

非線形構造から迫る 宇宙暗黒成分の起源

井上 開輝(近畿大)

観測的宇宙論のアプローチ

- (非)線形ゆらぎの異常に注目する
 - 少人数でも可能
 - ローコスト&ハイリスク&ハイリターン?
 - 探偵型一型

Outline

- 非線形構造のアノーマリーとは
- 超構造のアノーマリー
 - CMB大角度揺らぎ異常と起源
 - 超ボイド
- ミニ構造のアノーマリー
 - 4重像レンズのフラックス比異常
 - 視線方向の構造/サブハロー
- まとめ

非線形構造のアノーマリーとは

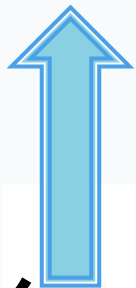
- CMB大角度ゆらぎの異常
 - 超構造・・・ $L=O[100\text{Mpc}/h]$ 、 $\delta = O[0.1]$
- 4重像レンズのフラックス比の異常
 - ミニ構造・・・ $L= O[10\text{kpc}/h]$ 、 $\delta > O[100]$

超構造のアノーマリー

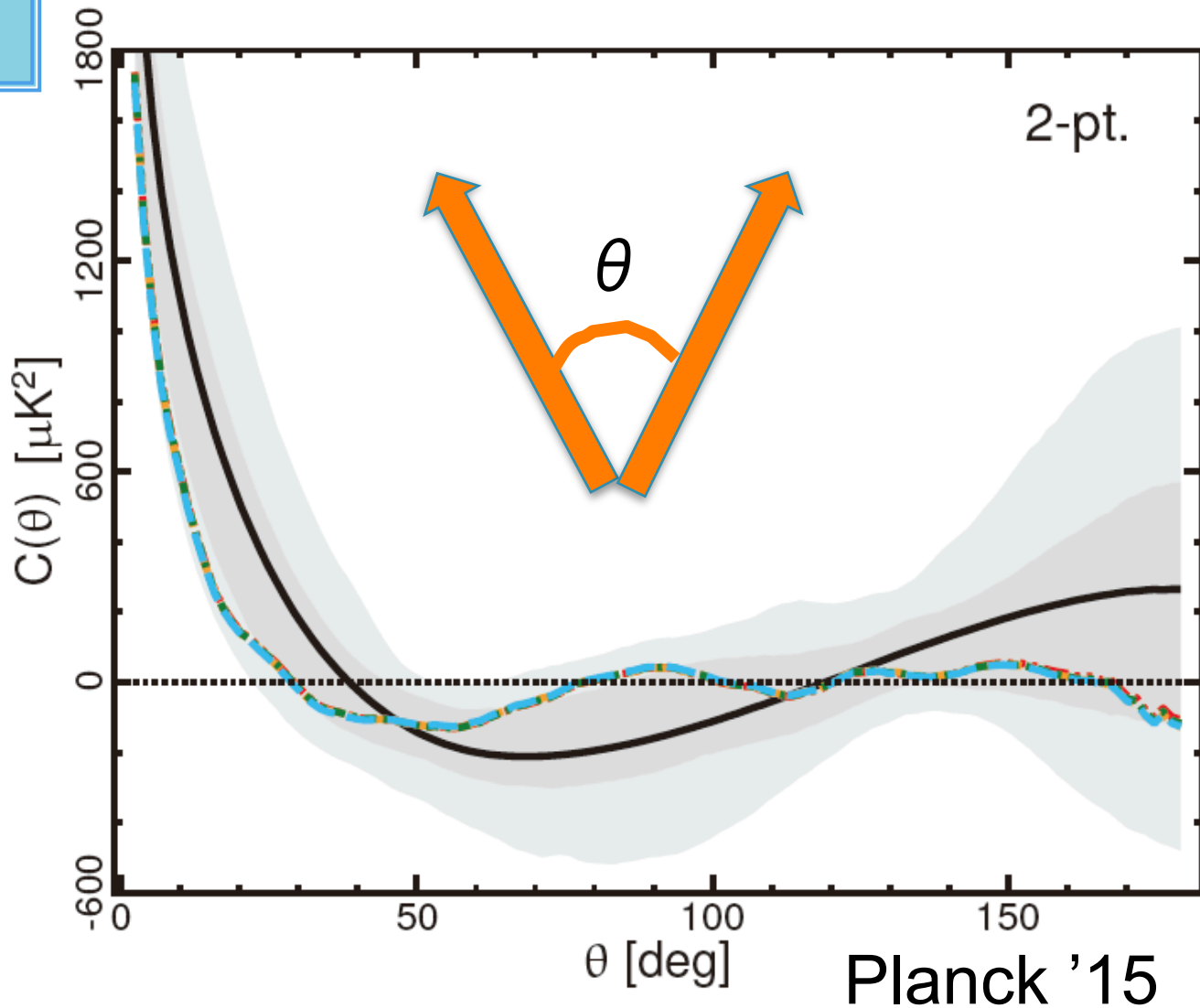
CMB大角度揺らぎ異常

- 60度以上の相関がほとんどない。
- パワースペクトルに南北非対称性。
- $l=2$ と $l=3$ のゆらぎの「方向」がそろっている。
- 南天にあるコールドスポット。

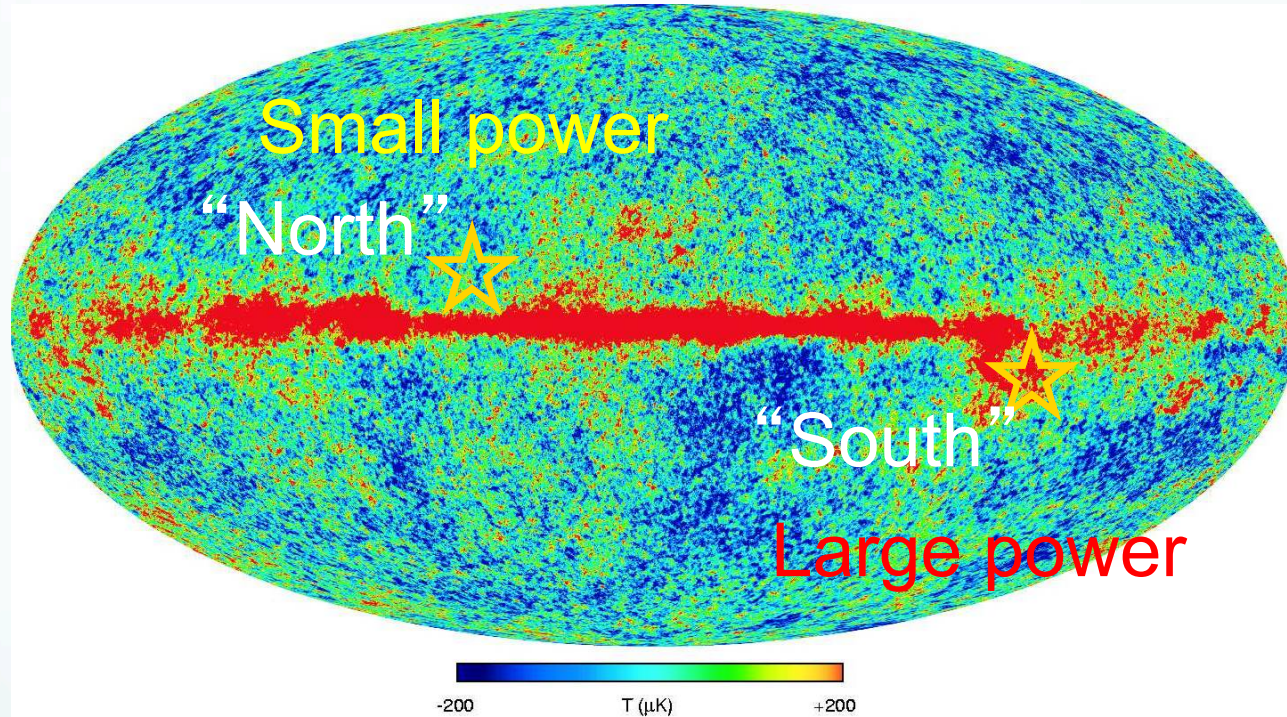
2点相関関数



60度以上の相関が無い。



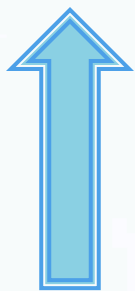
パワーの南北非対称性



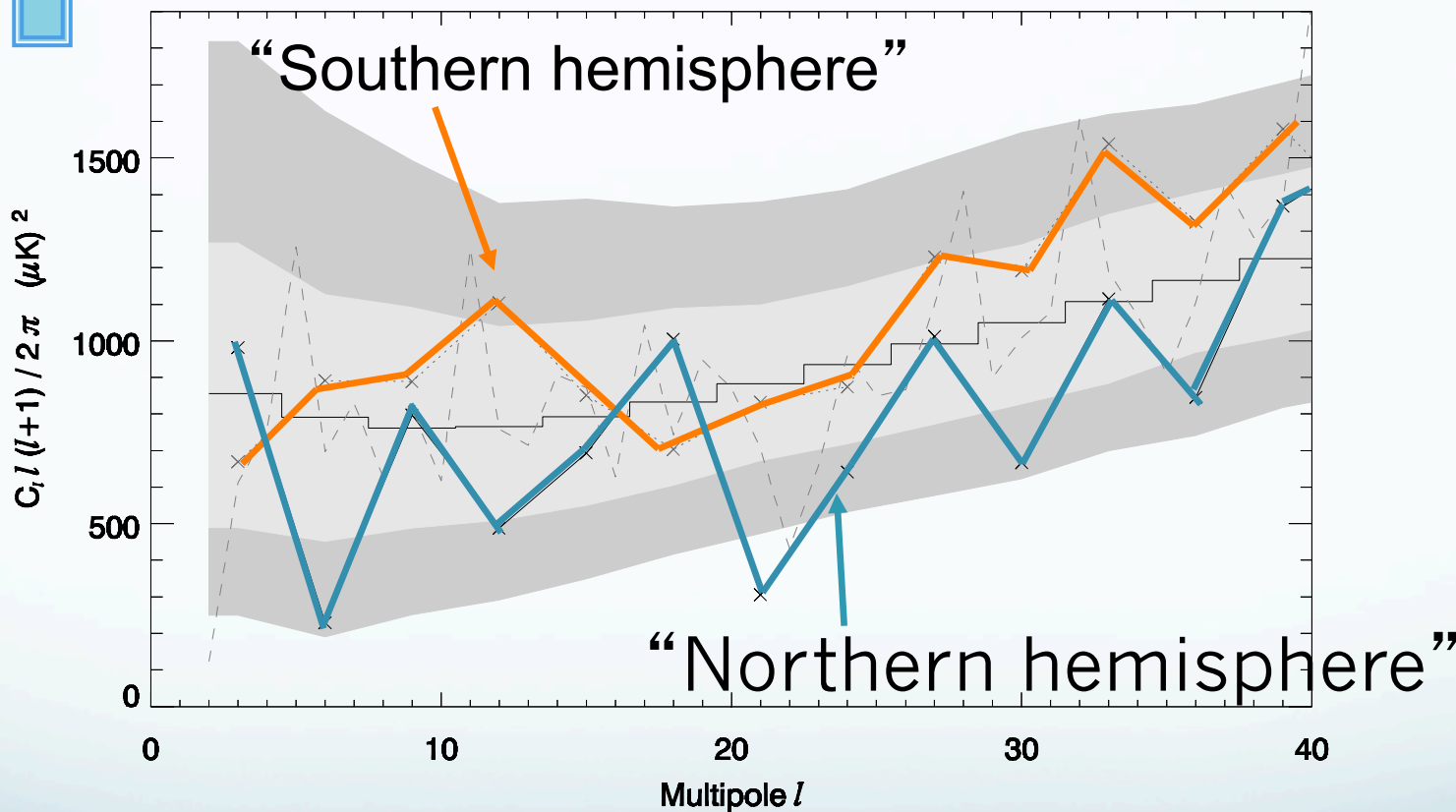
Eriksen et al. '03

North pole: $(l,b)=(57^\circ, 10^\circ)$

角度パワースペクトル



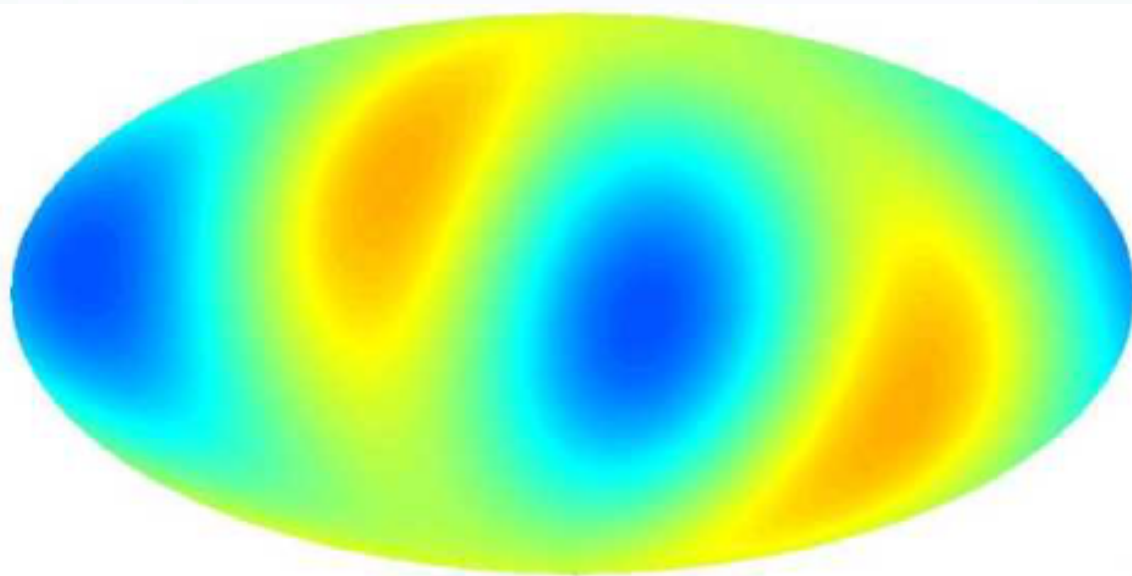
パワーの南北非対称性



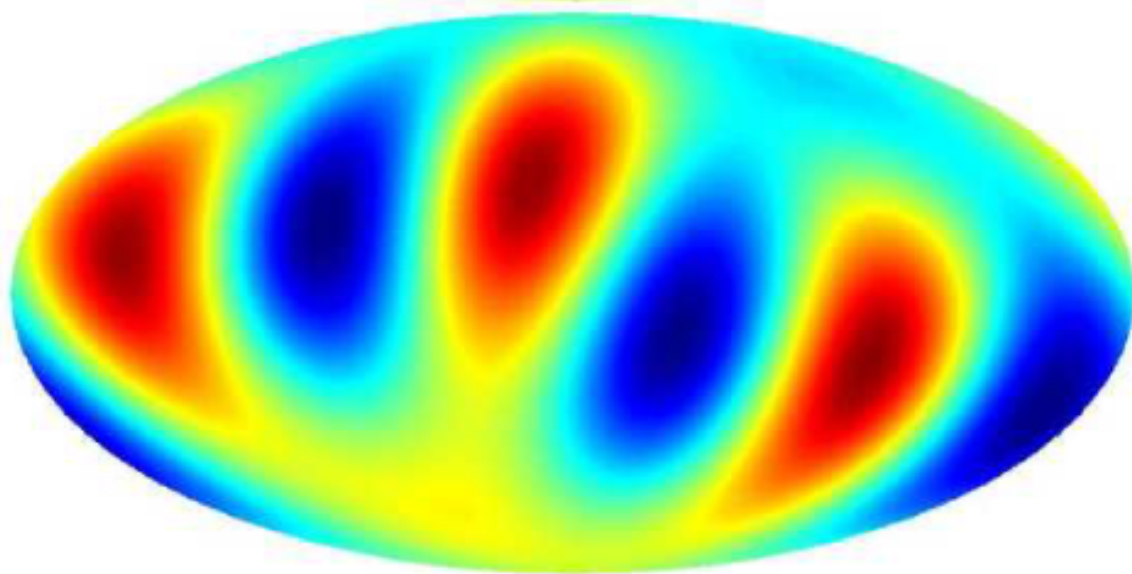
North pole: $(l, b) = (57^\circ, 10^\circ)$

