

重力レンズの基礎と応用

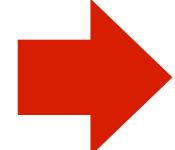
大栗 真宗

(東京大 RESCEU/物理/Kavli IPMU)

slides available at:

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

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)

銀河団

- 宇宙最大の自己重力束縛系
- ダークマターが卓越
- いろいろな方法で観測
 - 可視光 (メンバー銀河)
 - X線
 - 電波 (Sunyaev-Zel'dovich)
 - 重力レンズ



Abell 689

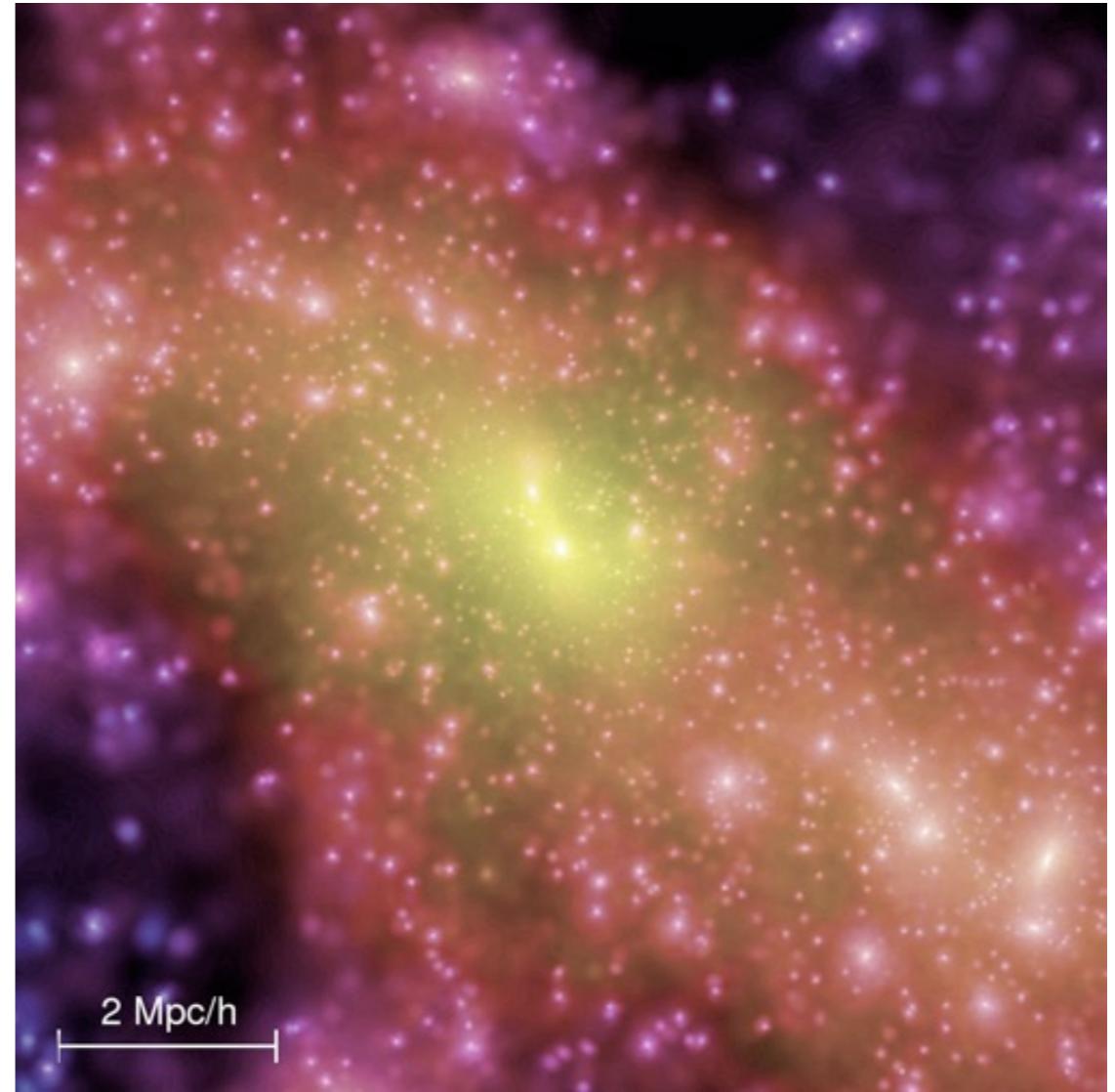


Bullet cluster

(NASA/ESA)

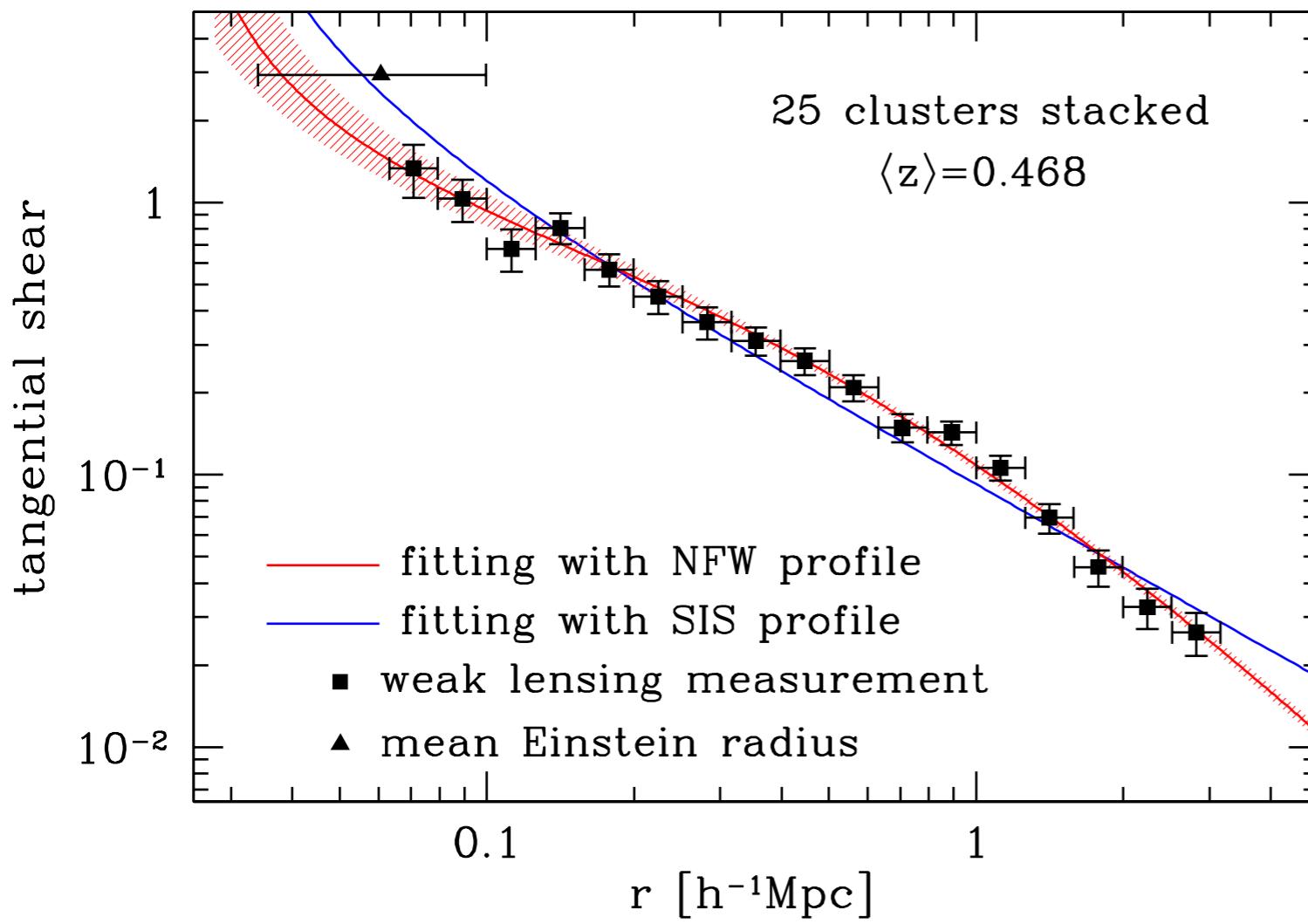
銀河団で調べるダーコマター

- 現在の標準理論（仮定）：
冷たい無衝突ダーコマター
- その性質の仮定はダーコマター分布に本質的に重要
 - NFW分布
 - 大きな非球対称性
 - 星分布とちいさなズレ
- 重力レンズはダーコマターの性質の解明にすでに大きな貢献



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

動径密度分布



$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$

- 多数の銀河団で
スタックし高S/N
- 標準ダークマター
理論の予言分布
(NFW profile) と
高精度で一致

(see also Okabe et al. 2010,
2013; Umetsu et al. 2014;
Niikura et al. 2015)

中心集中度 (concentration)

- NFW密度プロファイル

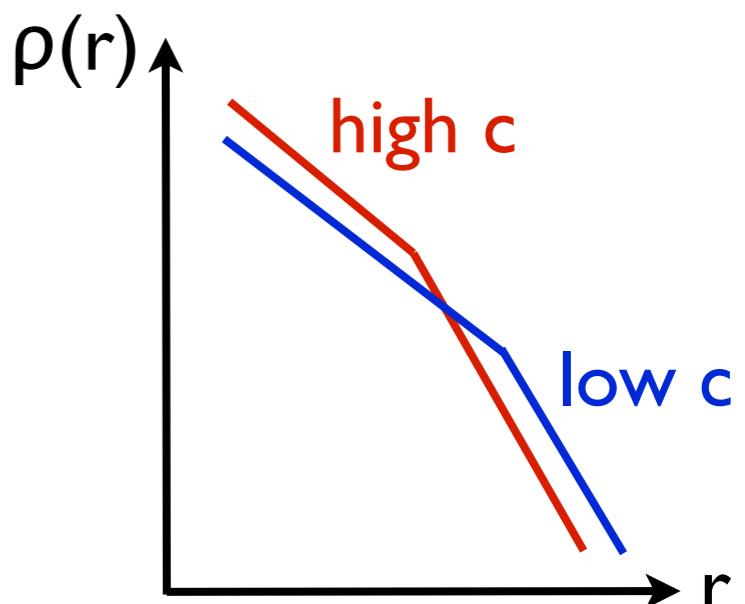
$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}$$

- ビリアル半径 r_{vir}

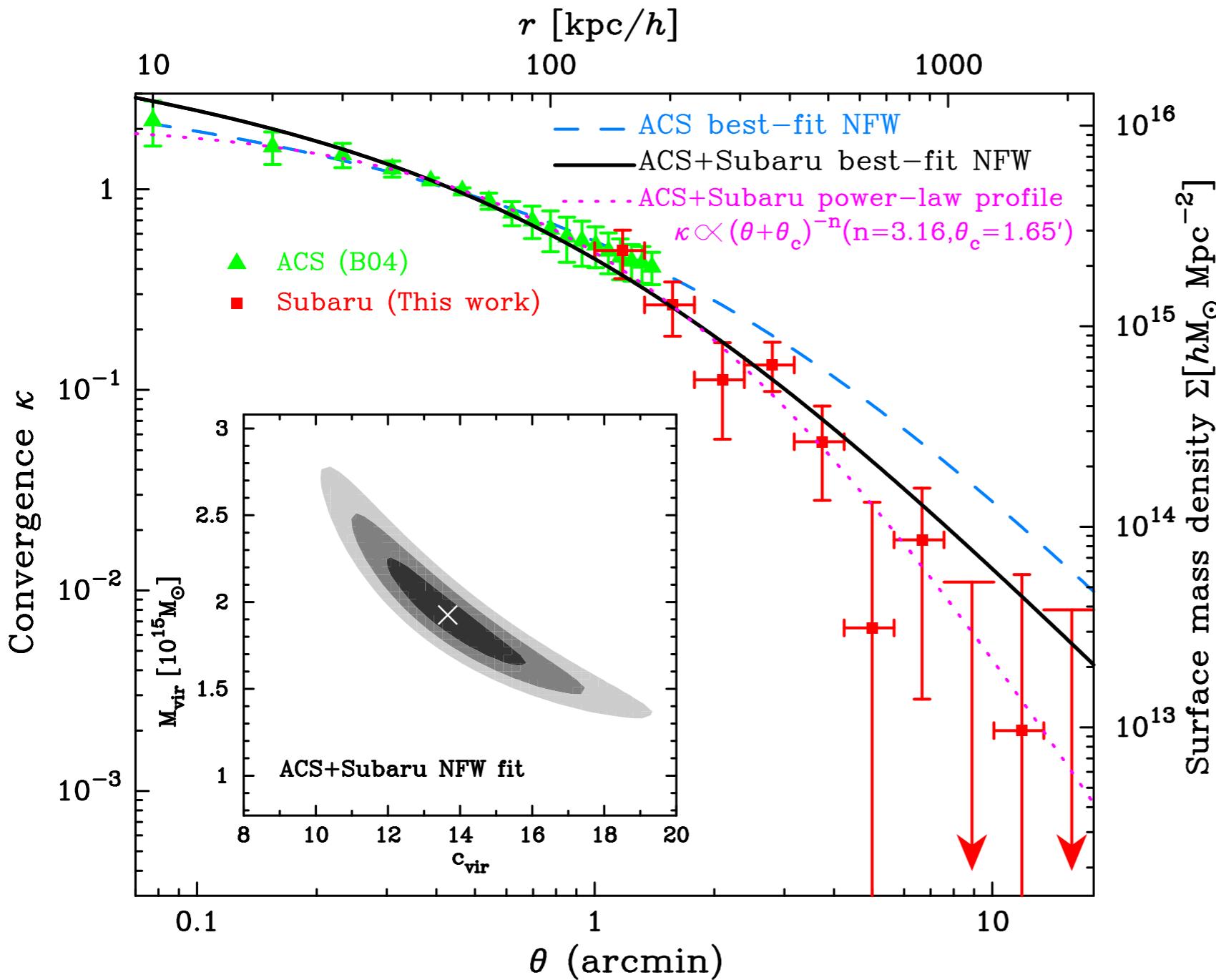
$$M_{\text{vir}} = \int_0^{r_{\text{vir}}} \rho(r) 4\pi r^2 dr = \frac{4\pi}{3} r_{\text{vir}}^3 \Delta_{\text{vir}} \bar{\rho}$$

