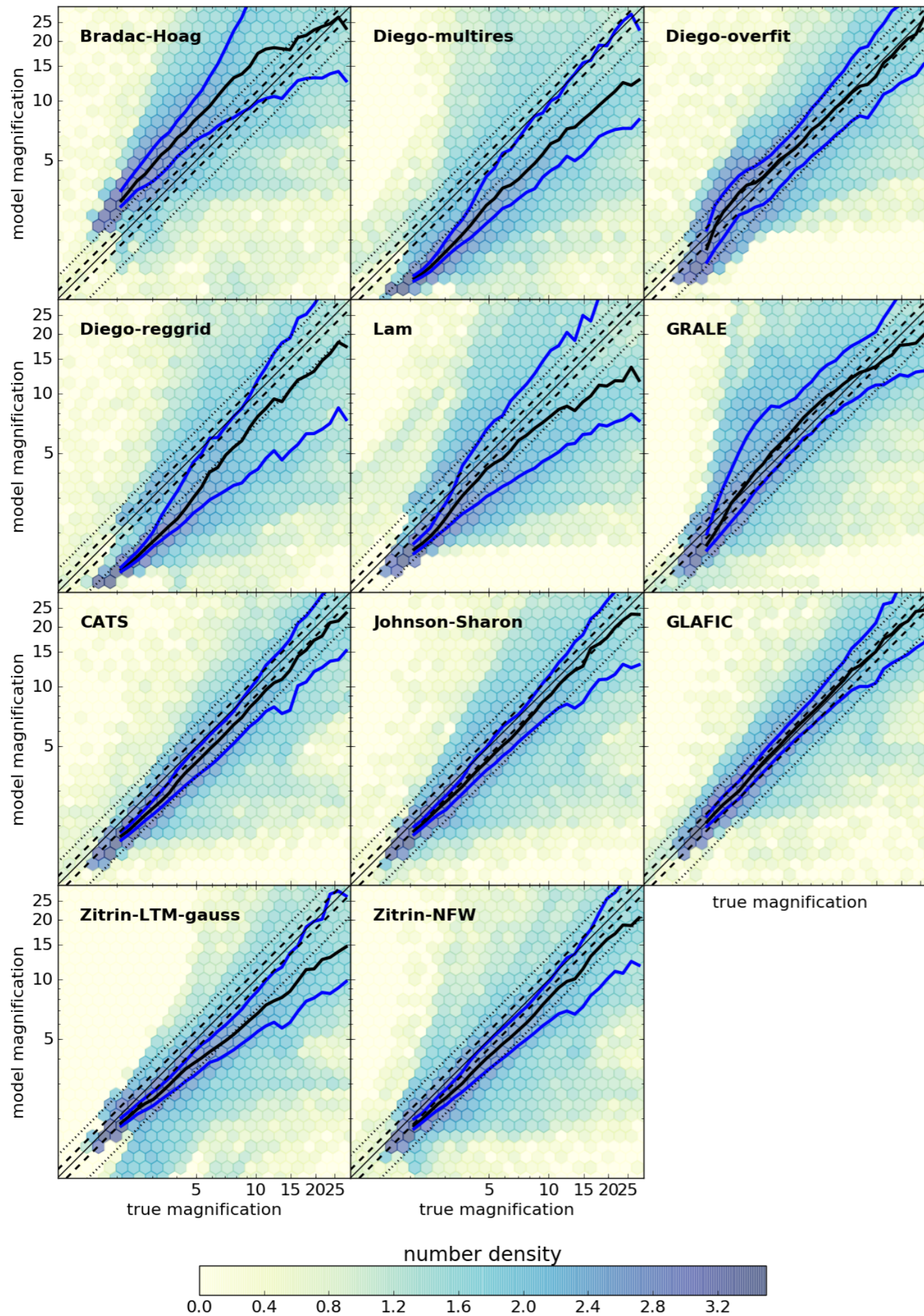
“Hera” (N-body)