Eriksen et al.
'03, '04

揺らぎの方向が揃っている

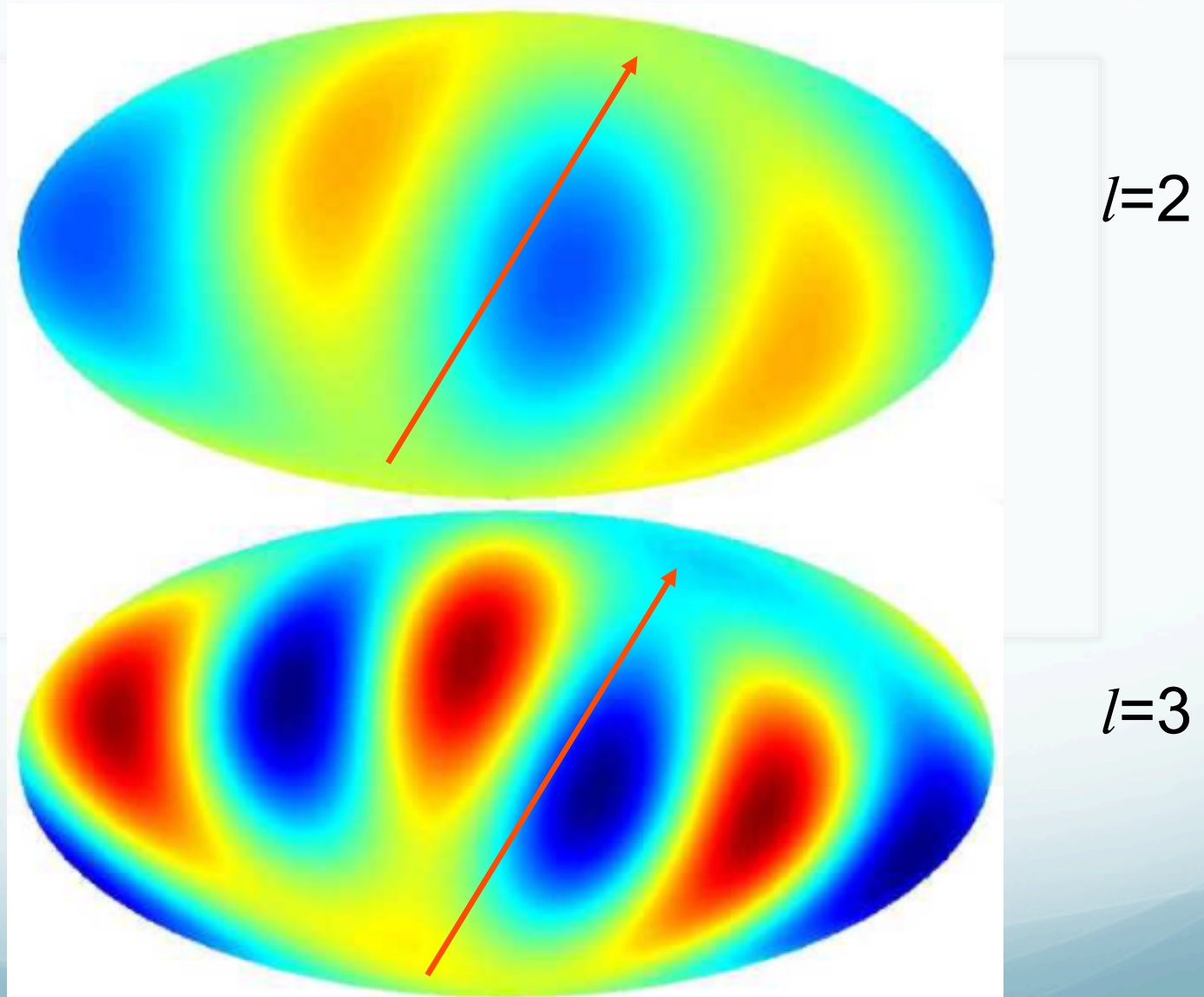


$l=2$



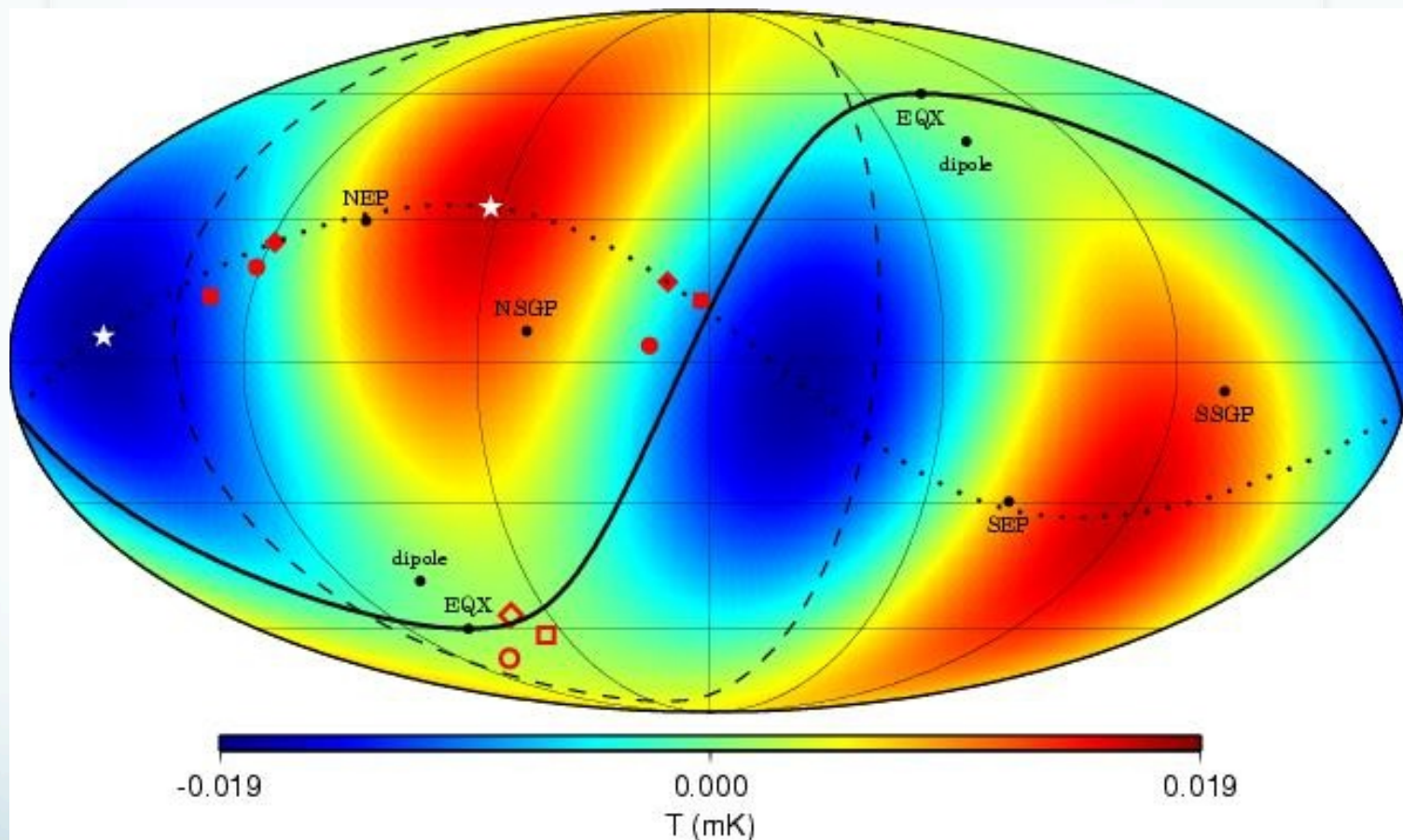
$l=3$

Axis of Evil ?



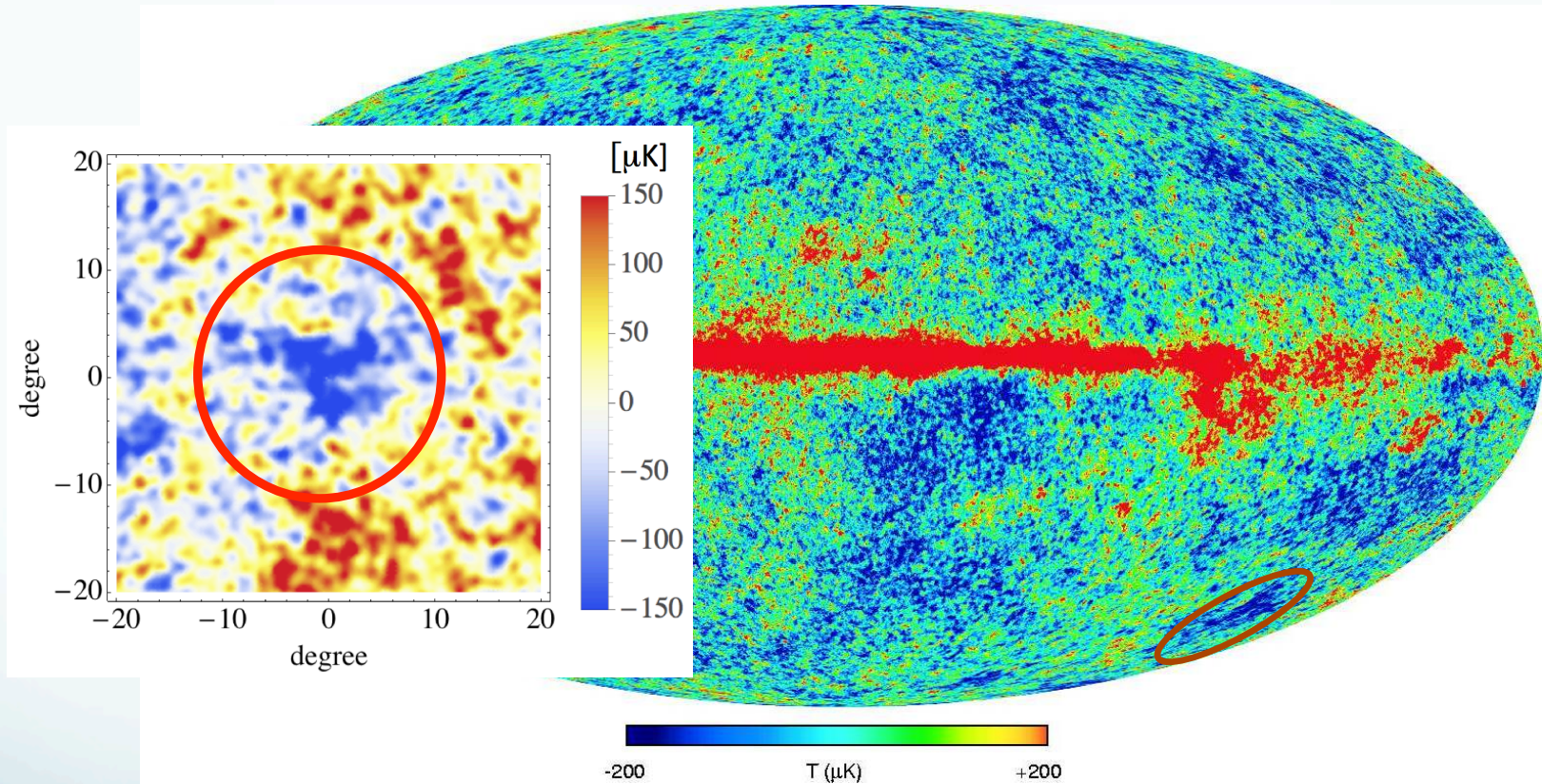
(Tegmark, et al, '03)

Alignment with ecliptic plane? $l=2$



(Copi et al, '06)