- 中心集中度 (concentration)

$$c_{\text{vir}} = \frac{r_{\text{vir}}}{r_s}$$



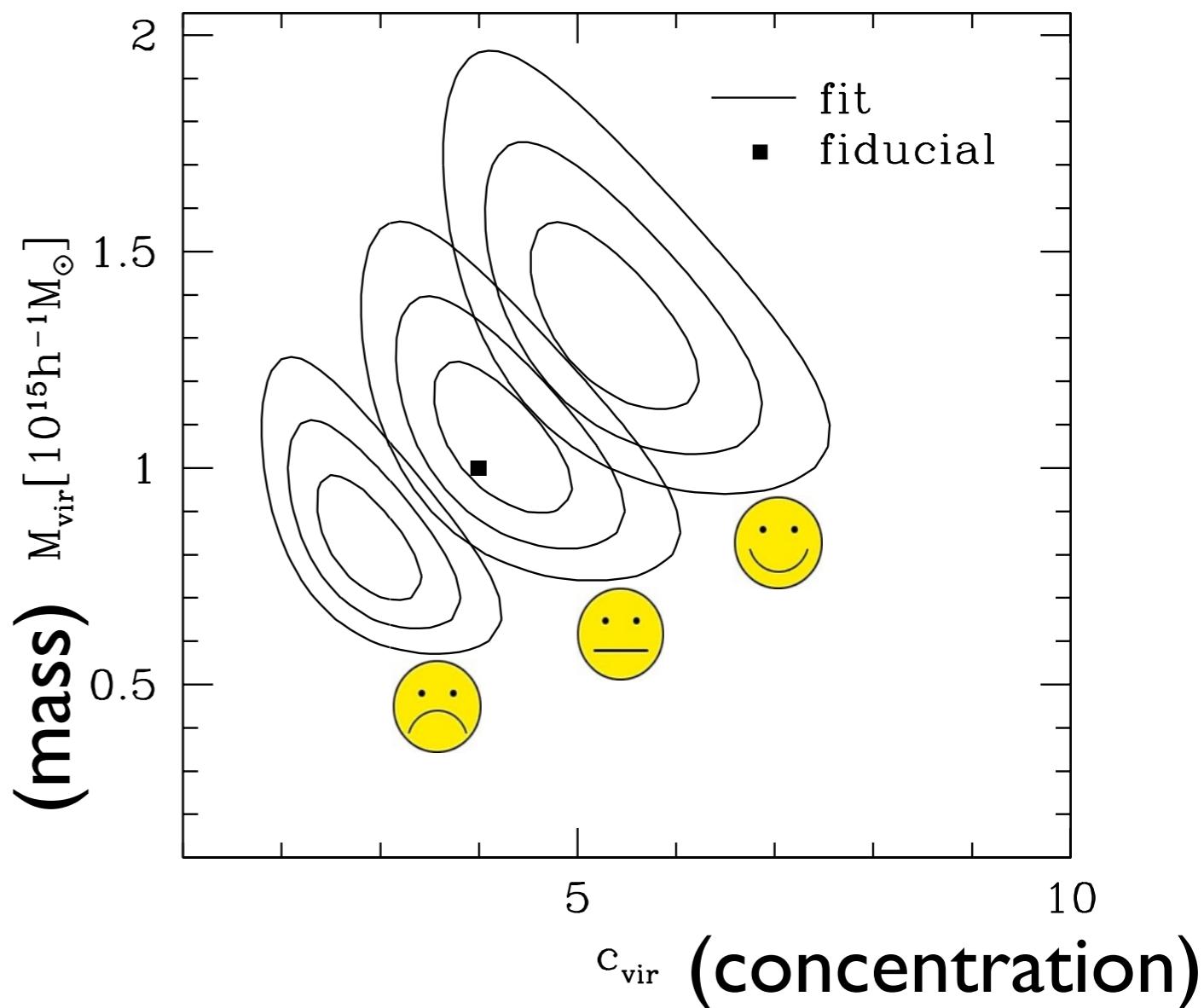
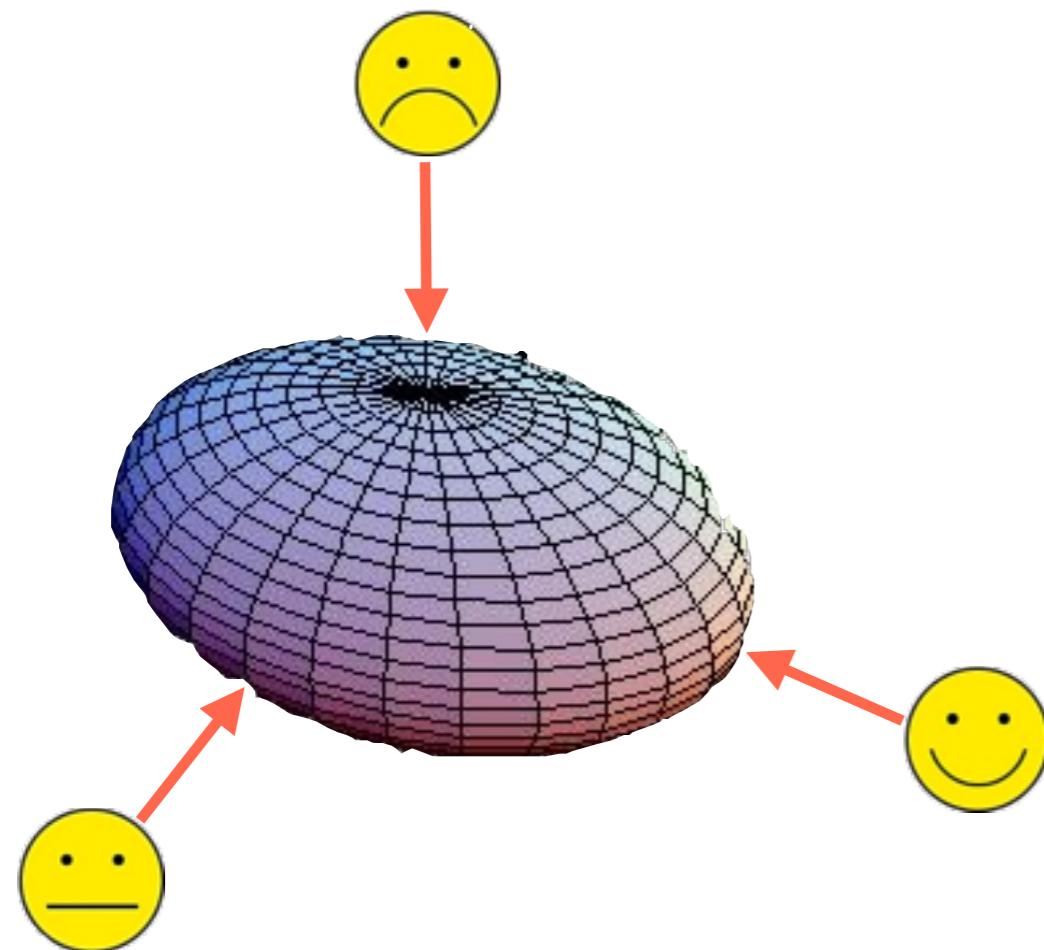
中心集中度問題？