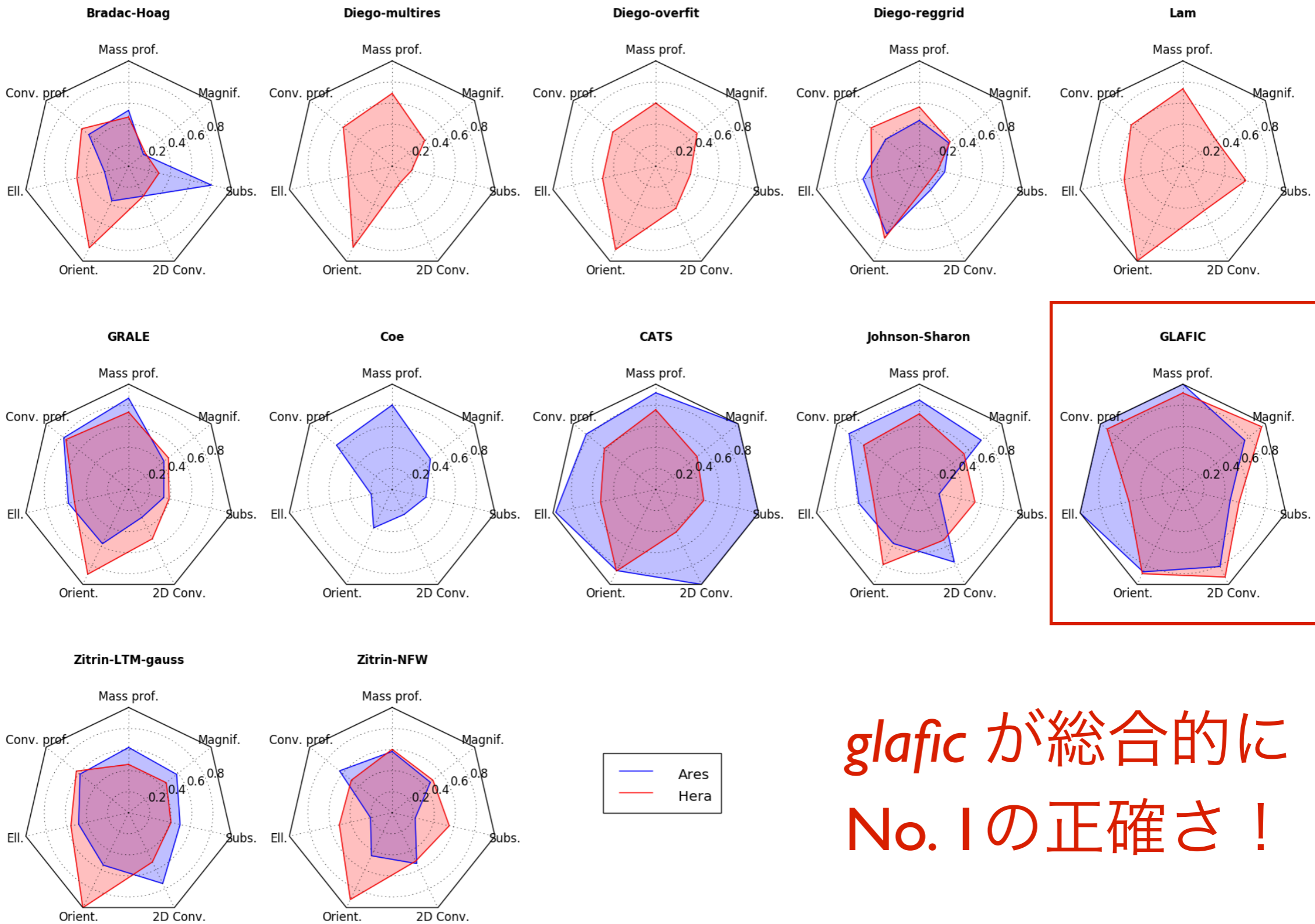
増光率の  
モデル予言  
と正解との  
比較  
(Ares)

増光率の  
モデル予言  
と正解との  
比較  
(Hera)



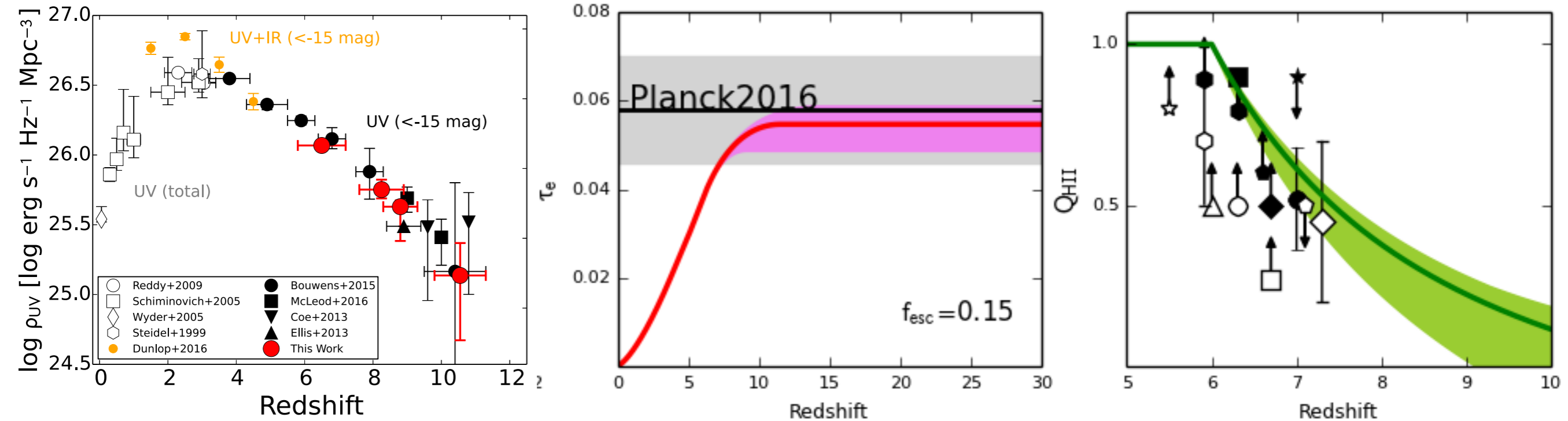
# モデル比較プロジェクト結果

Reconstruction metrics



*glafic* が総合的に  
No. 1の正確さ！

# 再イオン化の結果



- HFFの6つの銀河団をすべて解析 ( $z \sim 6-10$ で $\sim 400$ の銀河)
- 紫外光度密度は high- $z$  で緩やかに減少
- CMBから推定した光学的厚みと銀河観測は  
 コンシステント → 電離光子数問題の解決

# 遠方銀河観測: まとめ

- 重力レンズの増光を利用して普通には観測が難しい遠方の暗い銀河を研究できる
- 6つの銀河団をハッブル望遠鏡で深く観測する Hubble Frontier Fields (HFF) が行われた
- これら銀河団の質量分布も100個以上の複数像を用いこれまでにない高い精度で決定
- HFFにより観測された高赤方偏移銀河の数も大幅に増え再イオン化の描像がはっきりしてきた