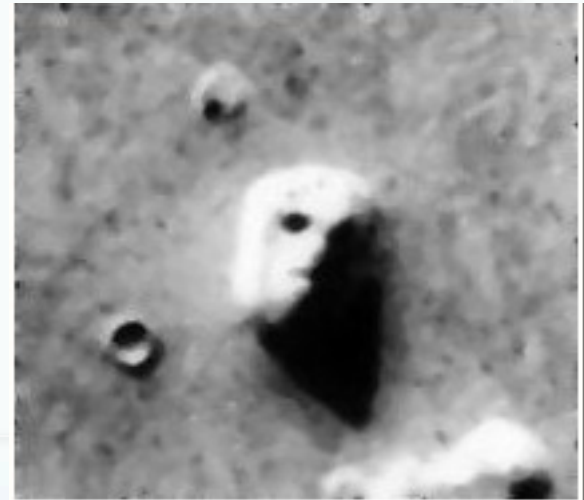
コールド スポット



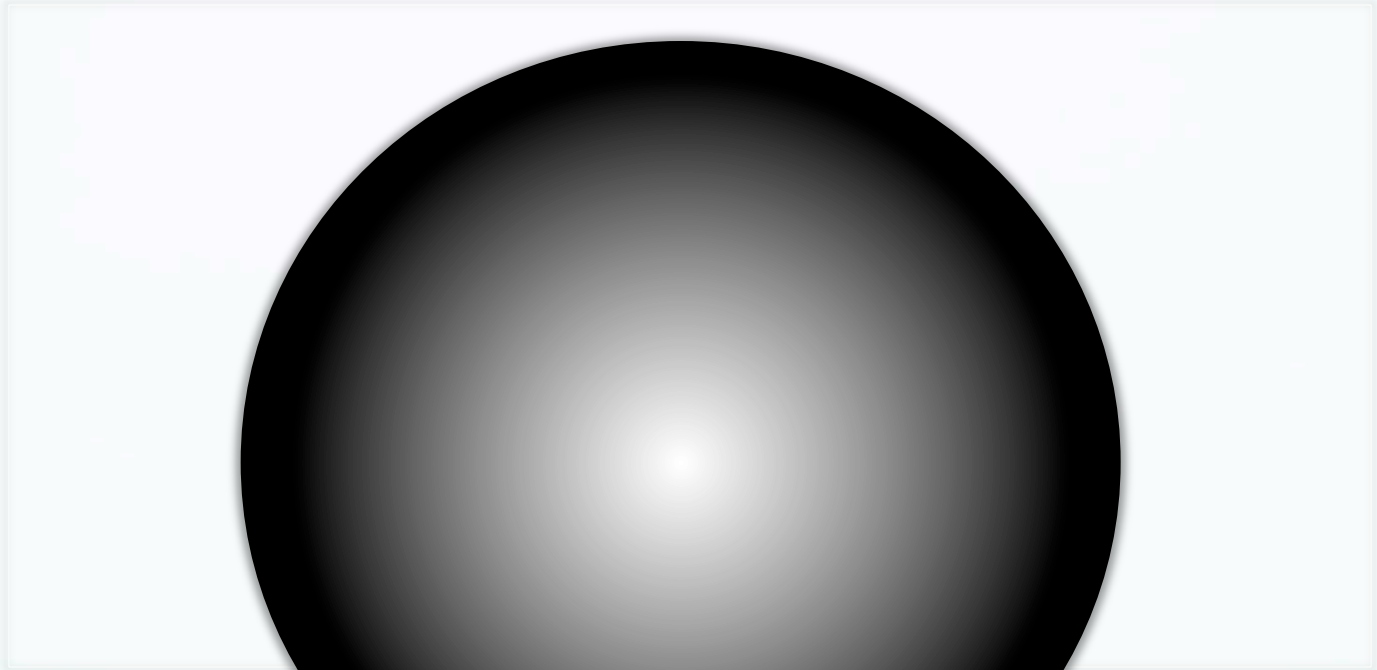
Vielva et al. '05

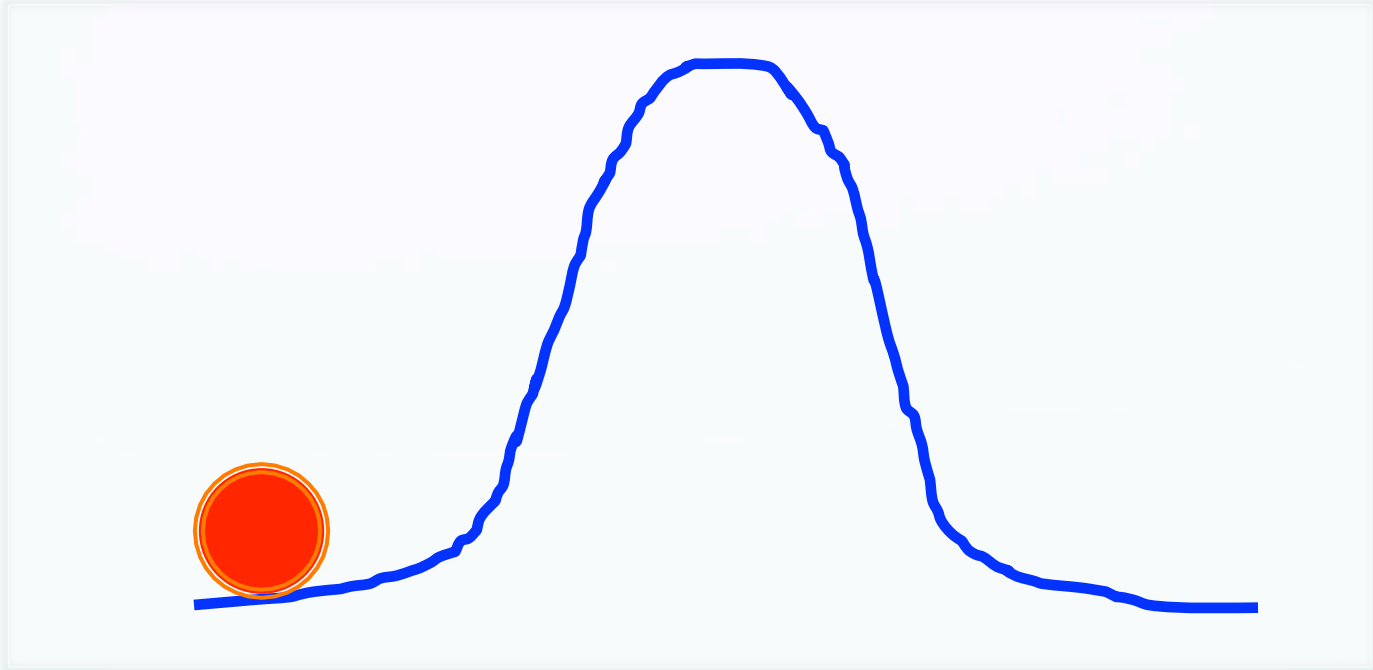
アノーマリーの原因

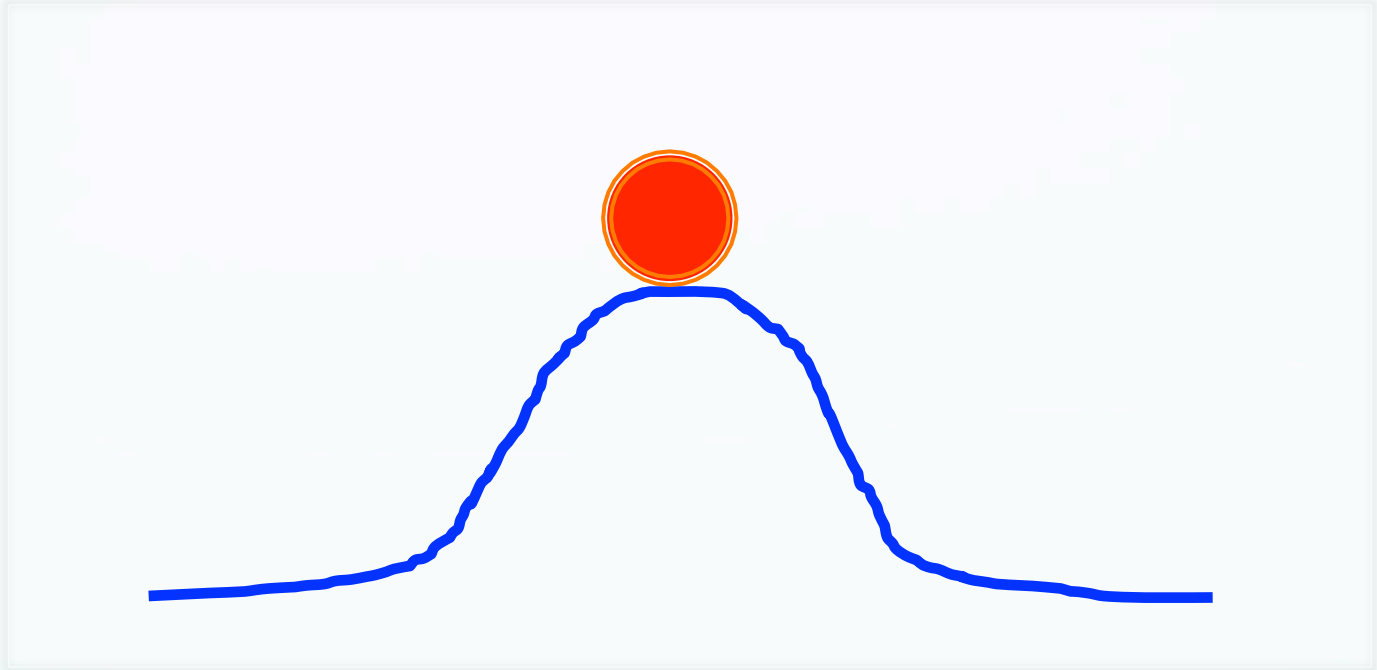
- A posteriori significance
- 非等方宇宙モデル
- Cosmic texture

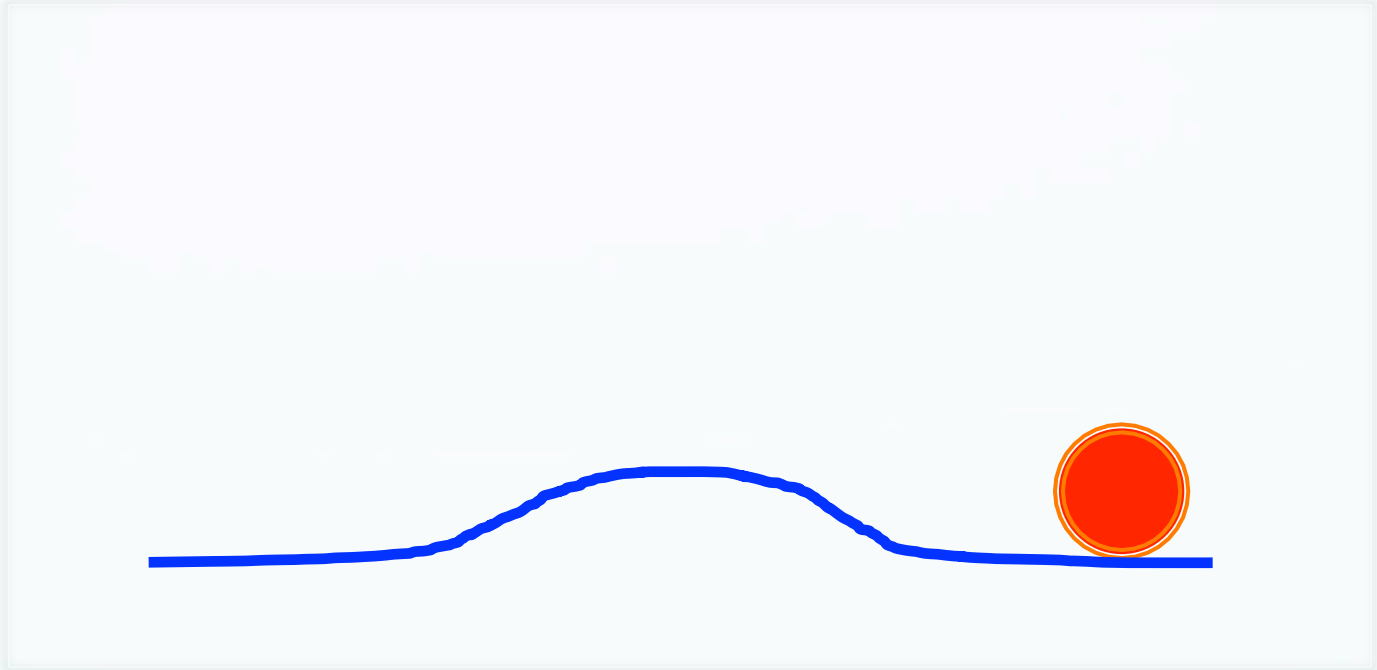


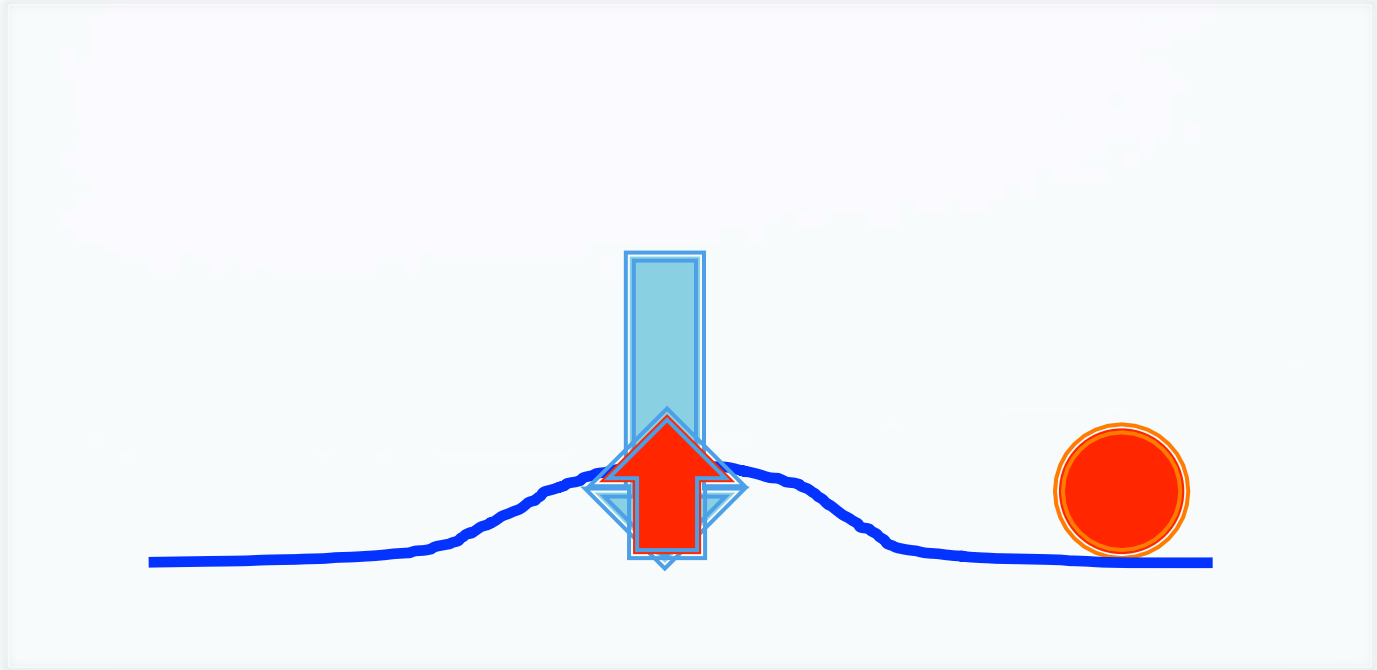
NASA Viking I











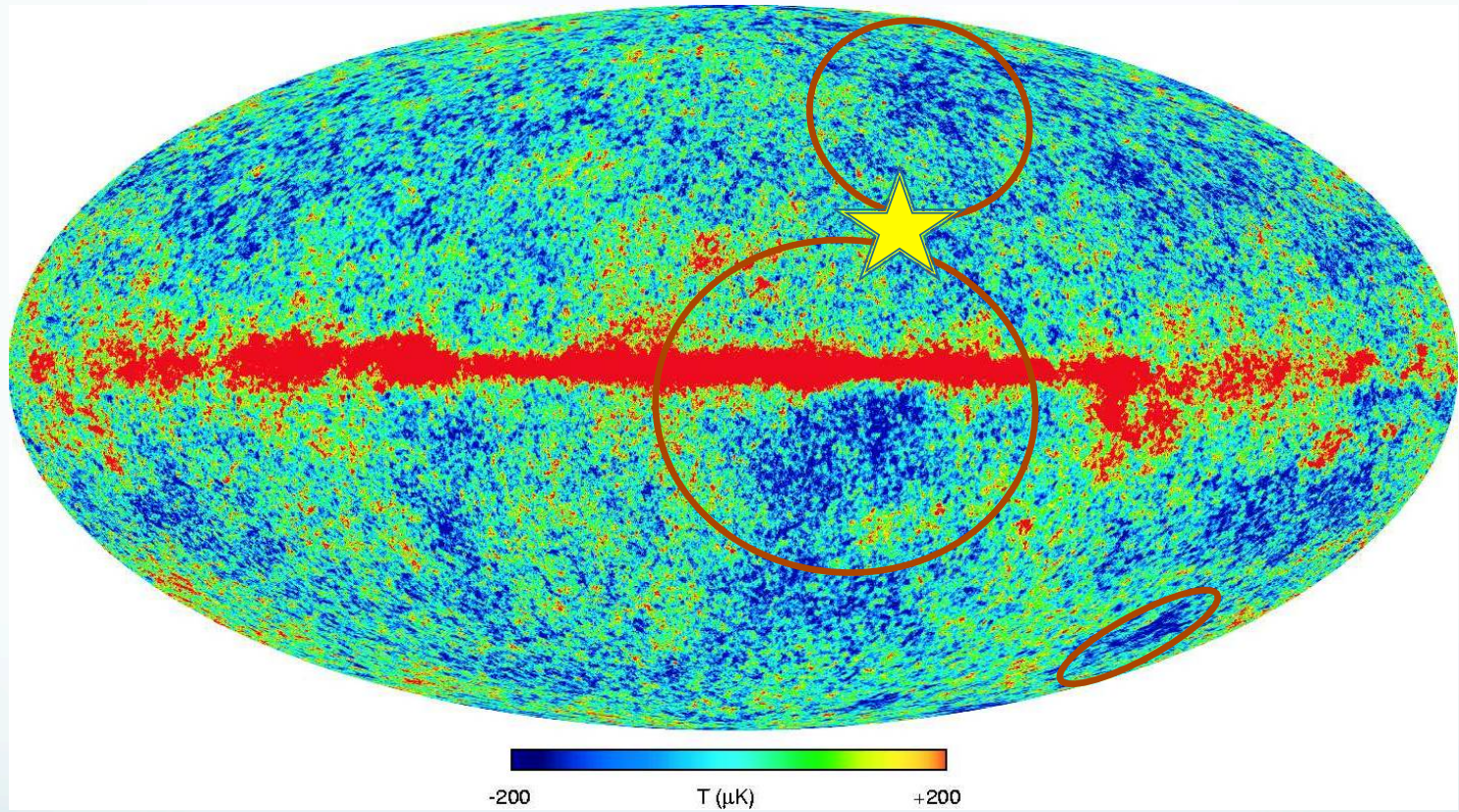
超ボイド説

(Inoue & Silk '06, '07)