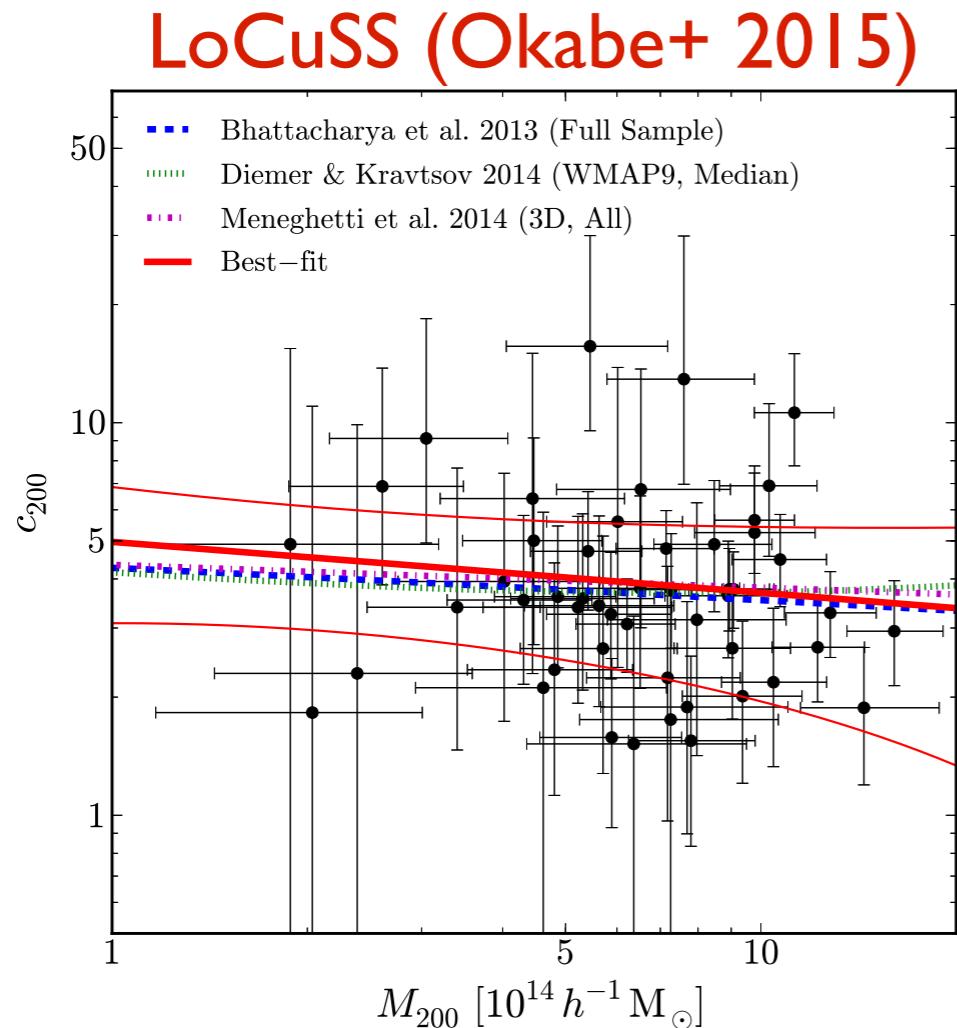
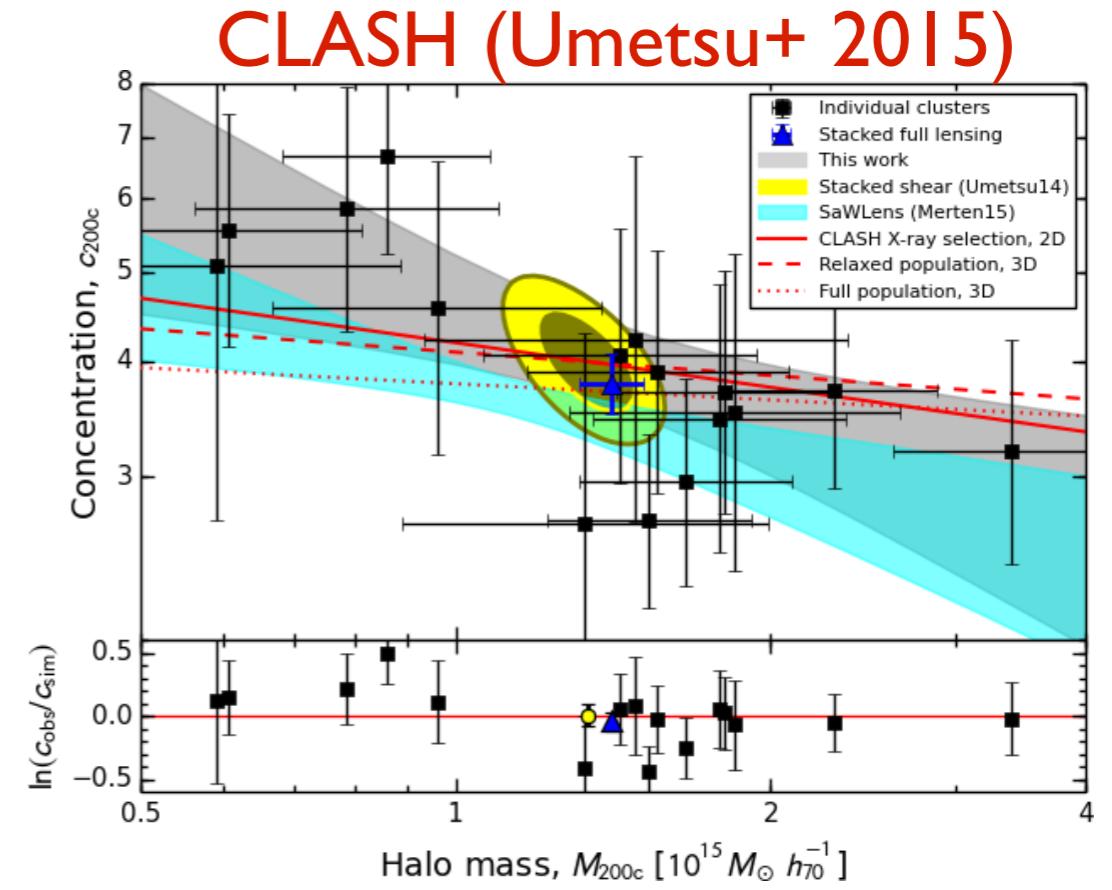
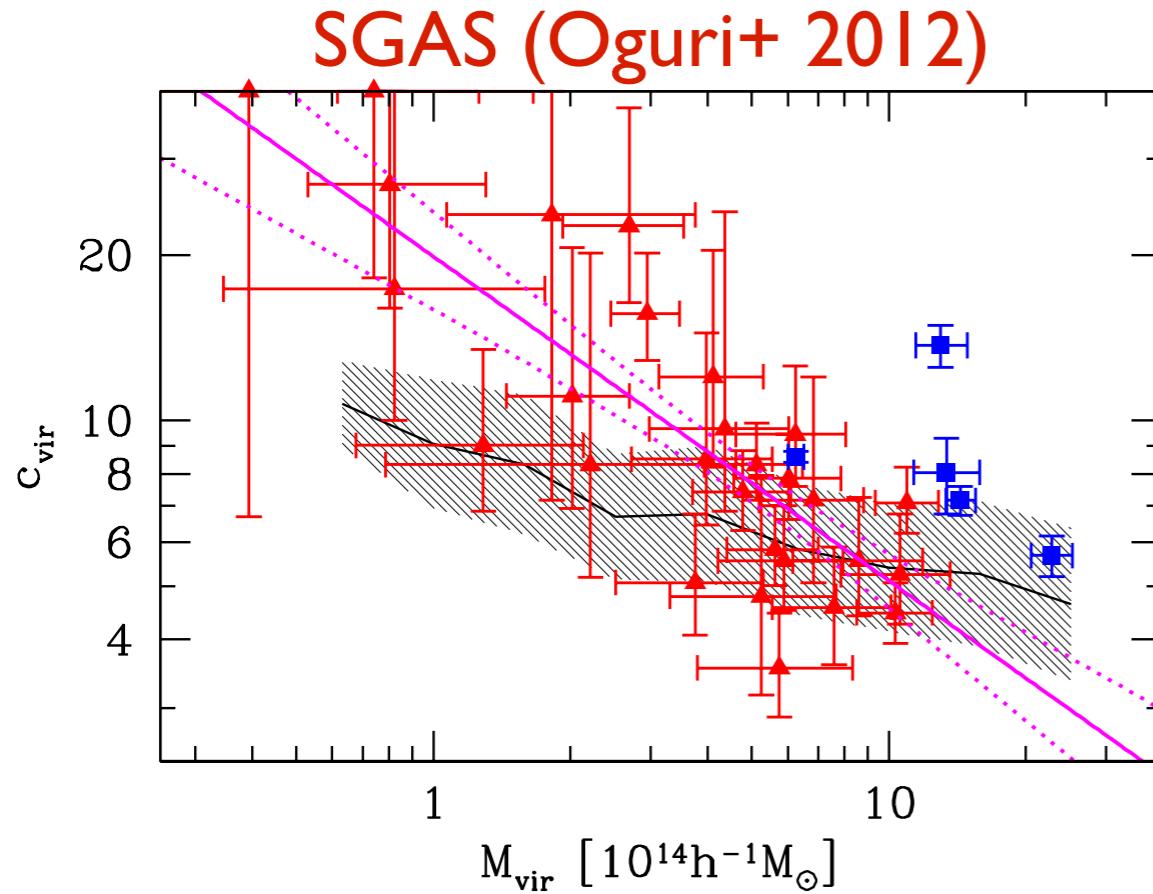
Broadhurst et al. (2005)