- 近傍宇宙に半径200-300Mpc/h、 $\delta \sim -0.3$ のボイド($5 \sim 10 \sigma$)が3つ存在。
- 積分ISW効果によって、加速宇宙では温度低下。

理論家：「ちよつと大きすぎる。」

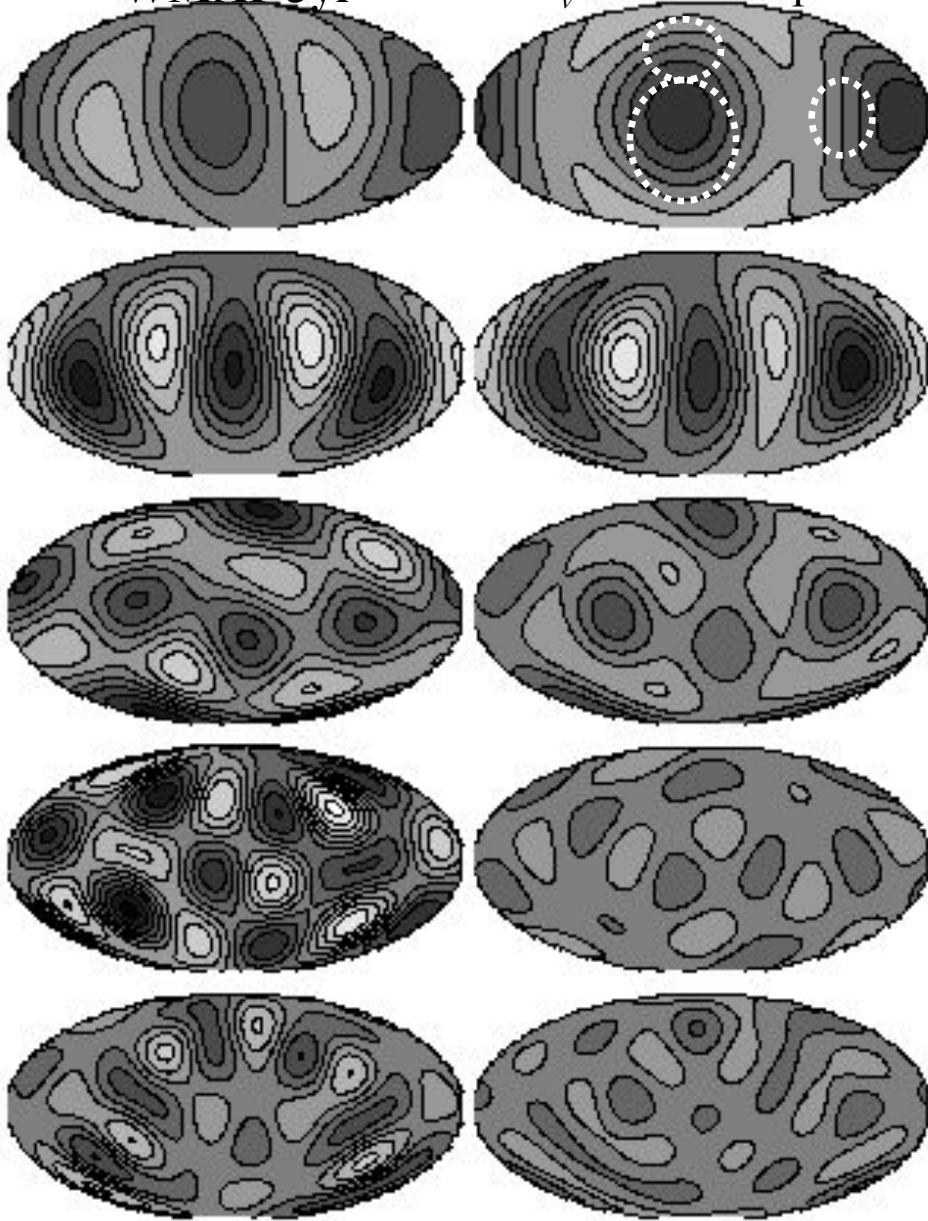
観測家：「宇宙論に興味なし。」



(Inoue & Silk '06)

WMAP 3yr

$r_v = 300h^{-1}\text{Mpc}$



$l=2$

$l=3$

$l=4$

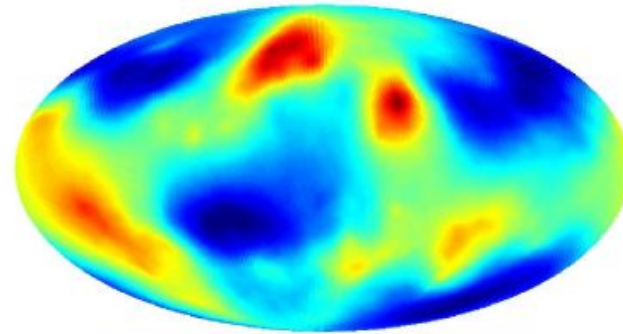
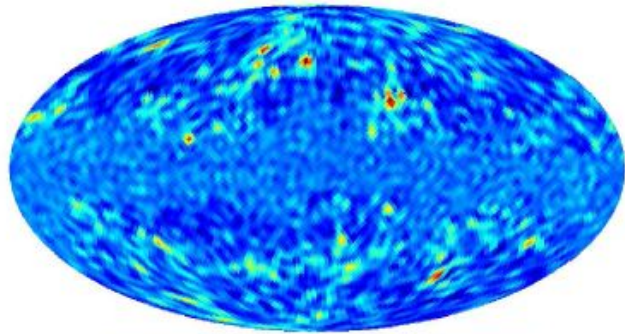
$l=5$

$l=6$

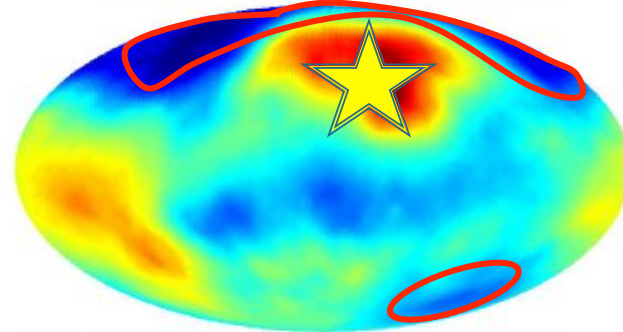
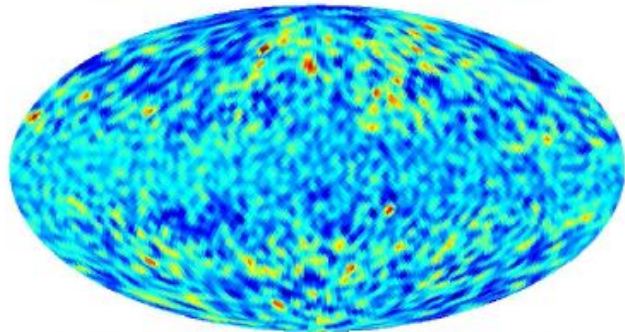


2MASS

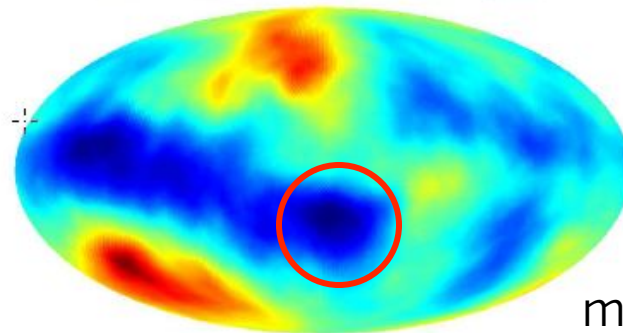
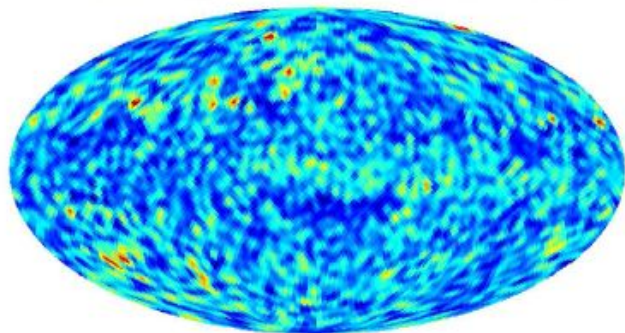
Local ISW



$0.0 < z < 0.1$



$0.1 < z < 0.2$



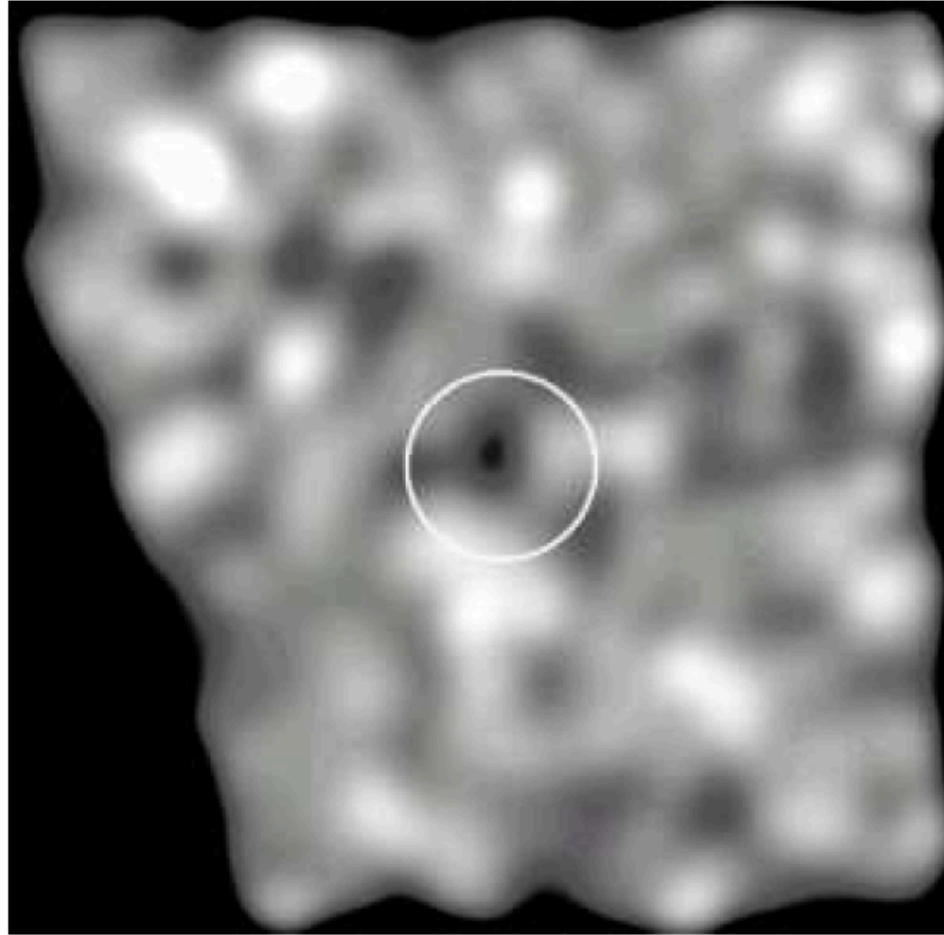
$0.2 < z < 0.3$

mK

(Francis & Peacock, '09)

Figure 1. (Left) The 2D reconstruction of the local density field described in Section 2.1 in three photometric redshift shells: $0.0 < z < 0.1$ (top), $0.1 < z < 0.2$ (middle) and $0.2 < z < 0.3$ (bottom). The plots show overdensity δ on a scale $-0.6 \leq \delta \leq 0.6$. (Right) The corresponding ISW signal in mK computed from the reconstructed density field using equation (4).

NVSS (1.4 GHz)マップ



(Rudnick et al., '07)



Detection of a supervoid aligned with the cold spot of the cosmic microwave background

István Szapudi,¹★ András Kovács,^{2,3,4} Benjamin R. Granett,⁵ Zsolt Frei,^{2,3} Joseph Silk,⁶ Will Burgett,¹ Shaun Cole,⁷ Peter W. Draper,⁷ Daniel J. Farrow,⁷ Nicholas Kaiser,¹ Eugene A. Magnier,¹ Nigel Metcalfe,⁷ Jeffrey S. Morgan,¹ Paul Price,⁸ John Tonry¹ and Richard Wainscoat¹

¹*Institute for Astronomy, University of Hawaii 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, HI 96822, USA*

²*Institute of Physics, Eötvös Loránd University, Pázmány Péter sétány 1/A, 1117 Budapest, Hungary*

³*MTA-ELTE EIRSA 'Lendület' Astrophysics Research Group, Pázmány Péter sétány 1/A, 1117 Budapest, Hungary*

⁴*Institut de Física d'Altes Energies, Universitat Autònoma de Barcelona, E-08193 Bellaterra (Barcelona), Spain*

⁵*INAF OA Brera, Via E. Bianchi 46, I-23807 Merate, Italy*

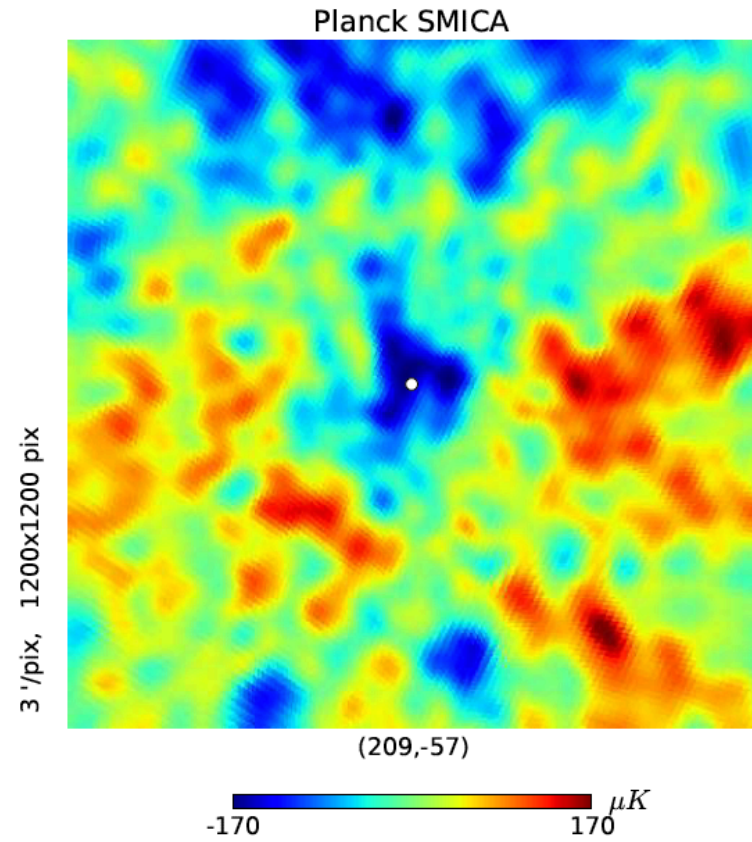
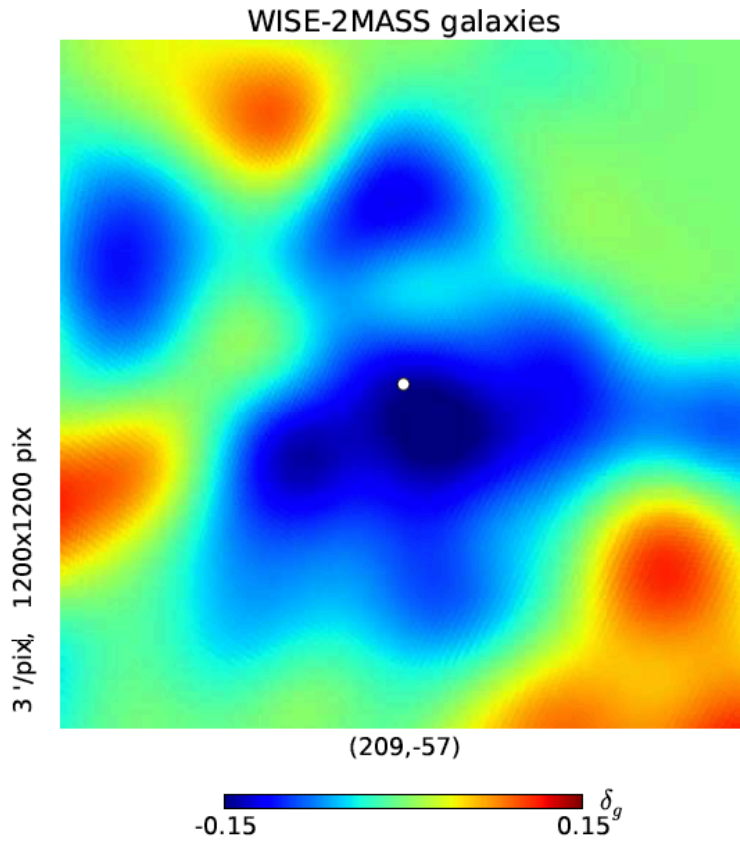
⁶*Department of Physics and Astronomy, The Johns Hopkins University, Baltimore, MD 21218, USA*

⁷*Department of Physics, Durham University, South Road, Durham DH1 3LE, UK*

⁸*Department of Astrophysical Sciences, Princeton University, Princeton, NJ 08544, USA*

バリオン(銀河)

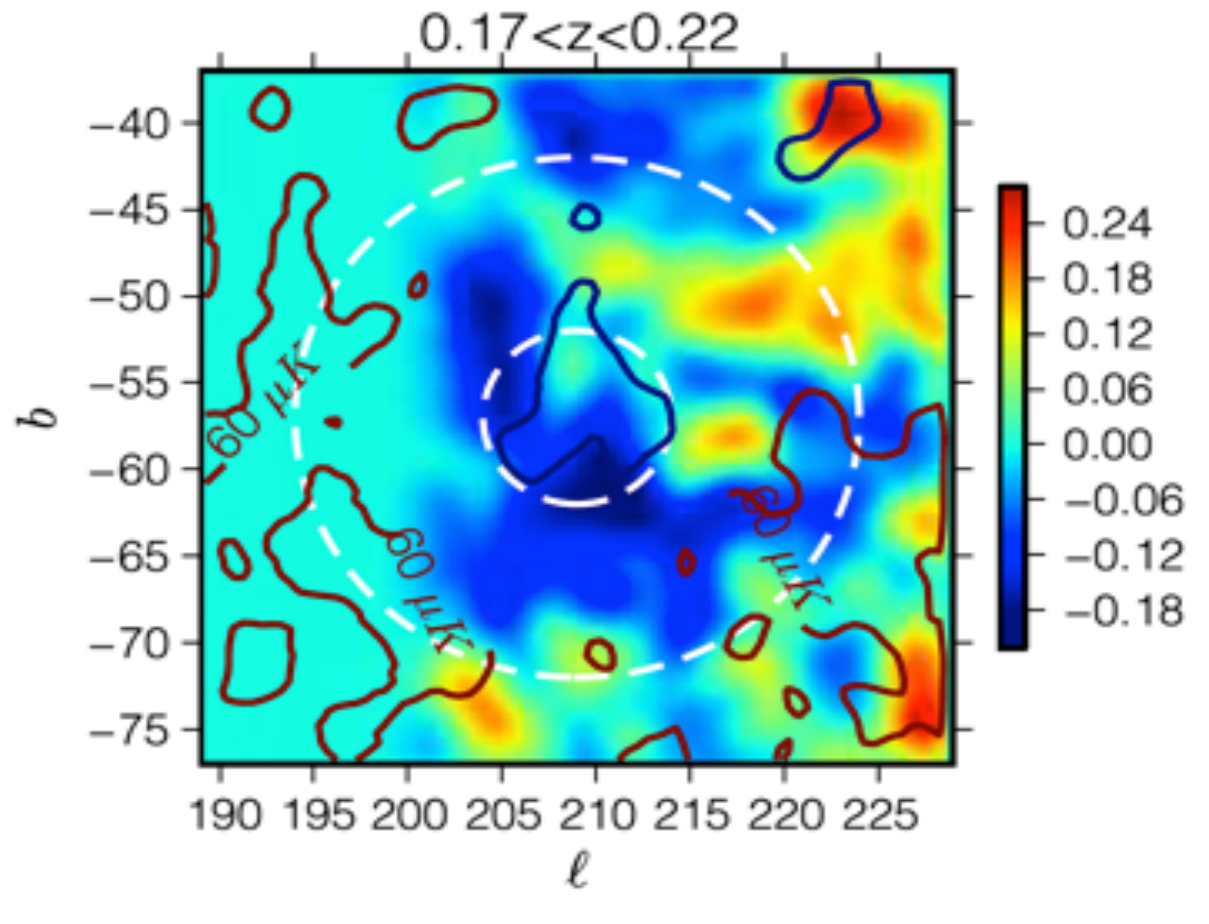
CMB



(Szapudi et al., '15)

バリオンゆらぎ δ (galaxy)

(WISE-2MASS-PS1)



(Szapudi et al., '15)

WISE-2MASS 超ボイド

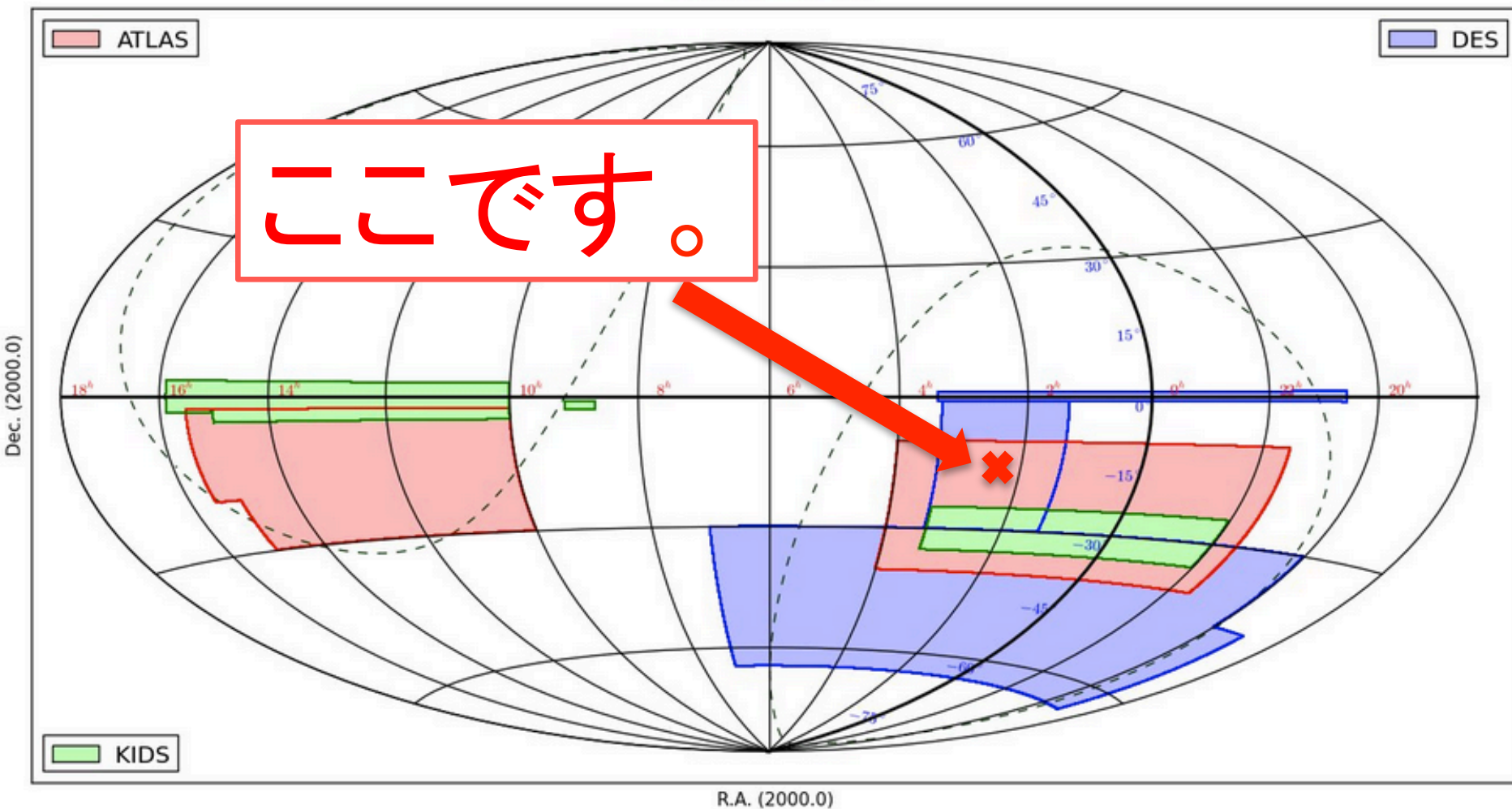
- 半径 $220 \pm 50 \text{ Mpc}/h$ 、 $\delta \sim -0.14 \pm 0.04$
赤方偏移 $z = 0.22 \pm 0.03$
- Λ CDMモデルでは 3.3σ の構造。



新しい物理？

DES サーベイ領域

VST ATLAS Survey



弱重力レンズ効果で探る超ボイド

- Subaru HSCでCS方向をサーベイ
- 深さ $z < 1$ 、 $i < 26$ (DESより深い)
- 領域面積 $1200 \text{deg}^2 / \alpha$ (20度以内)