- 重い銀河団の重力レンズ解析
- 理論期待 $c \sim 4$ に対し観測 $c \sim 13$
- 観測の中心集中度高すぎ？

非球対称性の重要性

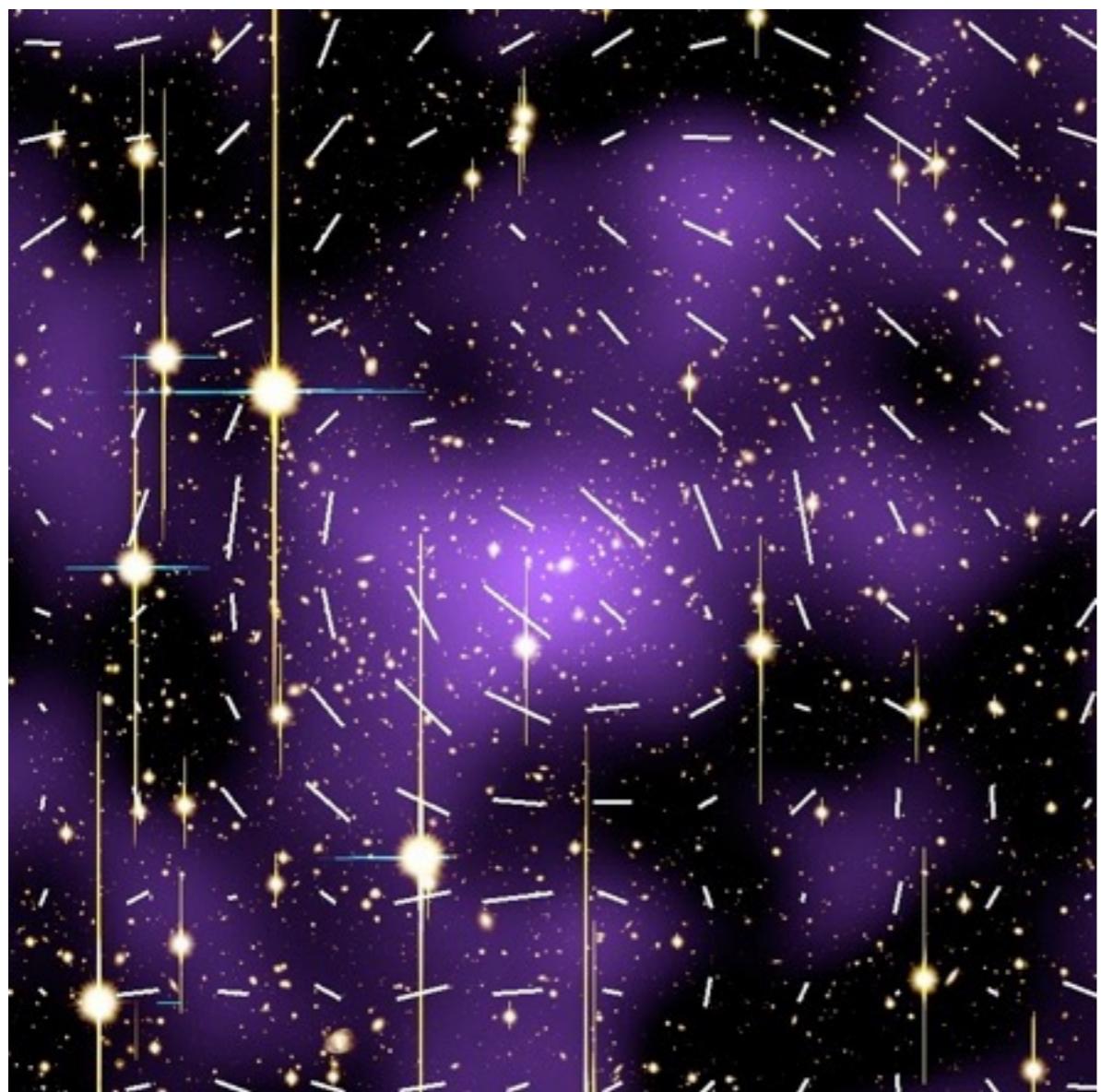


- 重力レンズで推定する質量、中心集中度は見込む方向に強く依存 → **多数の銀河団の解析が必須**

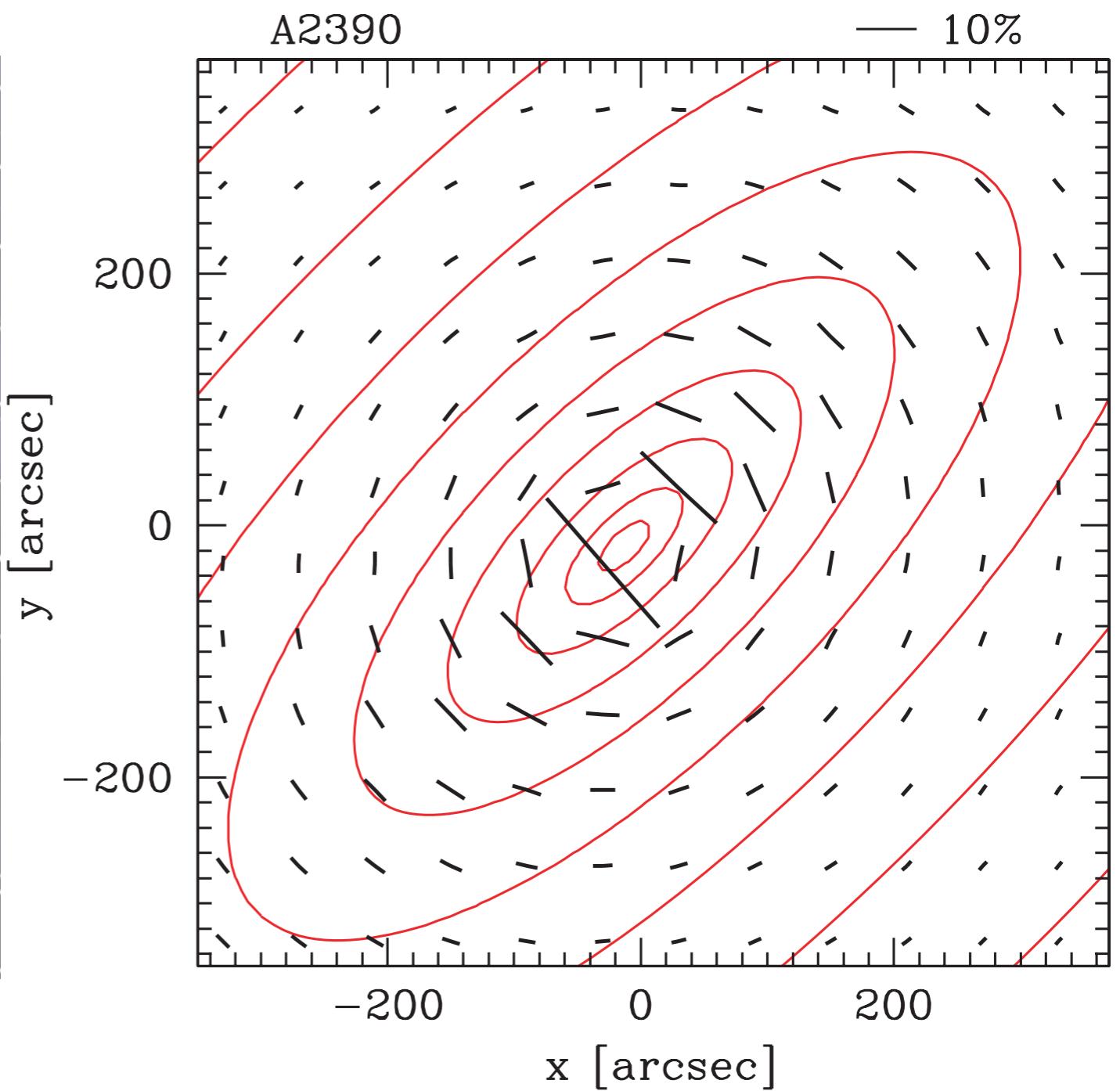


多数の銀河団解析
で中心集中度の値
もΛCDM予言と
コンシスティント

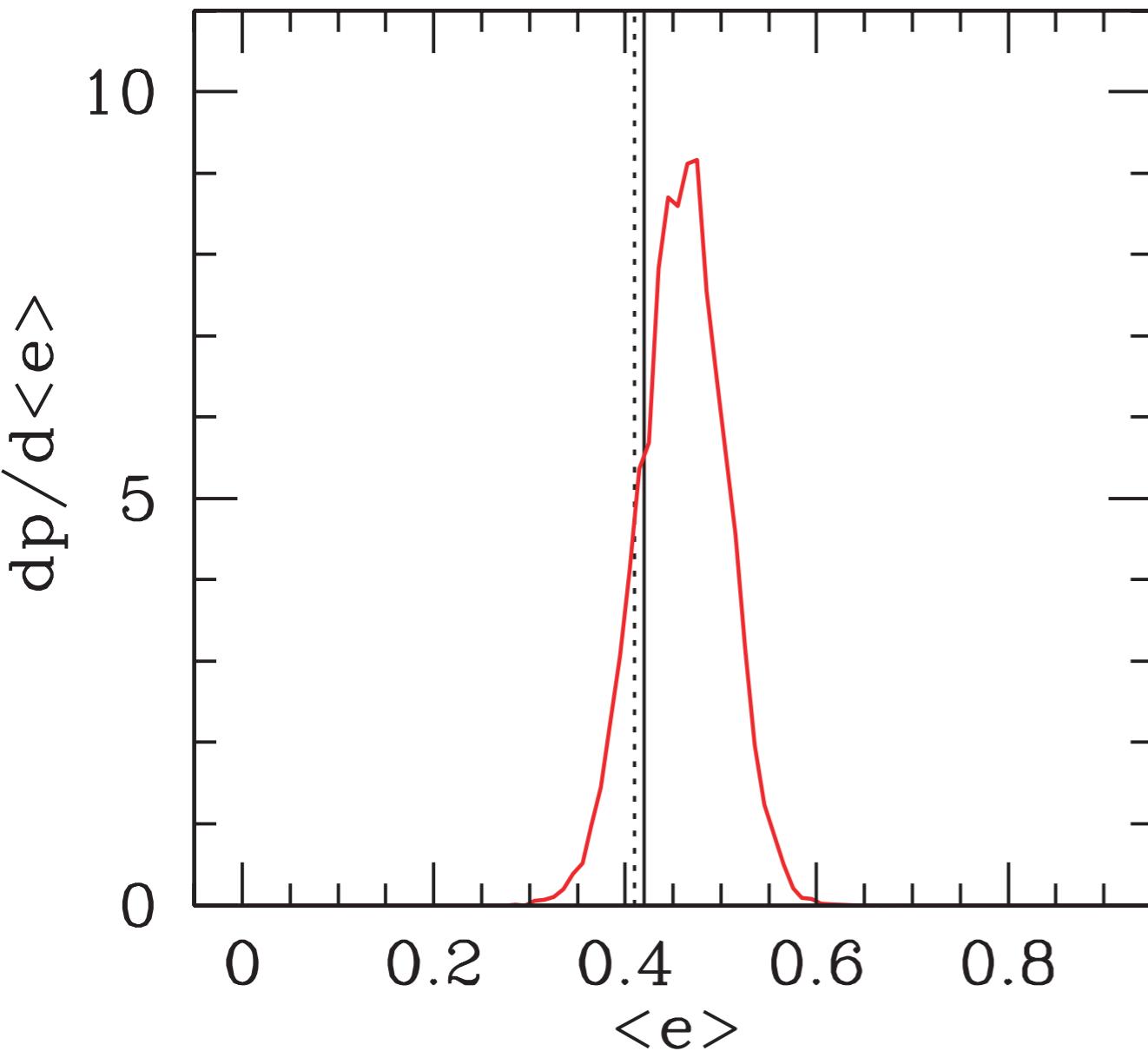
二次元密度分布の非対称性



Abell 2390



二次元密度分布の非対称性



- 密度分布の非球対称性を直接検証
- 観測された平均橢円率 $\langle e \rangle = 0.46 \pm 0.04$ は冷たい無衝突ダークマターの予言と非常によく一致
(see also Evans & Bridle 2009;
Oguri et al. 2012; Clampitt &
Jain 2016; van Uitert et al. 2016)

ダークマターは無衝突か？

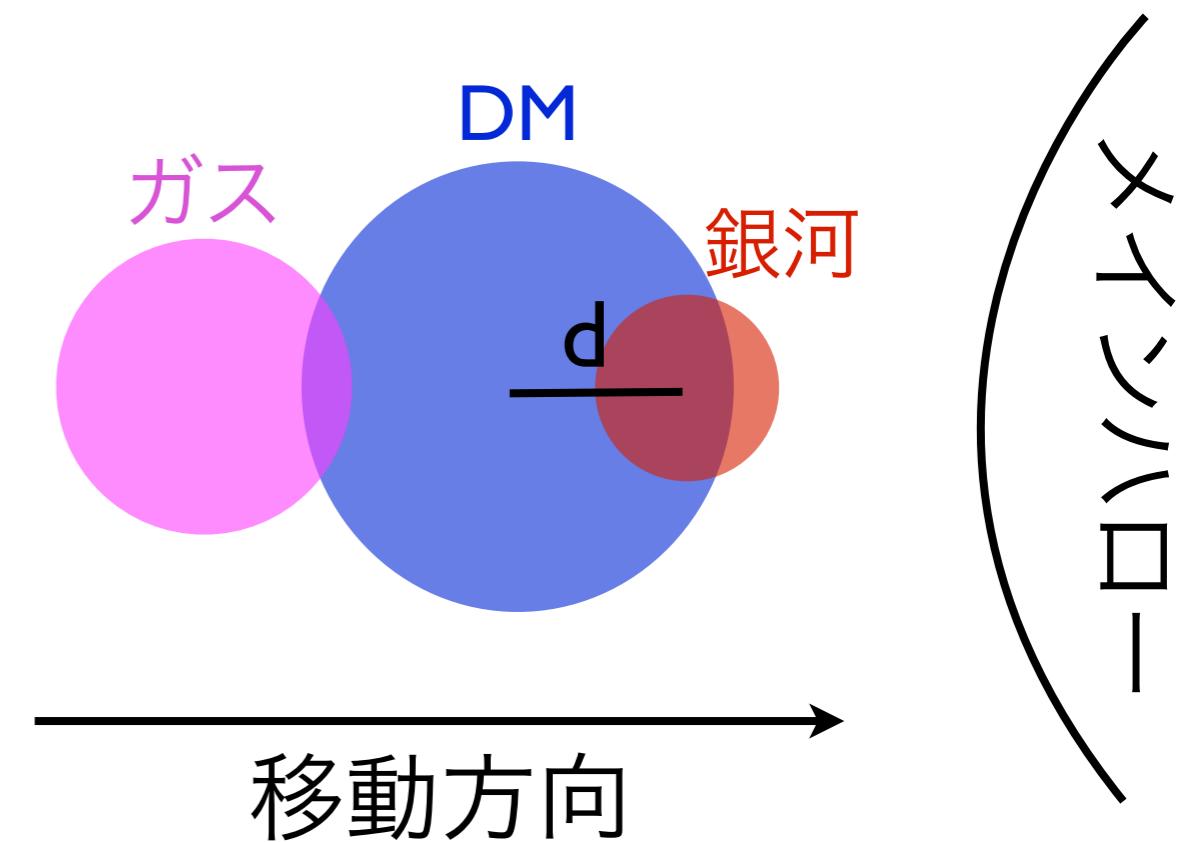


青: DM
赤: ガス

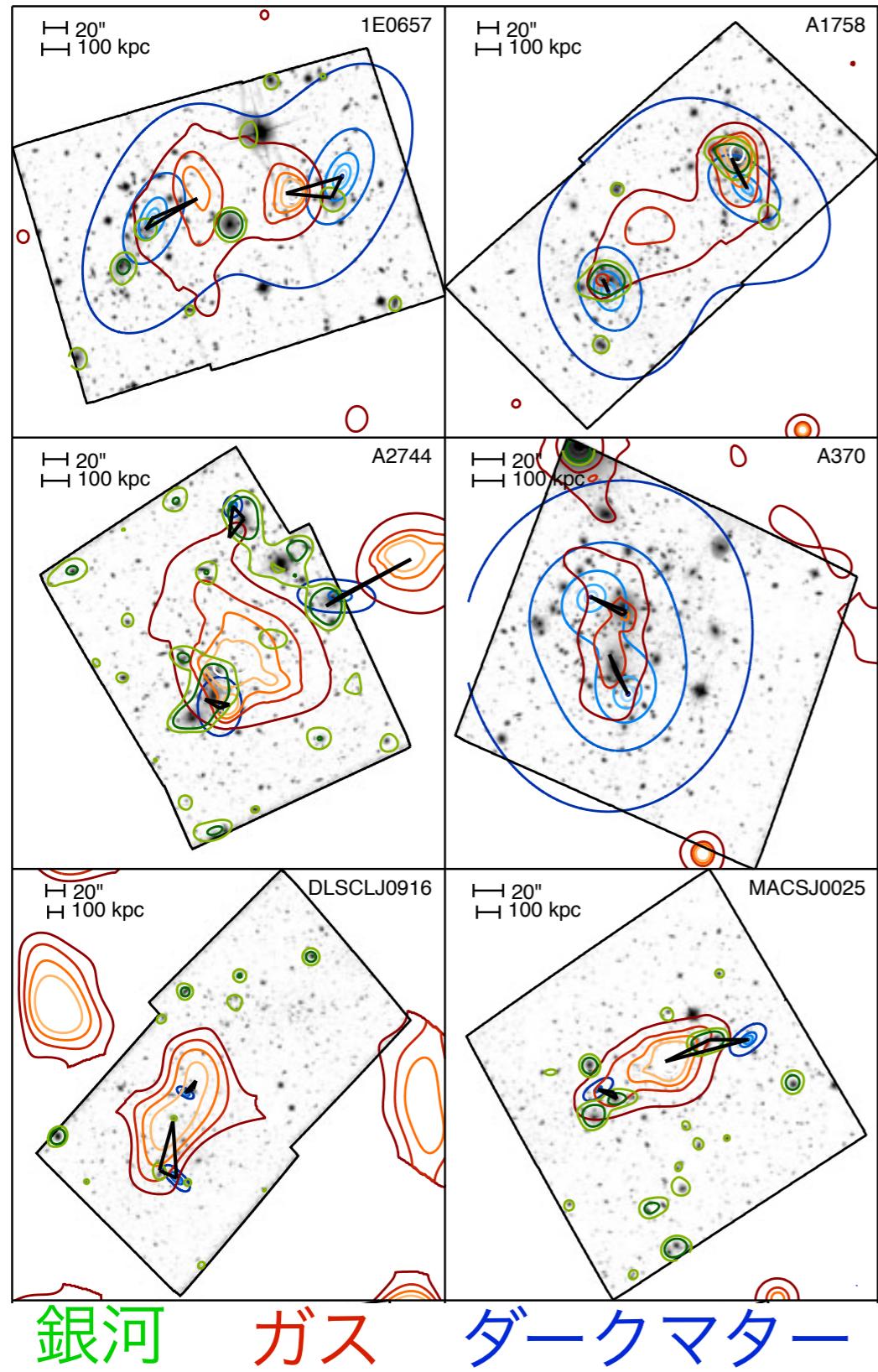
Bullet cluster (Clowe et al. 2006)

統計的解析

- 一つ(少数)の解析では初期条件の不定性などで強い制限を得るのはなかなか難しい
- メインハローの落ち込むサブハローを利用して大きなサンプルを構築できる
(e.g., Massey et al. 2011)
- 銀河(星)、ガス、DMの相対位置の分布から衝突断面積を制限する
(無衝突 $\rightarrow \langle d \rangle = 0$)