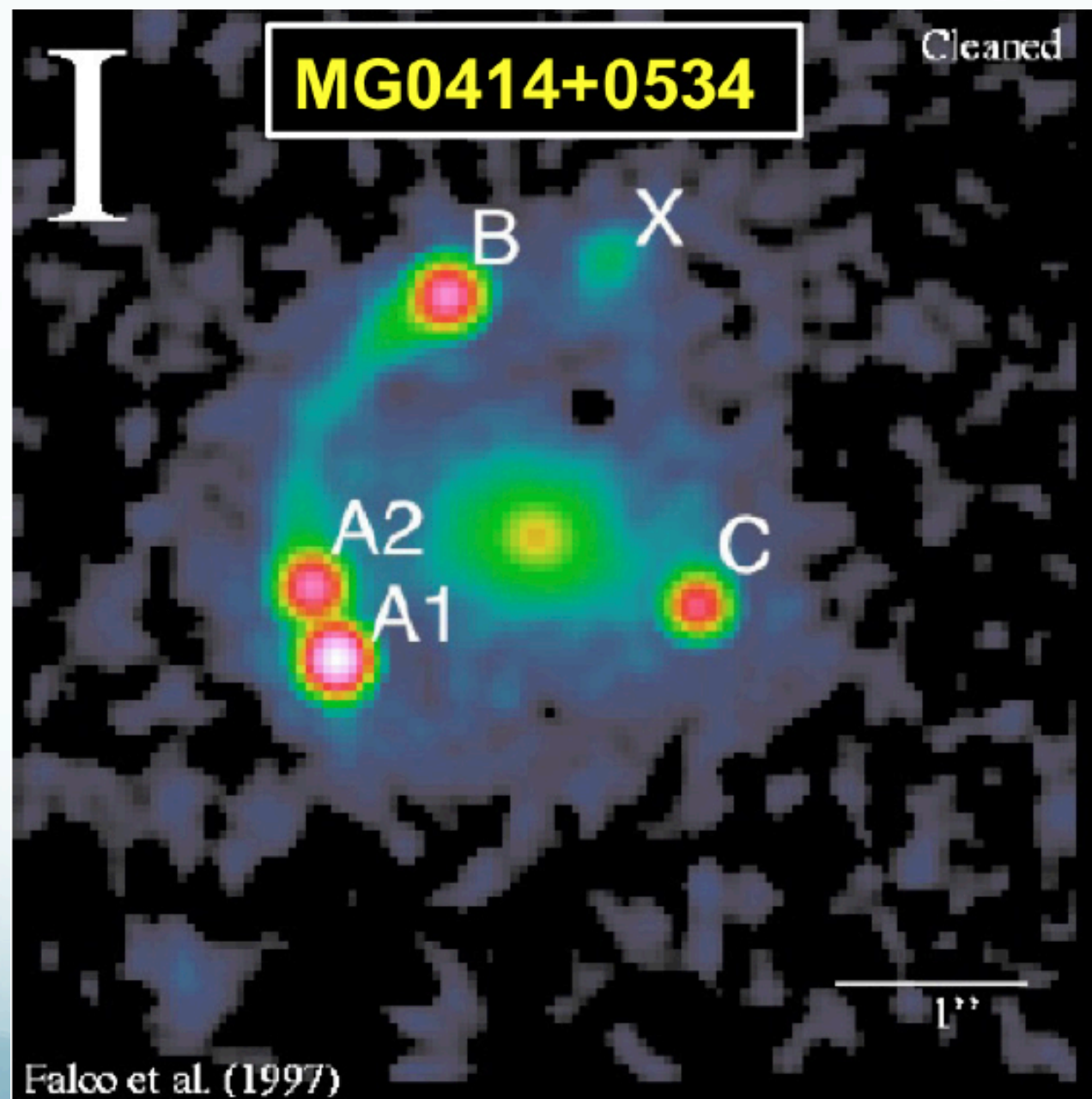


原理的に可能。

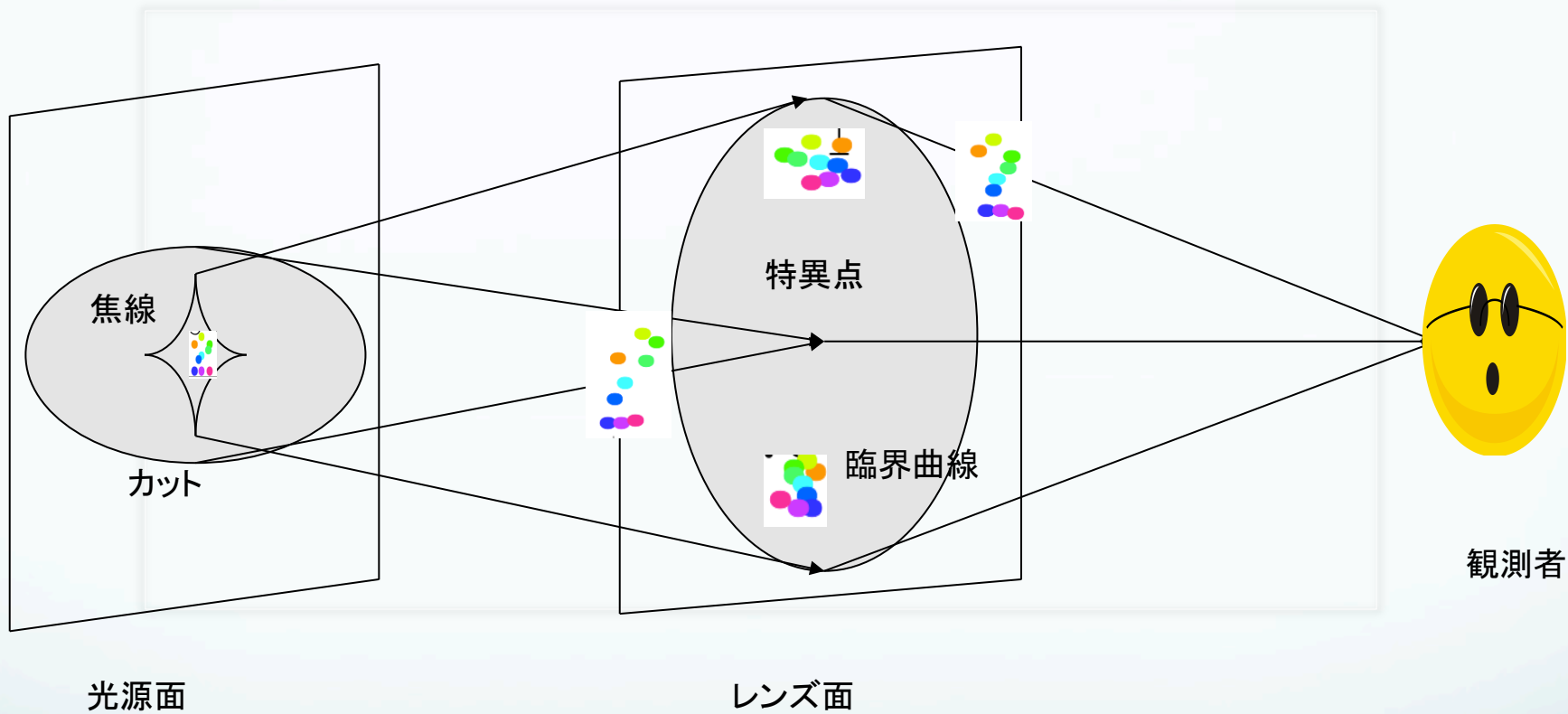
ミニ構造のアノーマリー

ミニ構造のアノーマリーとは

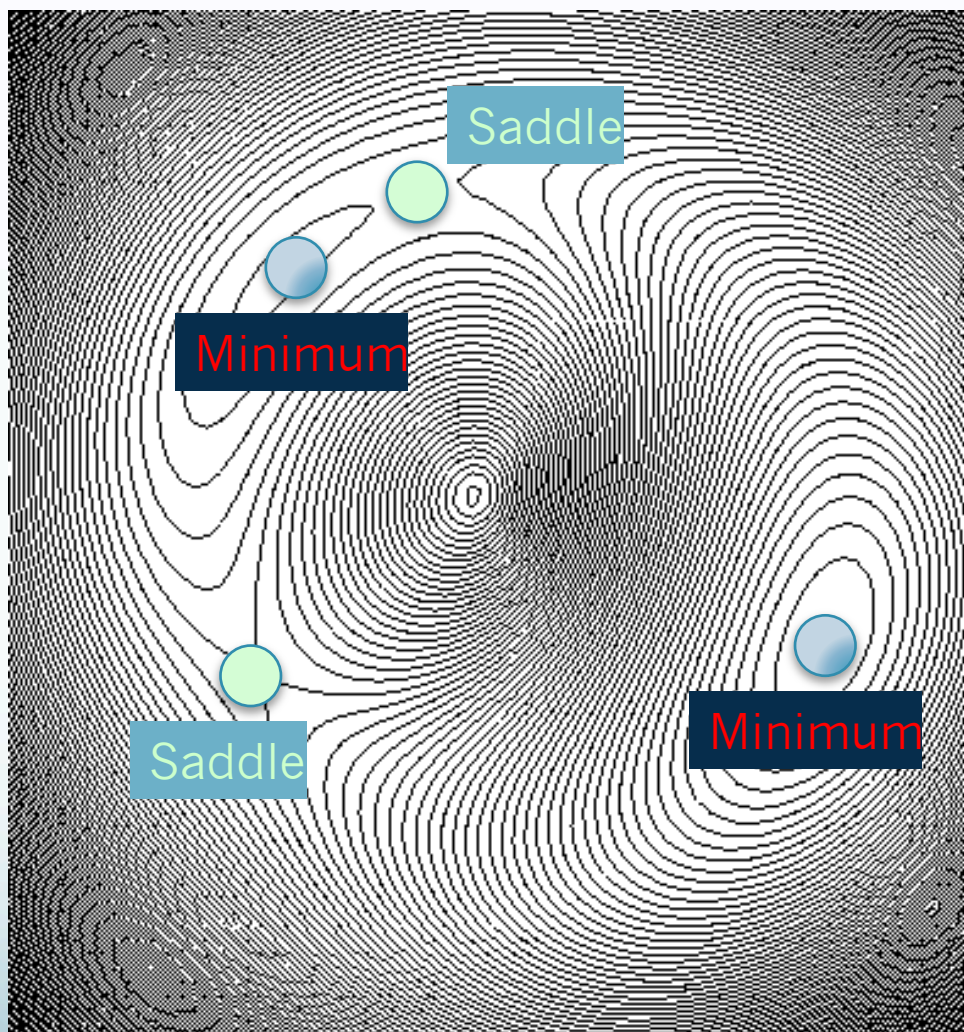
- 4重像レンズのフラックス比の異常
- ミニ構造・・・ $L = 0[10\text{kpc}/h]$ 、 $\delta > 0[100]$



4重像重カレンズ



到達時間面



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)

位置 = 重力 $O[10^{-3} \sim 10^{-4}]$

フラックス = 潮汐力 $O[10^{-1} \sim 10^{-2}]$

Subaru MIR observations

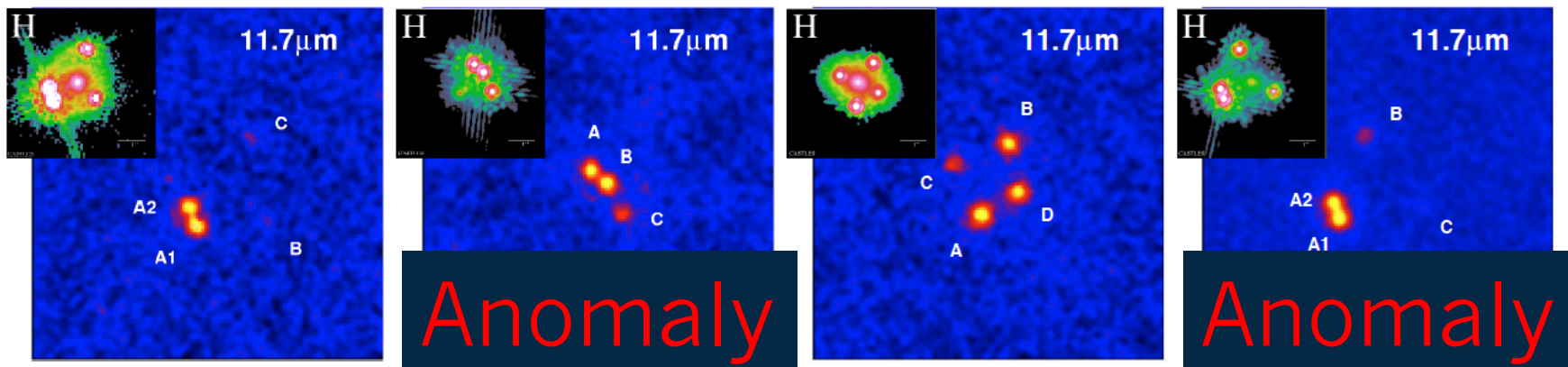
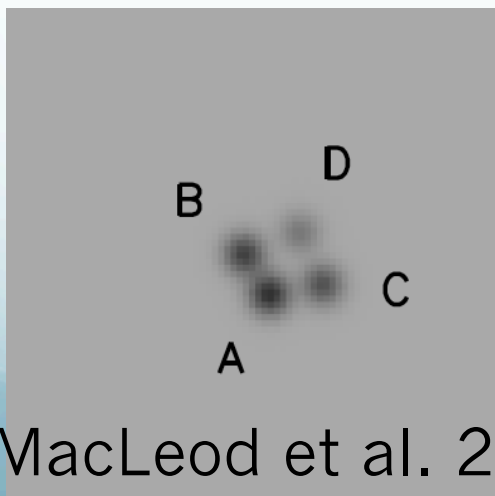
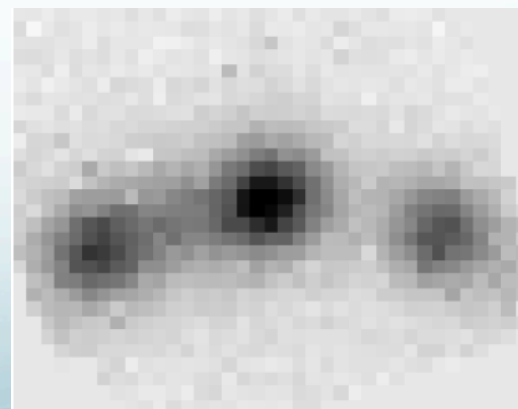


Figure 2: The mid-infrared images of quadruply lensed QSOs obtained by COMICS attached on Subaru telescope. From left to right, PG1115+080, B1422+231, Q2237+030, and MG0414+0534. The insets are their HST images for comparison (taken from CASTLES, <http://cfa-www.harvard.edu/glensdata/>).

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



(MacLeod et al. 2009) MIR



(Sugai et al. 2009) [OIII]