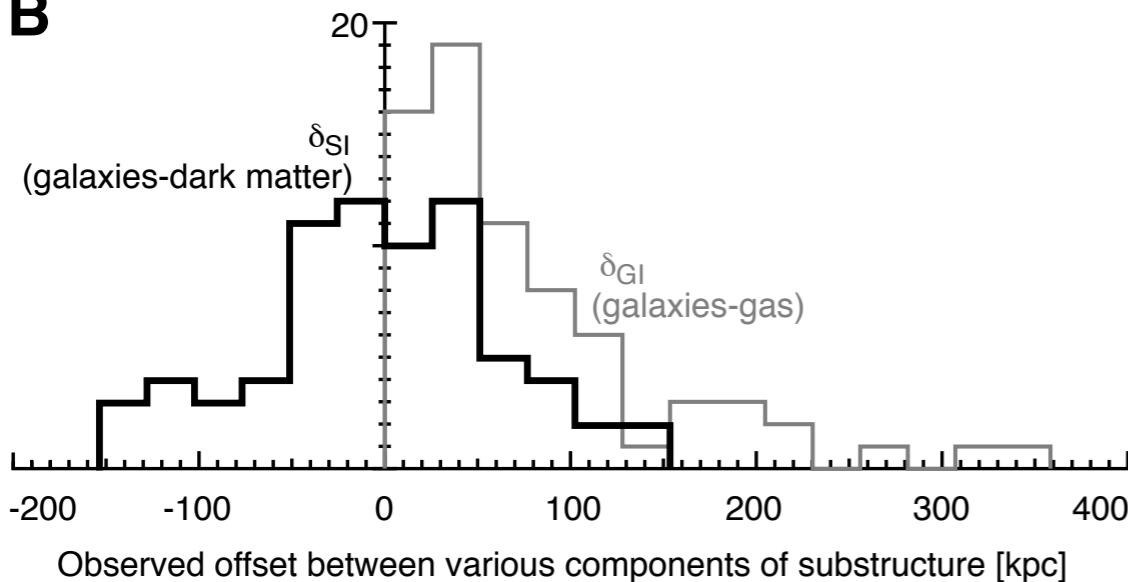


ダークマター衝突面積



- 30個の銀河団内の銀河(可視), ガス(X線), ダークマター(重力レンズ)分布の系統的な調査
- ダークマターが無衝突であれば星の位置と一致

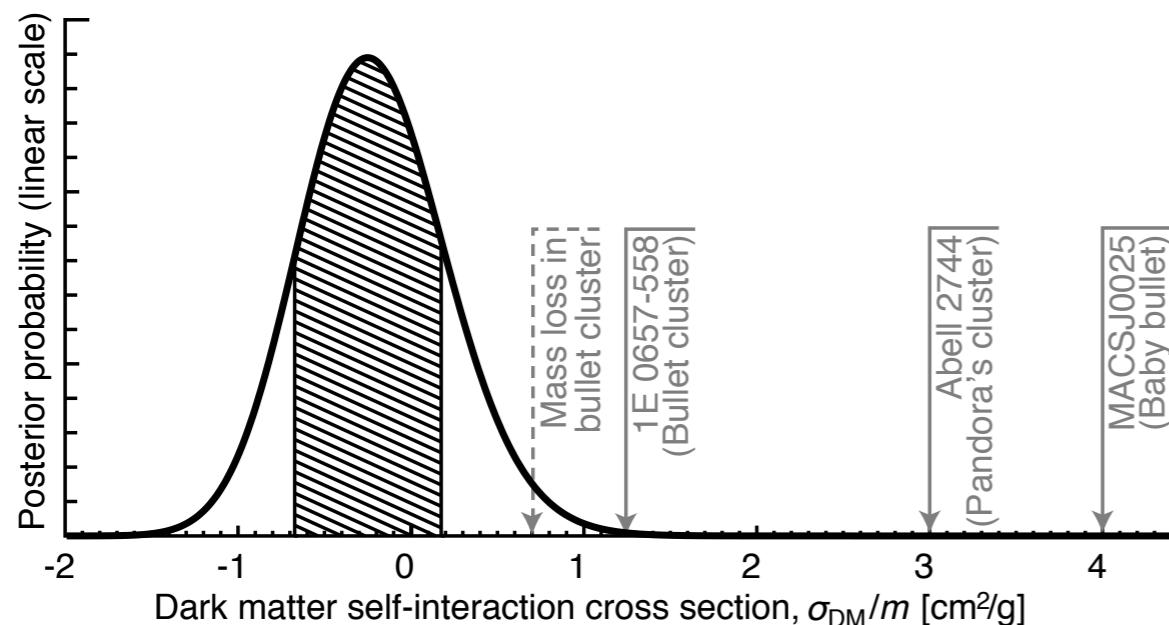
ダークマター衝突面積

B

- 星とダーマターのずれの制限から断面積を制限

$$\sigma_{\text{DM}}/m < 0.47 \text{ cm}^2/\text{g} \text{ (95\%)}$$

(see also Randall et al. 2008;
Bradac et al. 2008; ...)

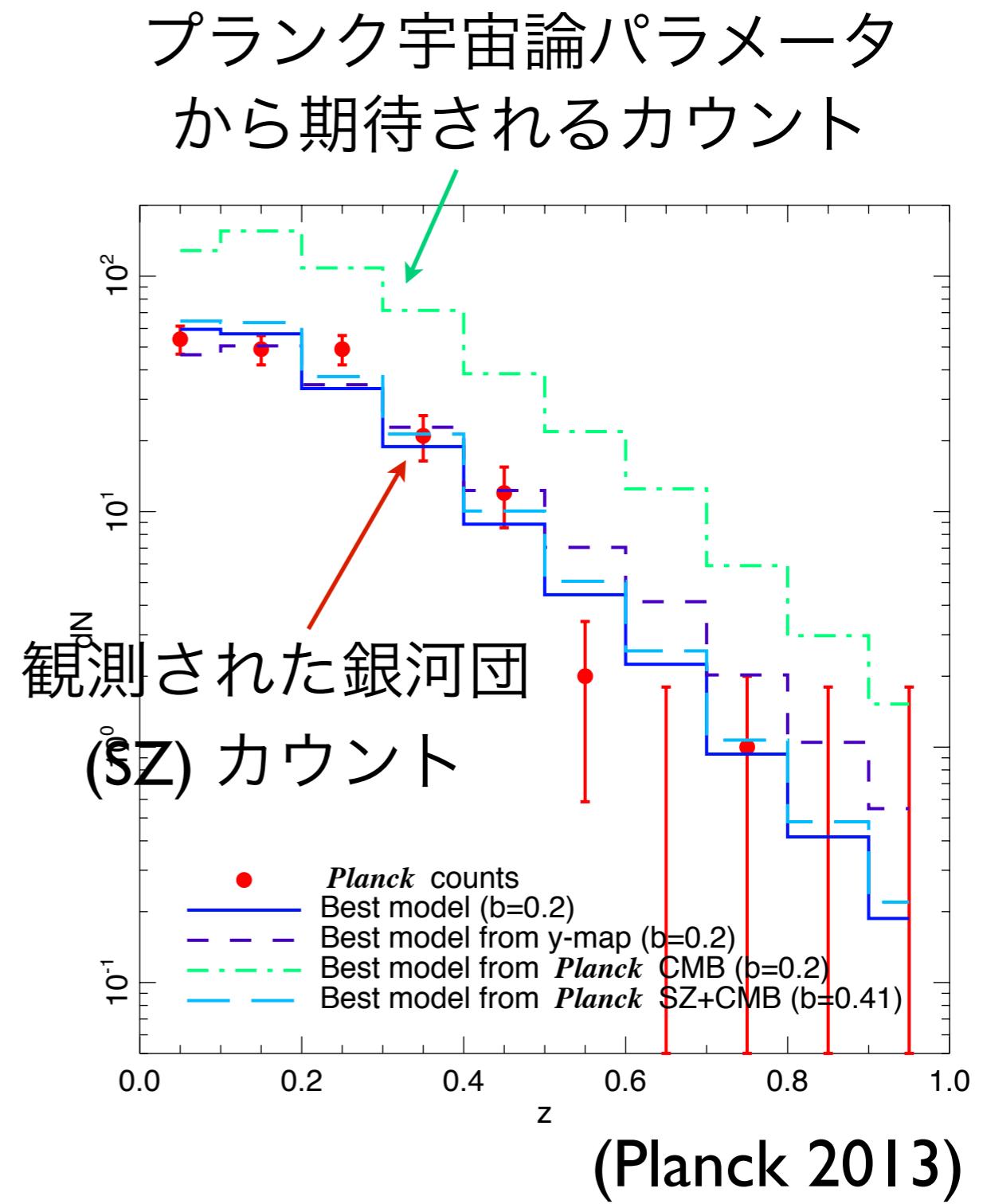


銀河団質量分布: まとめ

- 重力レンズを用い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 Λ CDMモデルで予言される動径密度分布や非球対称性などが観測と非常に良く一致することが明らかになってきている
- この一致は決して自明ではなく、驚くべきことである

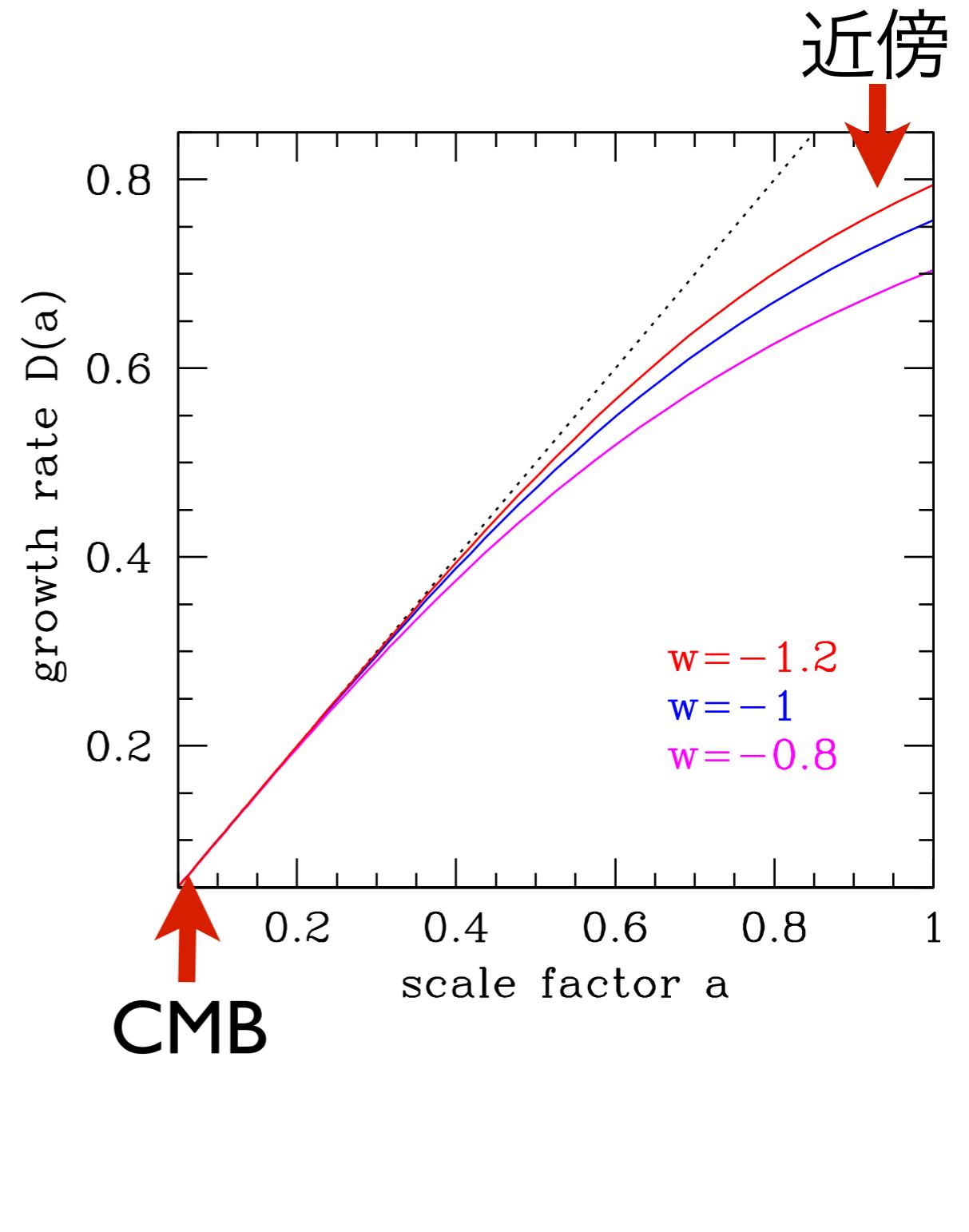
密度揺らぎ問題？

- プランク衛星のCMB観測から現在の宇宙の物質量 (Ω_m) や密度揺らぎ (σ_8) を推定可能
- CMBから予想される銀河団数に比べて実際に観測される銀河団の数がかなり少ない？



密度揺らぎの進化

- CMBからの予想は $z=1090$ から $z \sim 0$ への外挿であることに注意
- 密度揺らぎの「矛盾」は $z=1090$ から $z=0$ の進化に非標準的な何かが起こっていることで説明可
 - ダークエネルギー
 - 修正重力
 - ニュートリノ質量



あるいは系統誤差？

- 伝統的な手法：X線観測から静水圧平衡を仮定し質量を推定
- 非熱的な圧力の寄与 (e.g., 乱流) ?

熱的 非熱的

$$M(< r) = \frac{-r^2}{G\rho} \left(\frac{dP_{\text{th}}}{dr} + \frac{dP_{\text{nt}}}{dr} \right)$$

$\overline{\rightarrow M_{\text{HSE}}(<r)} \quad [\text{過小評価}]$

$\overline{\overline{\rightarrow M_{\text{true}}(<r)}}$

系統誤差を考慮した解析

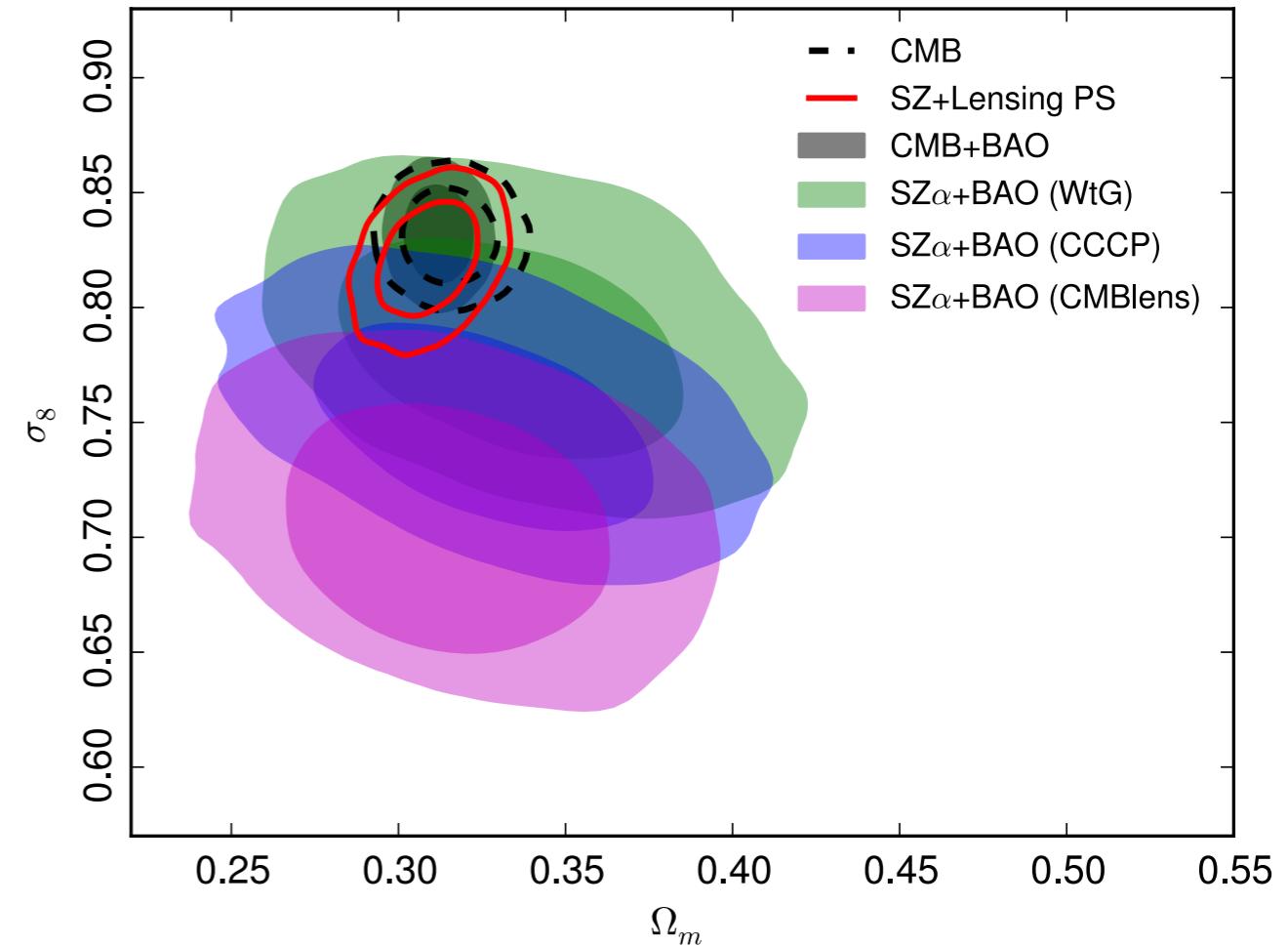
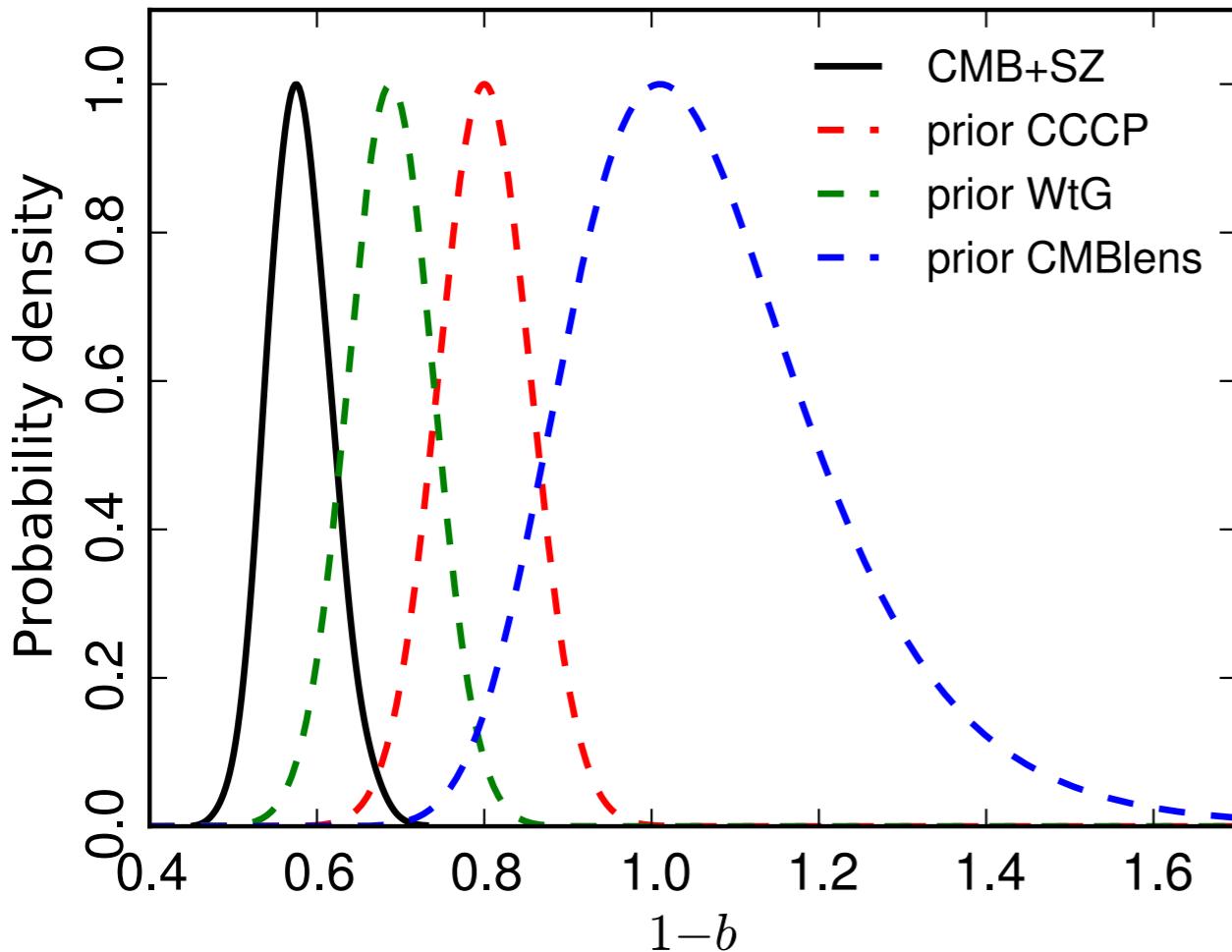
- 非熱的な圧力の寄与をパラメータ b に押し込む

$$M_{\text{true}} = (1 - b)M_{\text{HSE}}$$

$\xrightarrow{\text{重力レンズ}}$ $\xrightarrow{\text{X線、SZ}}$

- X線、SZ銀河団を重力レンズで観測し $(1-b)$ を決定する

Planck 2015 results



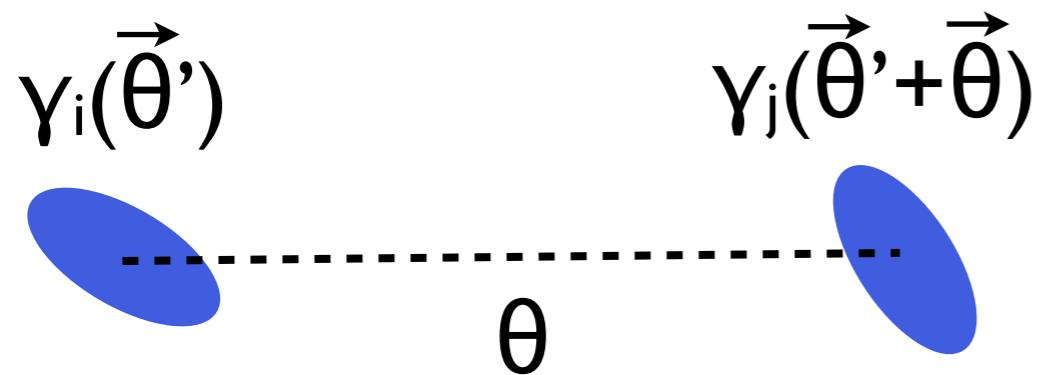
- 幾つかの重力レンズ観測から得られた $(1-b)$ を priorに入れて SZ銀河団から σ_8 を制限
- 違う重力レンズ観測が割と inconsistent (?)

食い違ひの原因

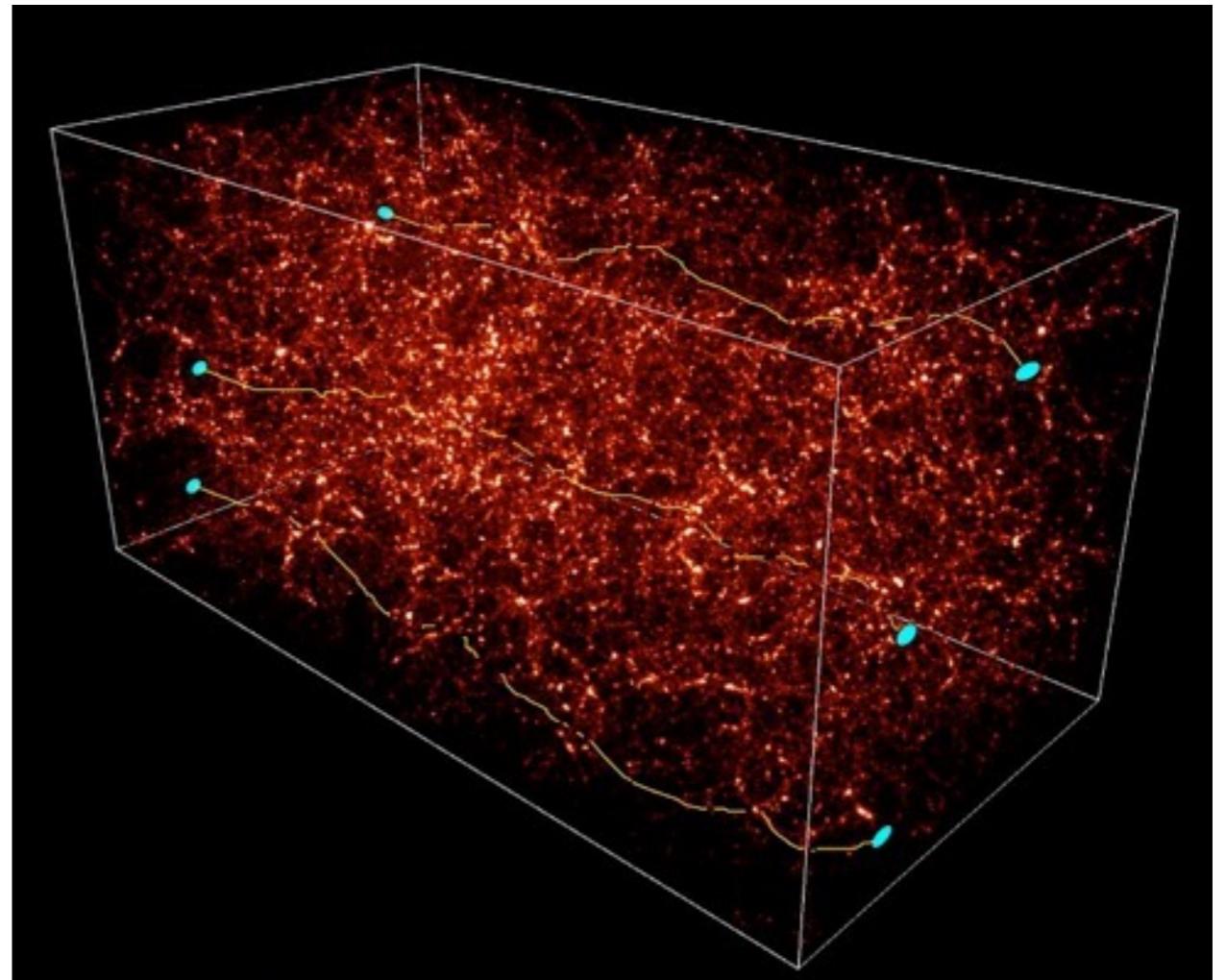
- 重力レンズの系統誤差?
 - 銀河団メンバ銀河のコンタミ
 - 背景銀河の測光赤方偏移 (photo-z)
 - 使うモデルの仮定 (e.g., 中心集中度)
 - これまでの解析は個々の銀河団のfollow-up
 - すくないバンド数
 - 非一様なデータ
- 今後の大規模サーベイで改善が見込める