フラックス比異常の起源

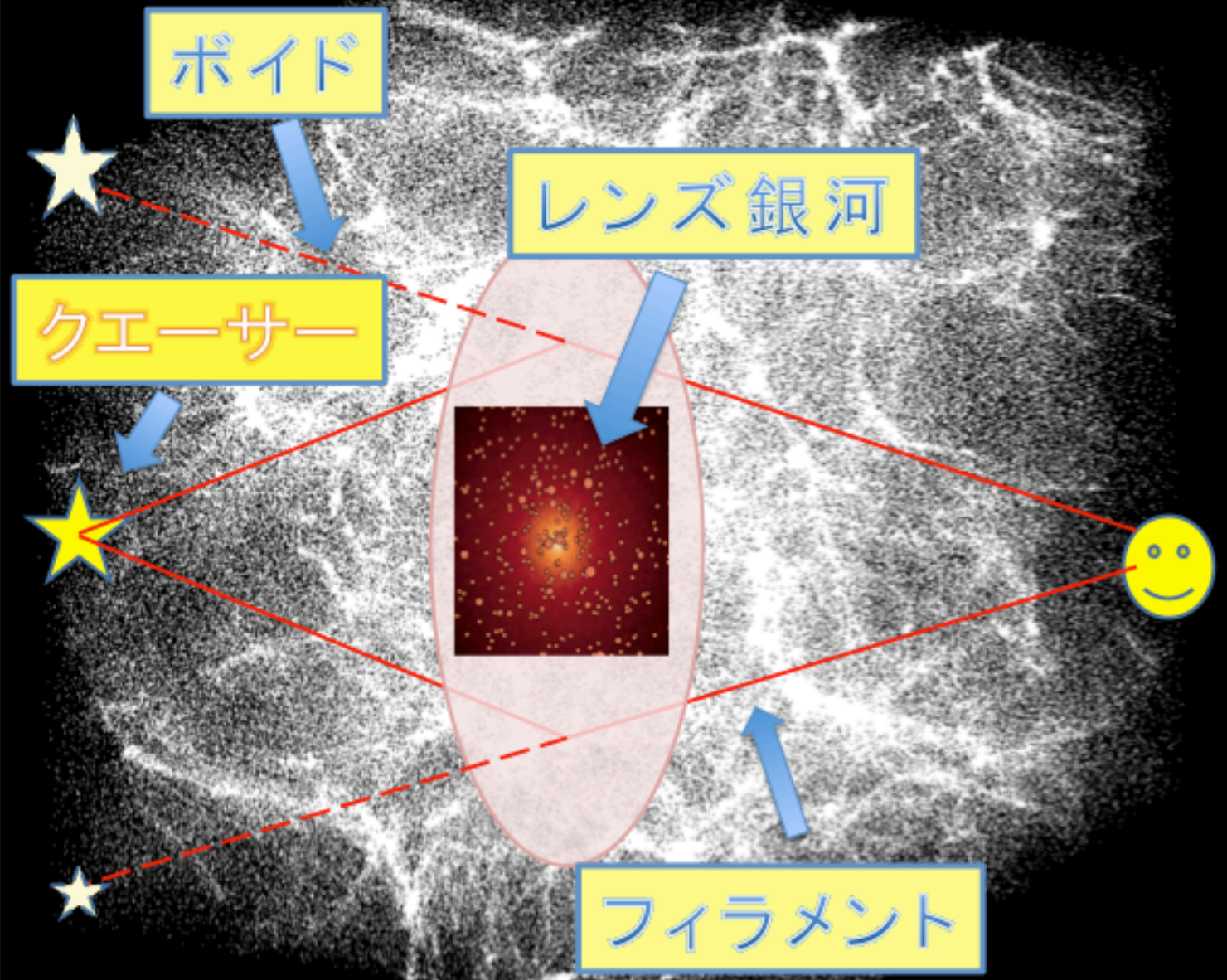
- レンズ銀河のサブハロー
- 複雑な銀河ポテンシャル
- 散乱や吸収

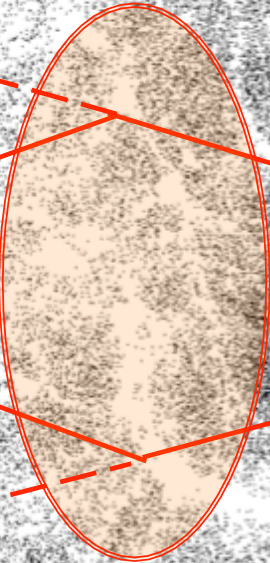
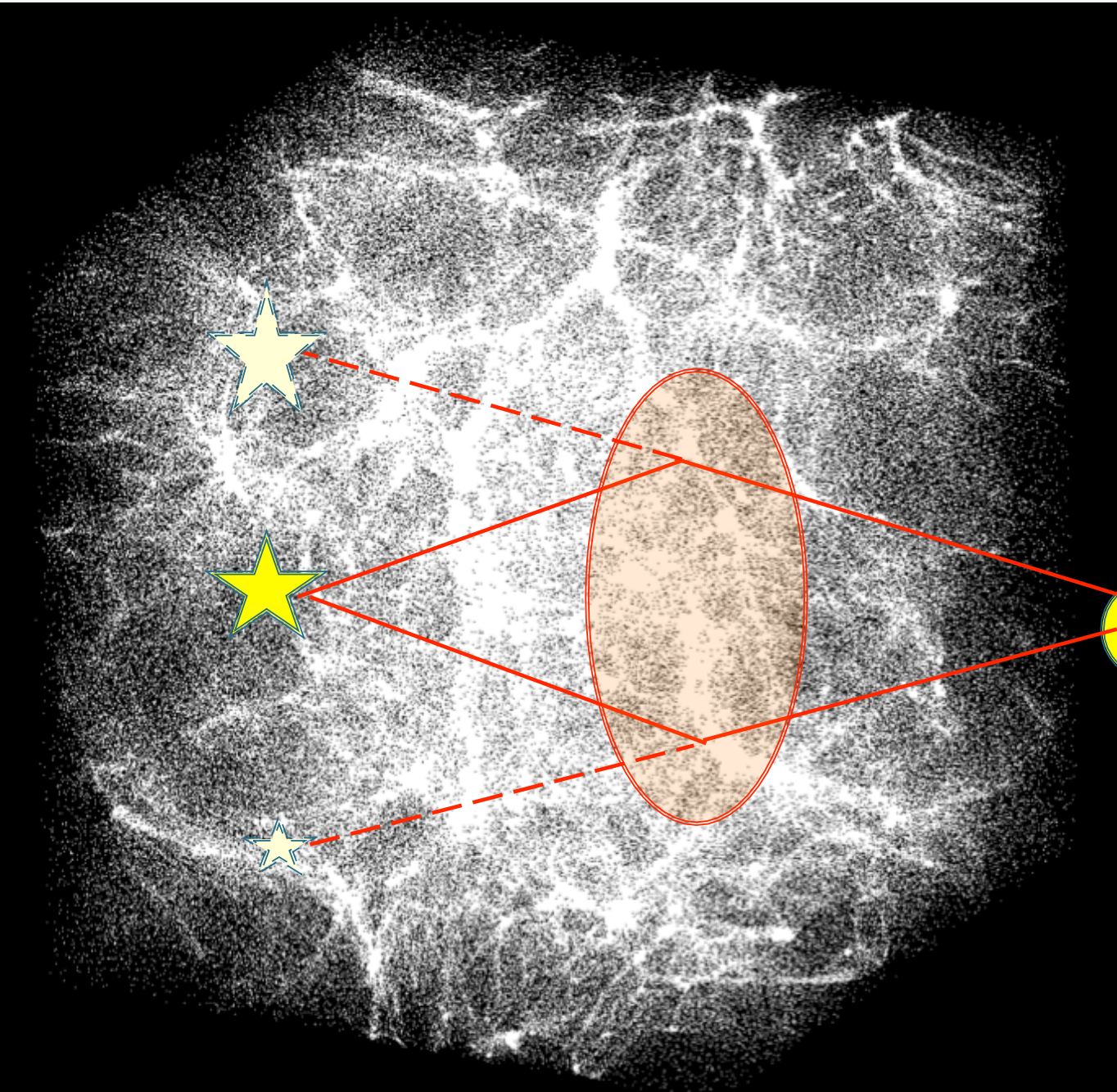
フラックス比異常の起源

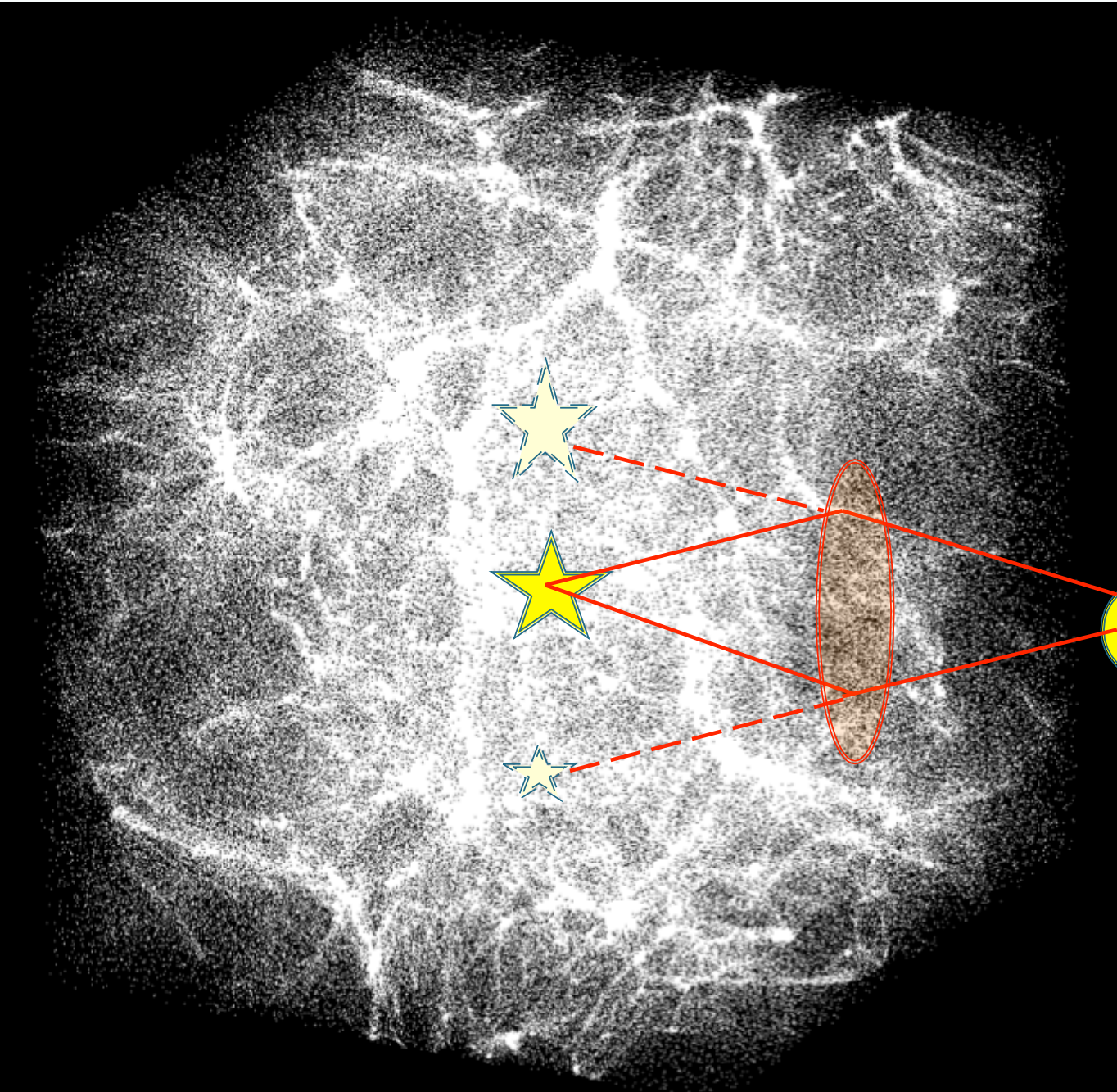
- レンズ銀河のサブハロー
- 複雑な銀河ポテンシャル
- 散乱や吸収
- 視線方向のダークマター(LOSS)

(Inoue, Takahashi '12, Takahashi & Inoue '14, Inoue et al. '15)

➡ LOSSが主に寄与？







New statistic η

magnification contrast

$$\delta = \frac{\delta\mu}{\mu}$$

η : effective magnification perturbation

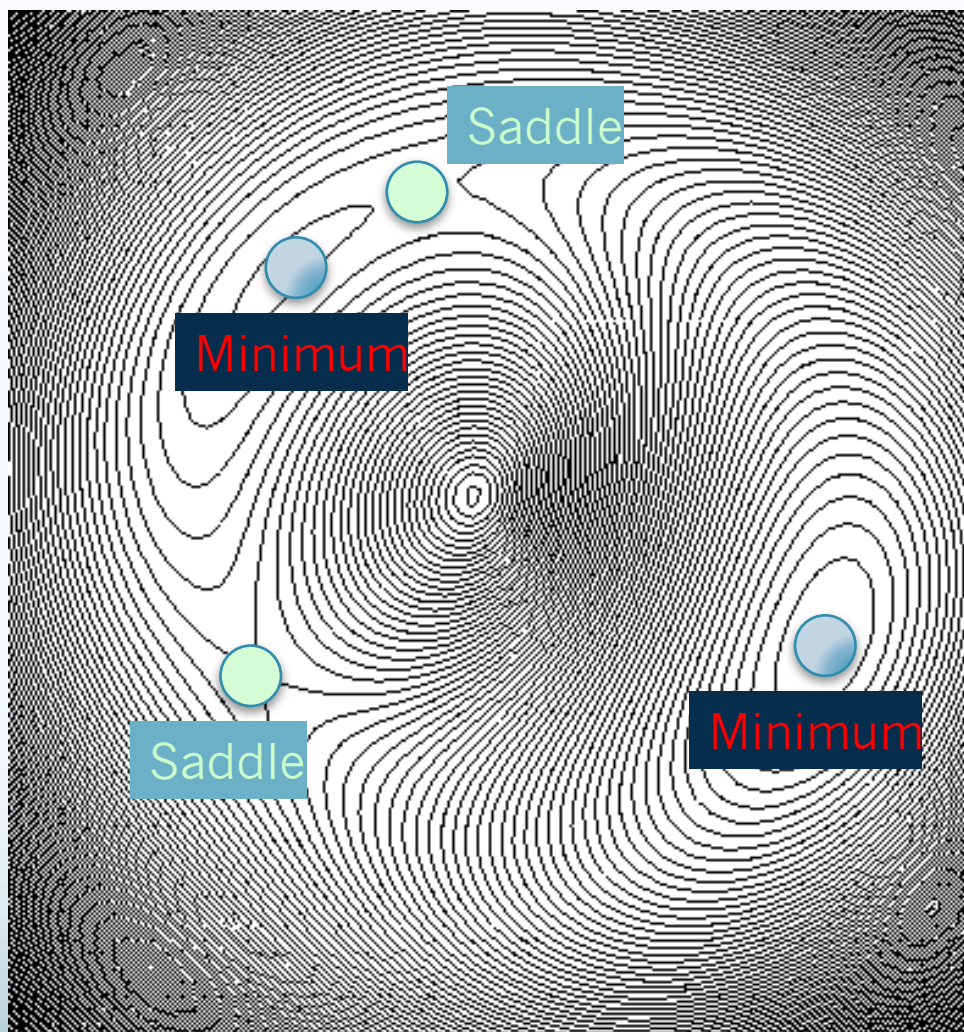
$$\eta^2(A,B,C) = \frac{1}{4} [(\delta_A^\mu - \delta_B^\mu)^2 + (\delta_C^\mu - \delta_B^\mu)^2].$$

A,C: minimum B:saddle

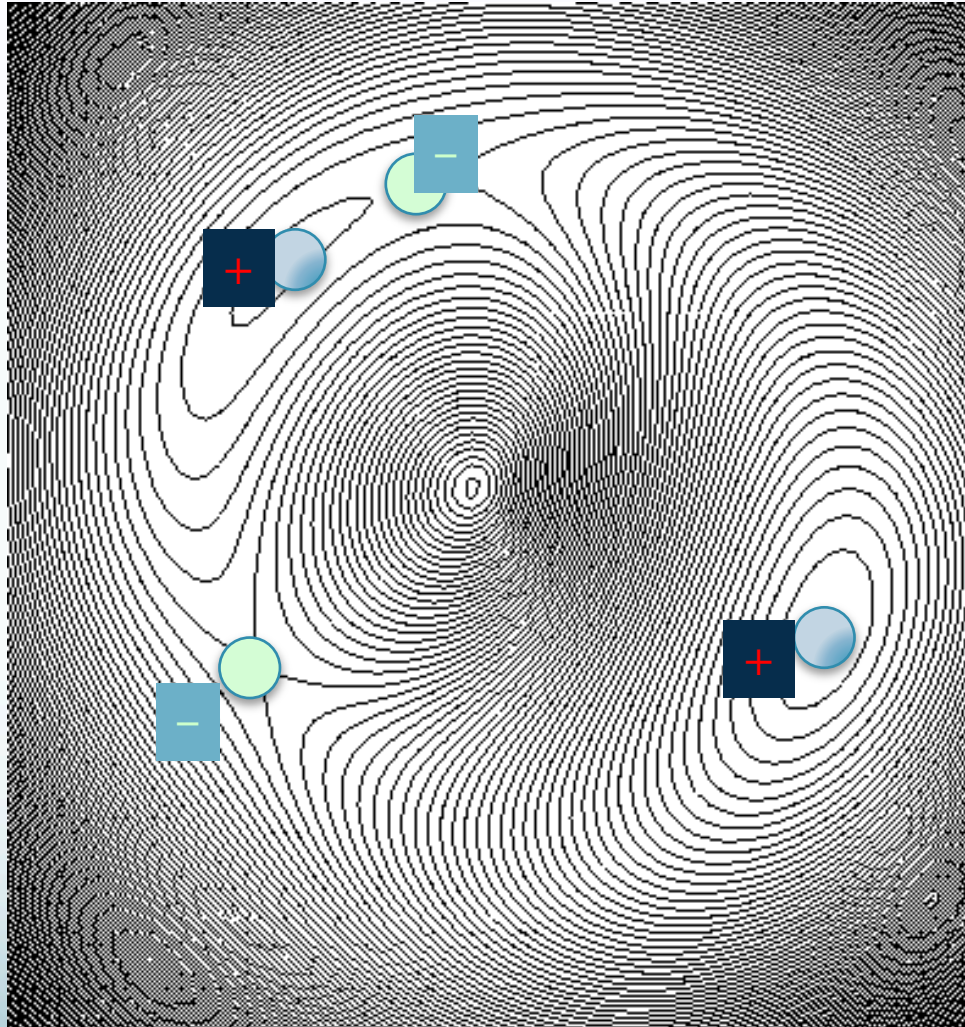
観測値とベストフィットモデルの予言値から計算

$$\eta^2 \approx \frac{1}{4} \left[\left(\frac{AB_0}{A_0B} - 1 \right)^2 + \left(\frac{CB_0}{C_0B} - 1 \right)^2 \right].$$