他のアプローチ: cosmic shear

- 弱い重力レンズ
の相関関数解析
で密度揺らぎを
直接測定
(講義 No.4)



$$\xi_{ij}(\theta) = \langle \gamma_i(\vec{\theta}') \gamma_j(\vec{\theta}' + \vec{\theta}) \rangle$$

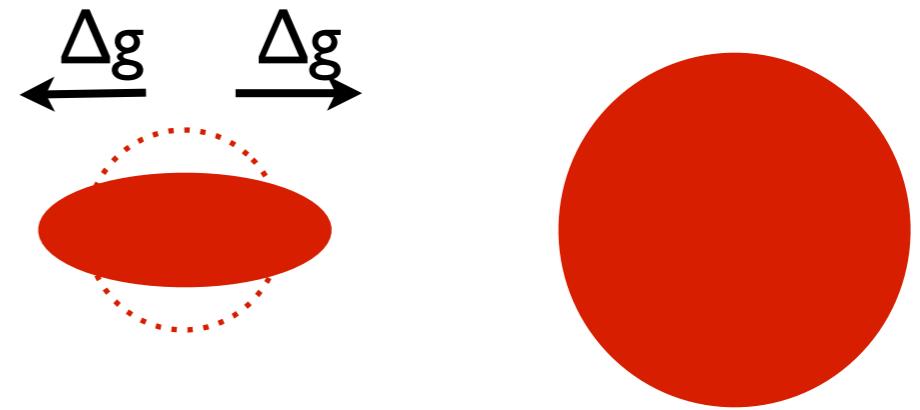


現実の cosmic shear 解析

- さまざまな challenge
 - 精確な銀河の形状測定
 - 精確な測光赤方偏移
 - 銀河の固有整列 (intrinsic alignment)
 - 精確な非線形パワースペクトルモデル
(バリオンの効果)

固有整列 (intrinsic alignment)

- 重力場に応じて銀河の固有の向きが整列



- 二点相関に寄与する

$$\gamma^{\text{obs}} = \underbrace{\gamma^G}_{\text{重力レンズ}} + \underbrace{\gamma^I}_{\text{固有整列}}$$

$$\langle \gamma^{\text{obs}} \gamma^{\text{obs}} \rangle = \underbrace{\langle \gamma^G \gamma^G \rangle}_{\text{cosmic shear}} + 2 \underbrace{\langle \gamma^G \gamma^I \rangle}_{\text{固有整列 (GI)}} + \underbrace{\langle \gamma^I \gamma^I \rangle}_{\text{固有整列 (II)}}$$

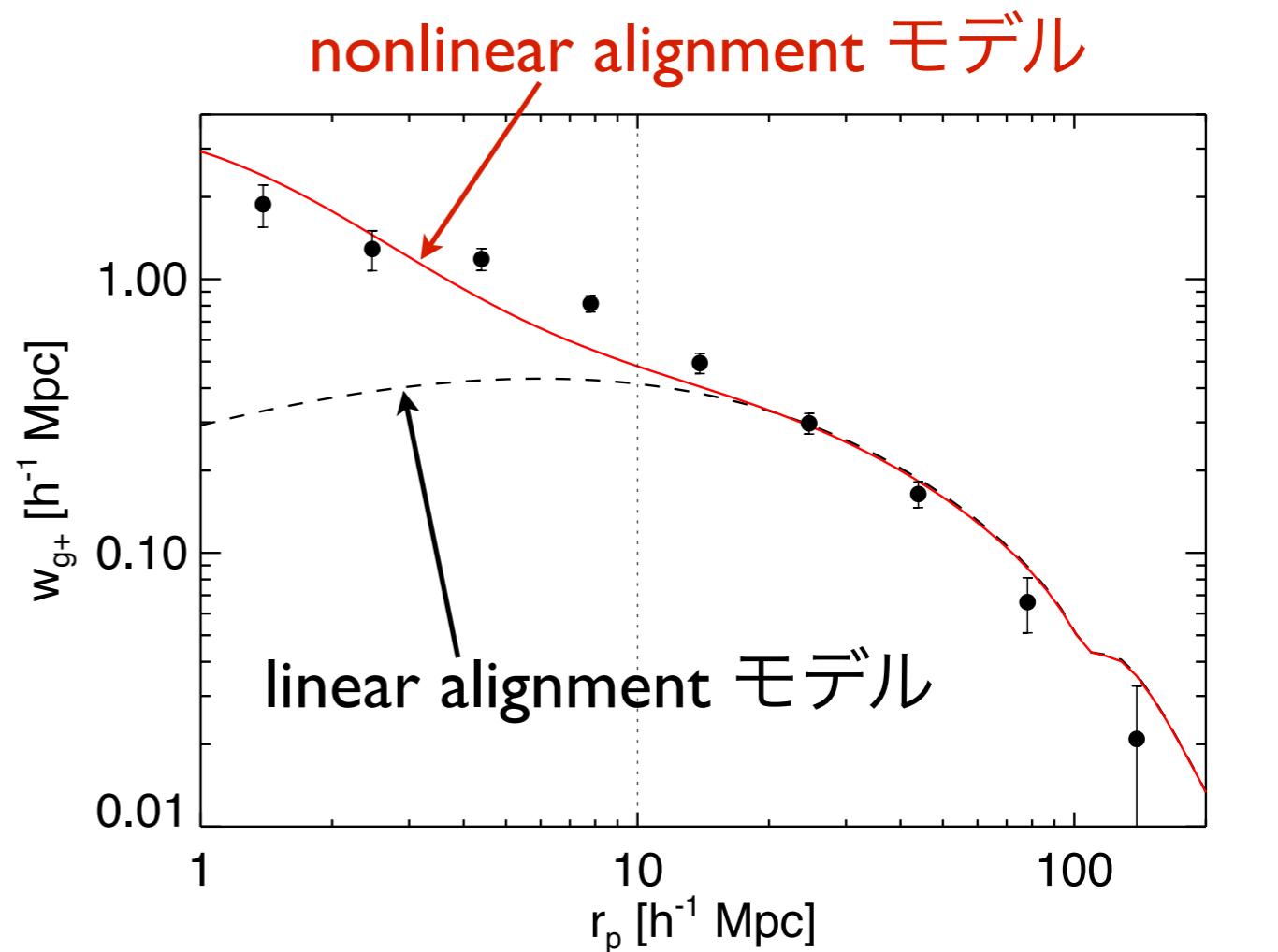
固有整列の観測

- 例えばLRGの観測など
でよく測定されている
- モデル: linear/nonlinear
alignment モデル

$$P_{\text{II}}(k, z) = F^2(z) P_\delta(k, z)$$

$$P_{\text{GI}}(k, z) = F(z) P_\delta(k, z)$$

$$F(z) = -AC_1 \rho_{\text{crit}} \frac{\Omega_m}{D(z)}$$

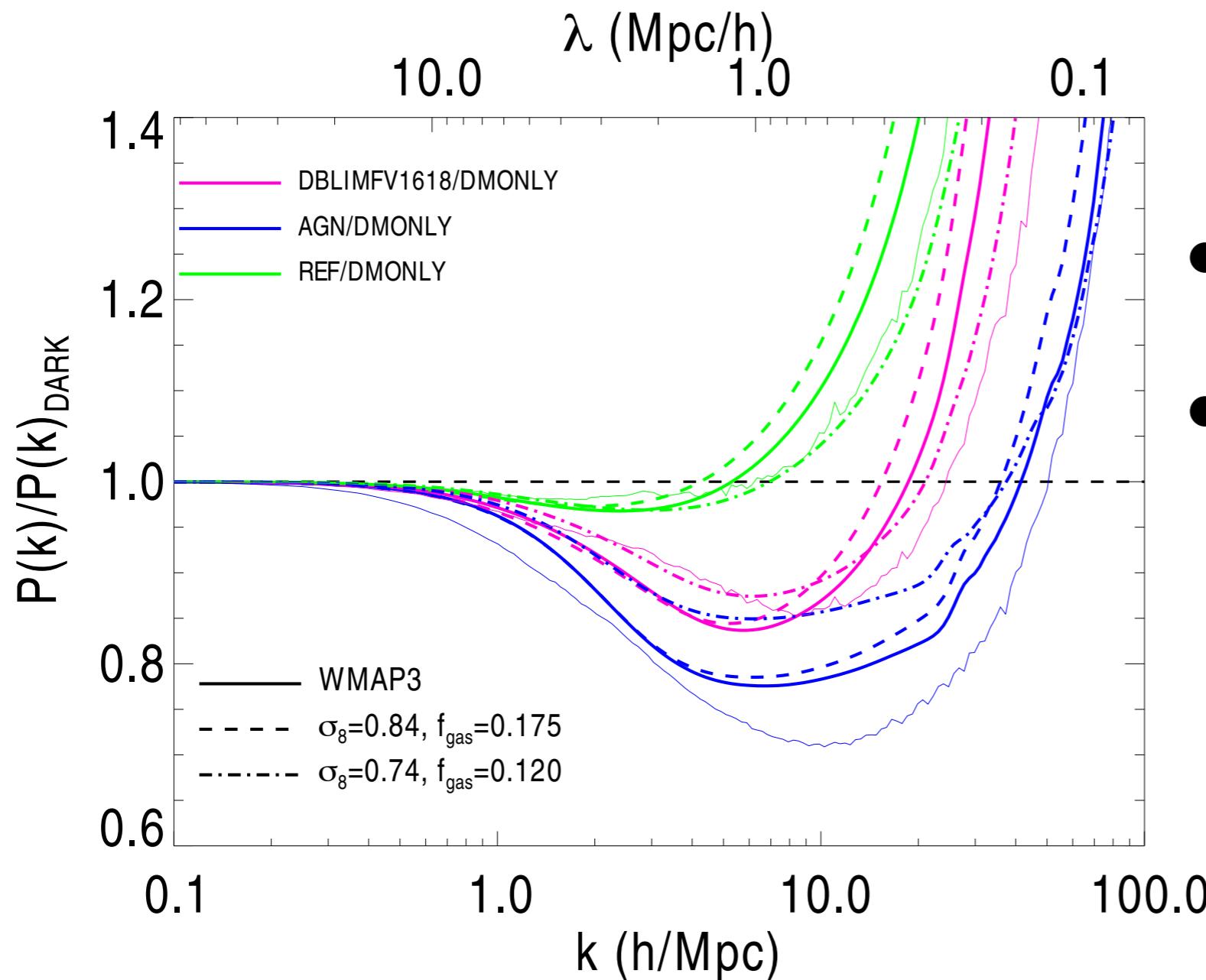


Blazek et al. (2011)
measurement by Okumura & Jing (2009)

固有整列の取り扱い

- 例えば nonlinear alignment モデルを仮定し全体的な amplitude をパラメータとする
- トモグラフィー解析で、zビン依存性の違いより comic shear と intrinsic alignment を分離し宇宙論パラメータを制限することが出来る
(e.g., Heymans et al. 2013)