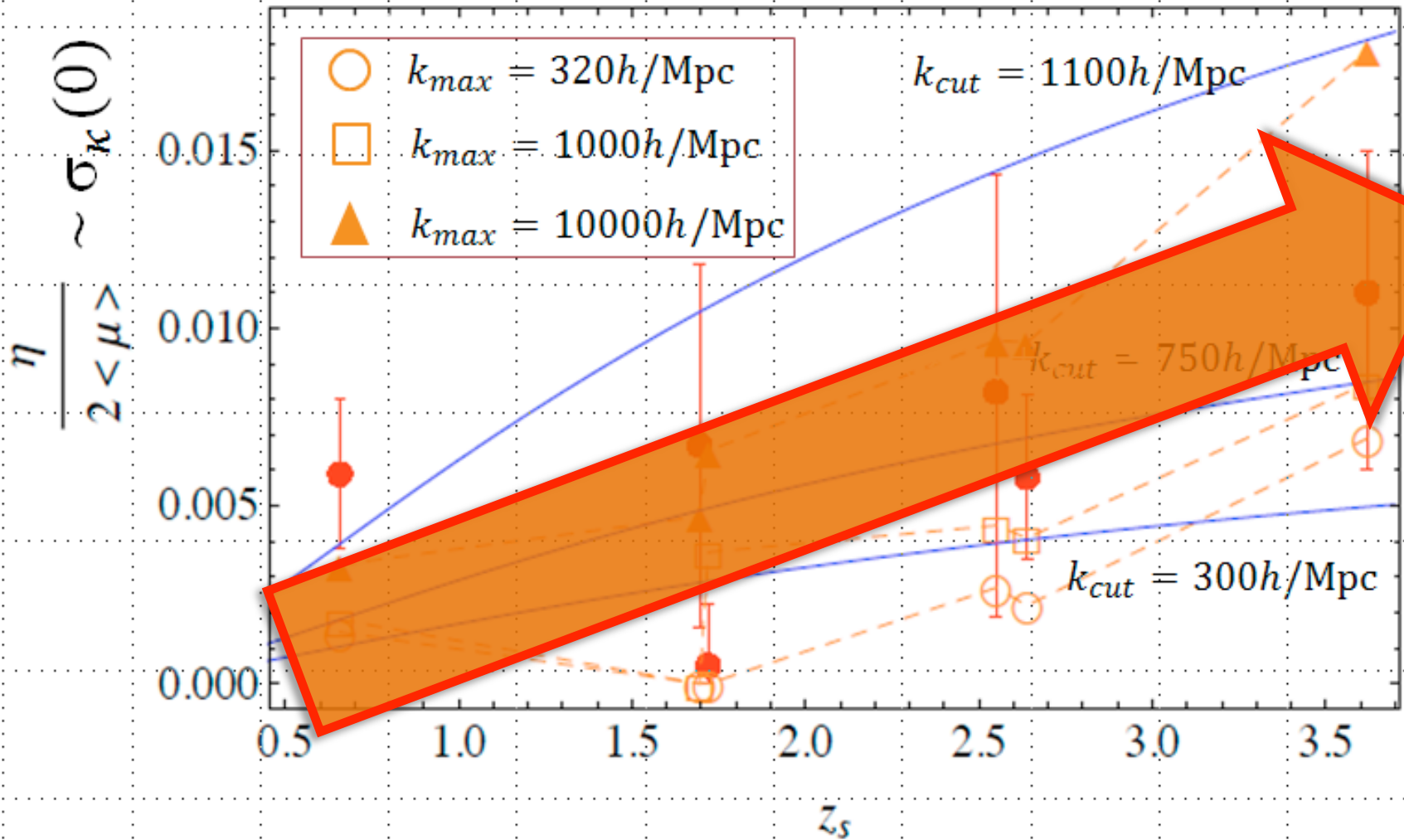
到達時間面



正質量によるフラックス変化



収束のソース赤方偏移依存

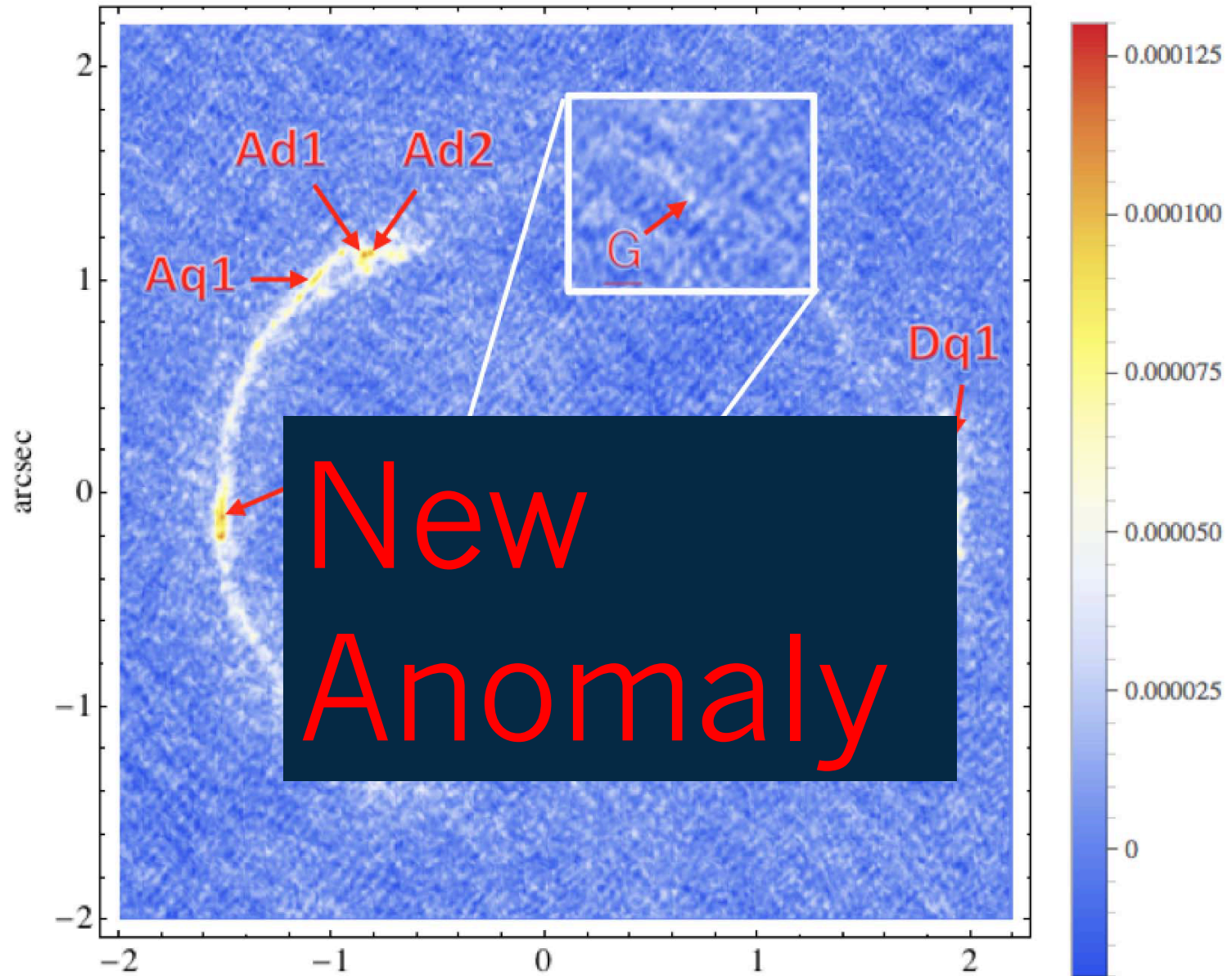


(Inoue & Takahashi, '12)

フラックス比異常

- フラックス比異常を示す数 = 5/8
- コンバージェンス摂動は遠方光源ほど大きい傾向。
- 視線方向のダークマターで説明可能だがサブハローの影響もある可能性あり。

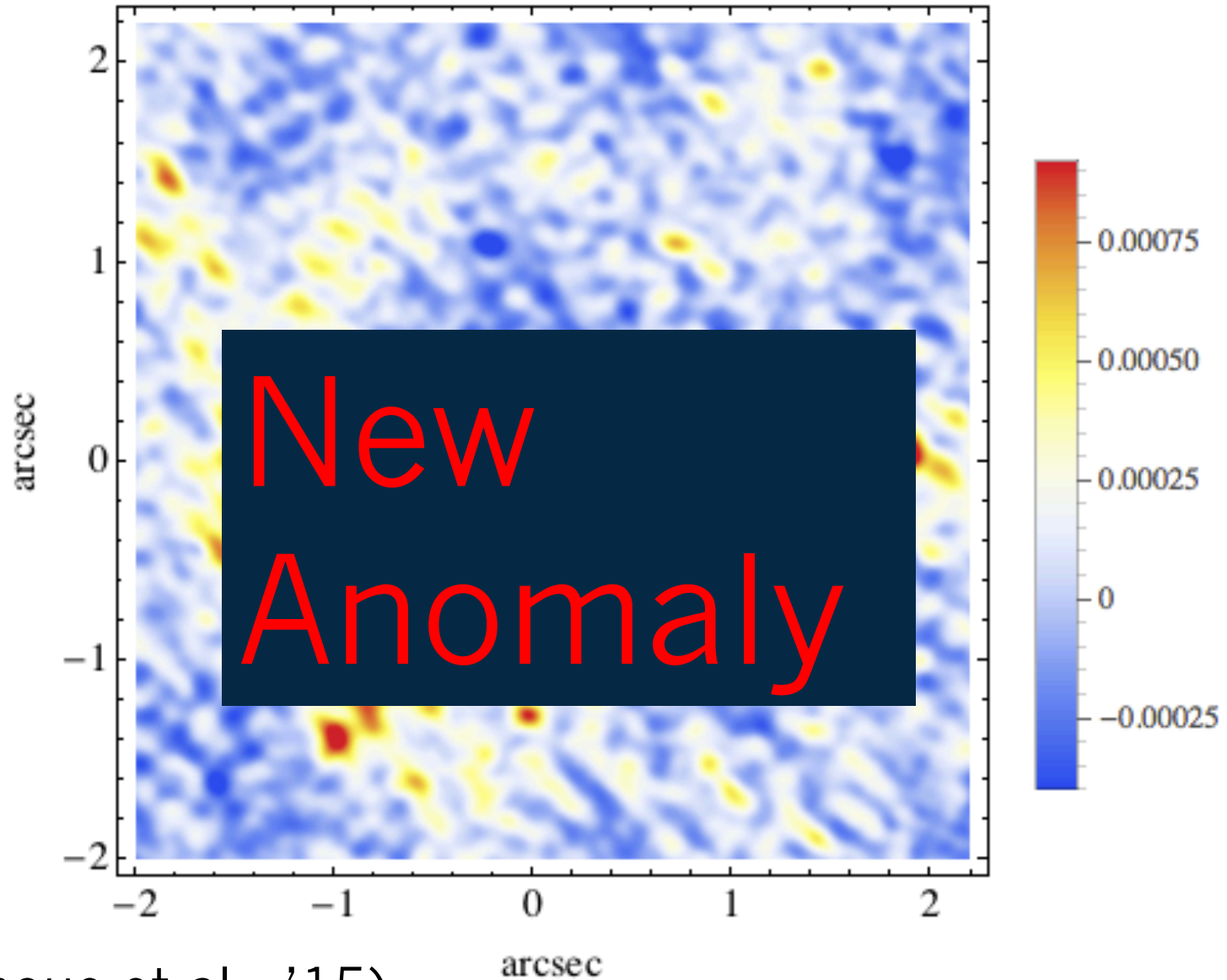
SDP.81 (波長1mm 連続光)



(Inoue et al., '15)

arcsec (ALMA verification data 2015)

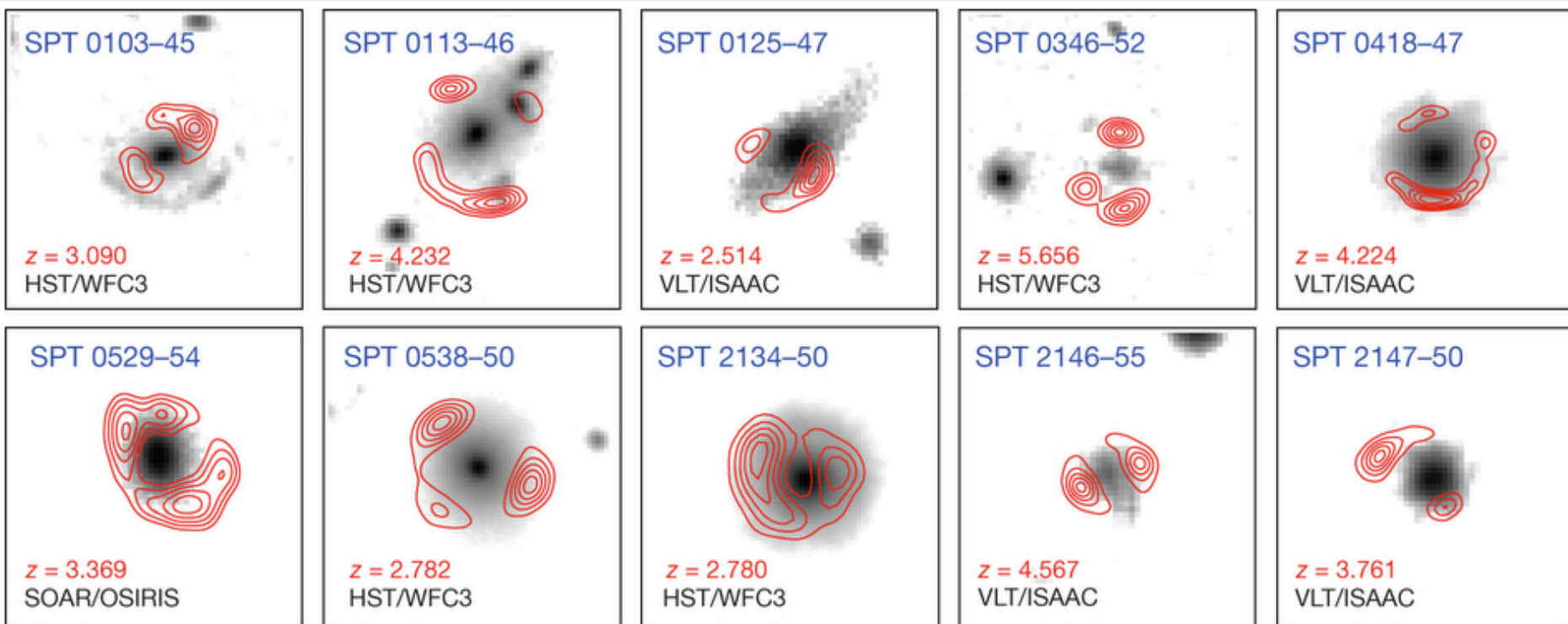
SDP.81(CO(8-7) 輝線)



(Inoue et al., '15)

(ALMA verification data 2015)

ALMA 870 μm + HST(NIR)



より高解像度へ。

今後の課題

- ▶ レンズターゲット数を増やす。 $\sim 10 \rightarrow \sim 100$
 - ▶ ソース赤方偏移依存性
 - ▶ 負の質量摂動の有無
- ▶ バリオンの効果を採り入れる。



WDM、SIDMの制限

まとめ

- CMB大角度ゆらぎ異常は**超ボイド**の存在を示唆している。
- 重カレンズフラックス比異常は**視線方向のミニ構造**を示唆している。
- 今後**弱い重カレンズ効果**を観測することが重要である。