パワースペクトルのバリオンの効果



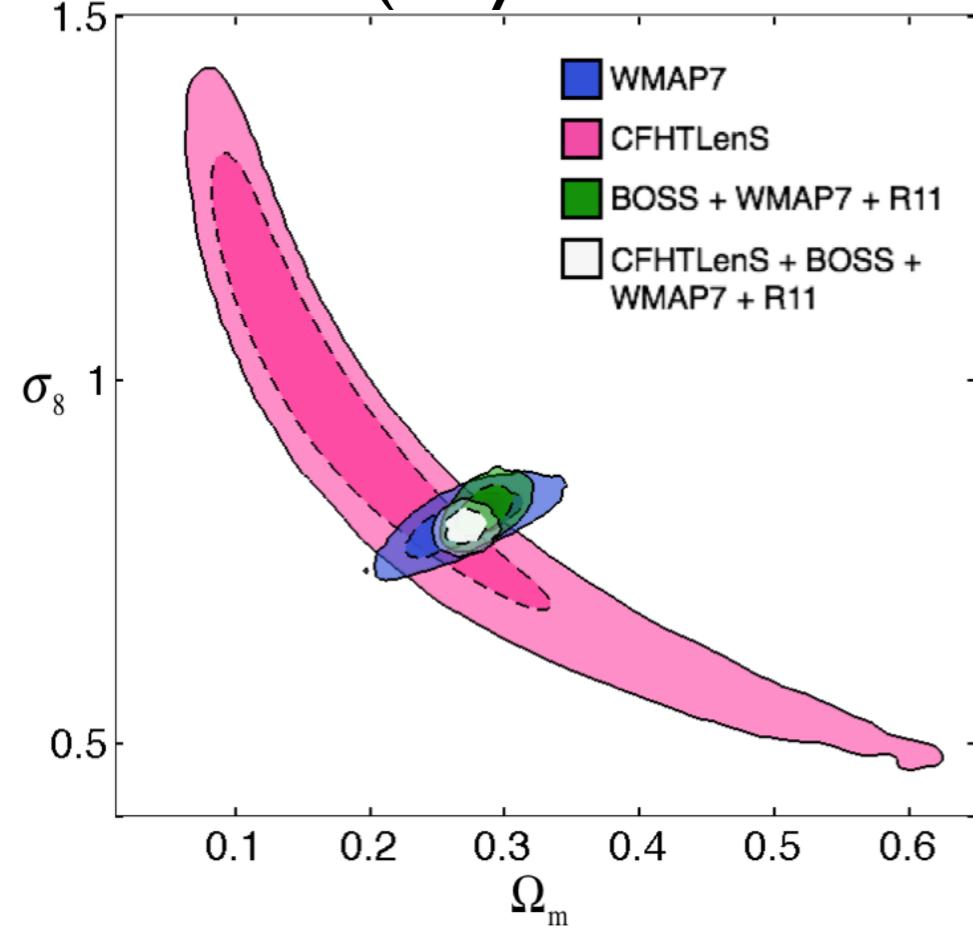
- $k \gtrsim 1 \text{ h/Mpc}$ で重要
- 大きなモデル依存性

Semboloni et al. (2013)

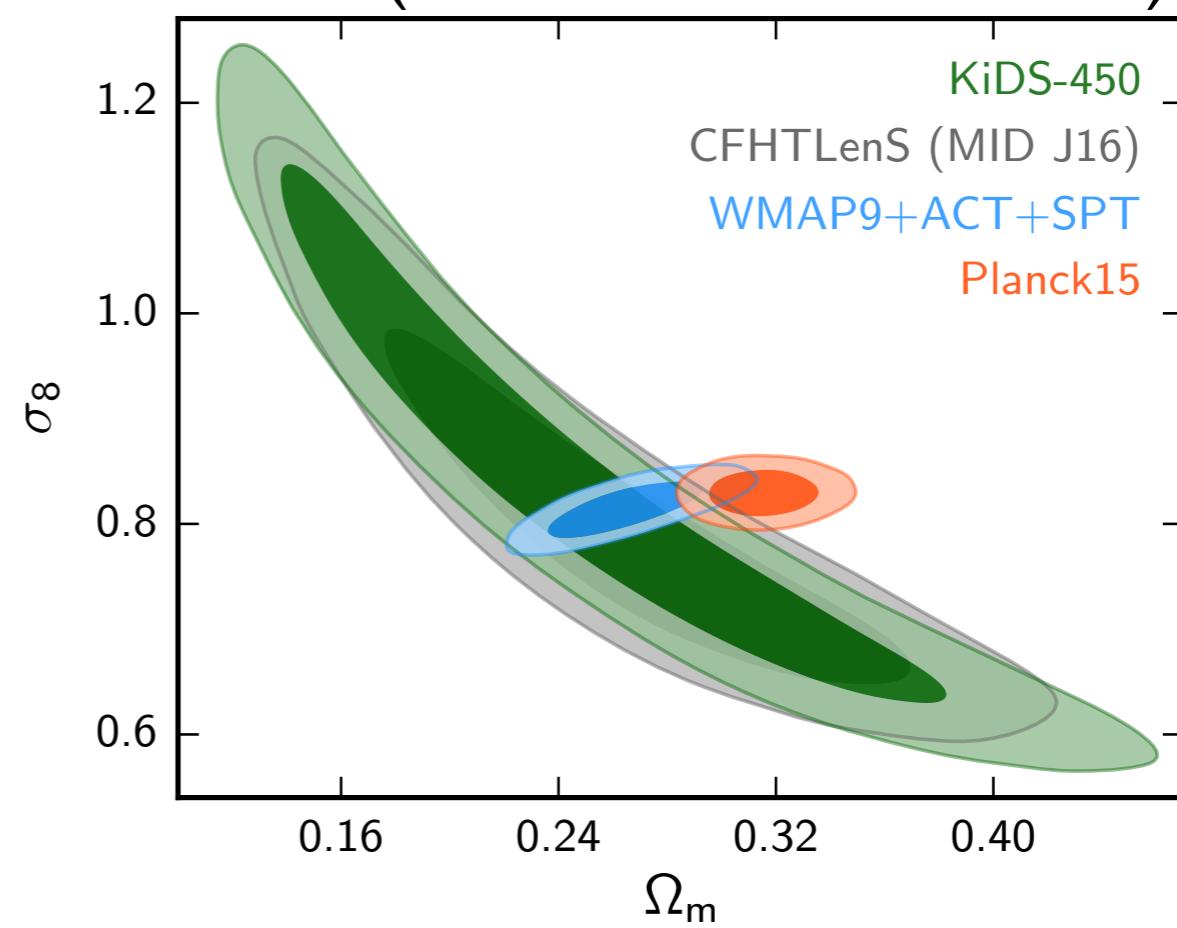
重力レンズサーベイ

- CFHTLenS (170 deg^2 , 限界等級 $r_{\text{lim}} \sim 24.8$)
すでに完了
- KiDS (1500 deg^2 , 限界等級 $r_{\text{lim}} \sim 25.2$)
 450 deg^2 の結果を出版
- Dark Energy Survey (5000 deg^2 , 限界等級 $r_{\text{lim}} \sim 25.0$)
1年目の結果をもうすぐ出版
- Hyper Suprime-cam (1400 deg^2 , 限界等級 $r_{\text{lim}} \sim 26.0$)
1年目の結果をもうすぐ出版

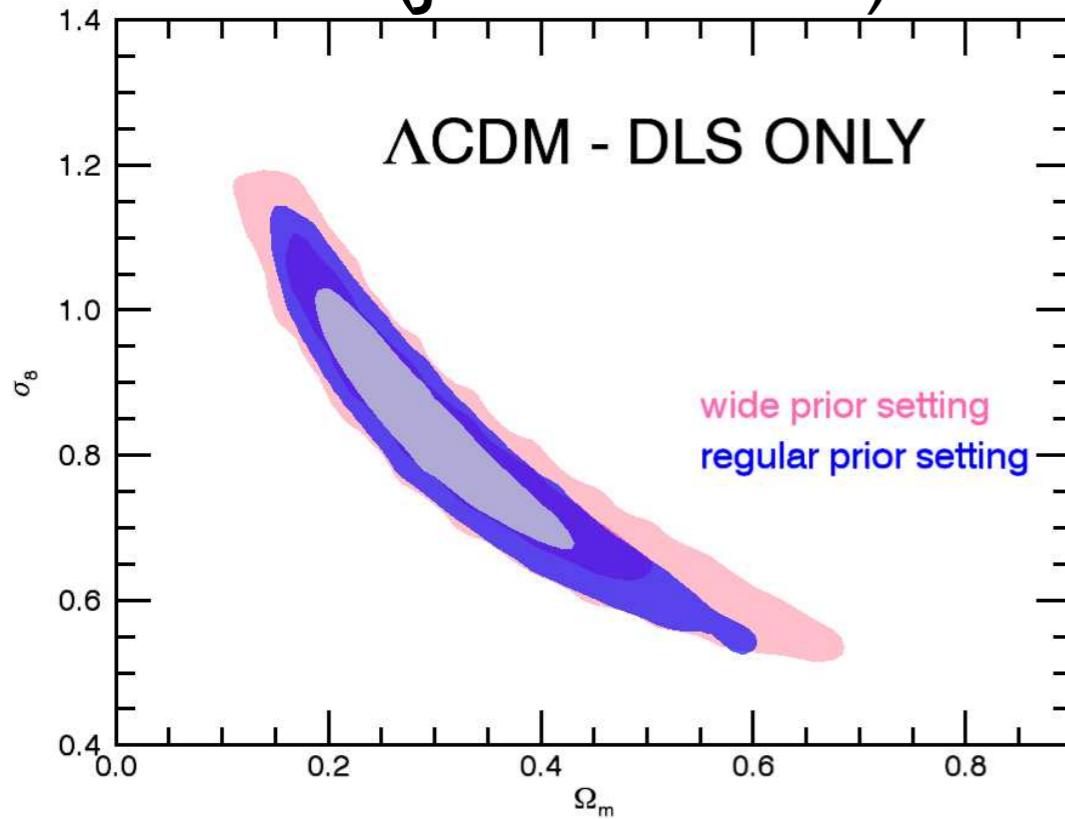
CFHTLenS (Heymans et al. 2013)



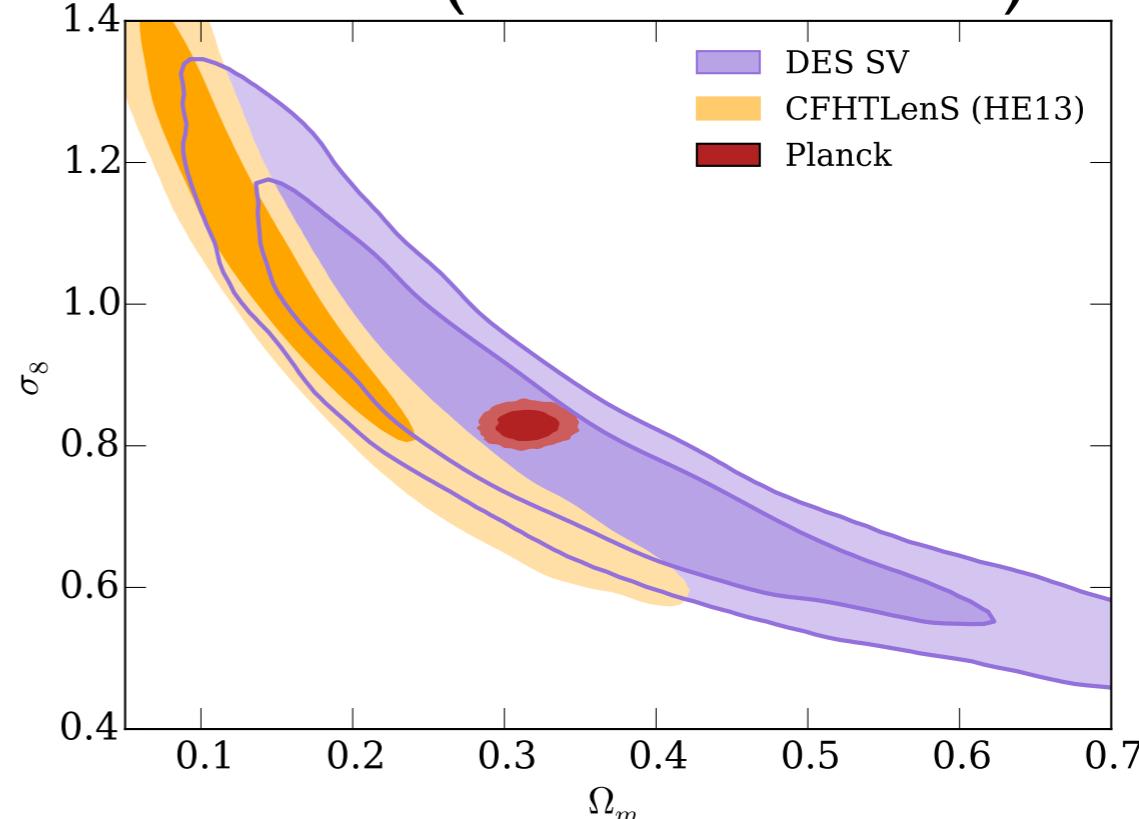
KiDS (Hildebrandt et al. 2017)



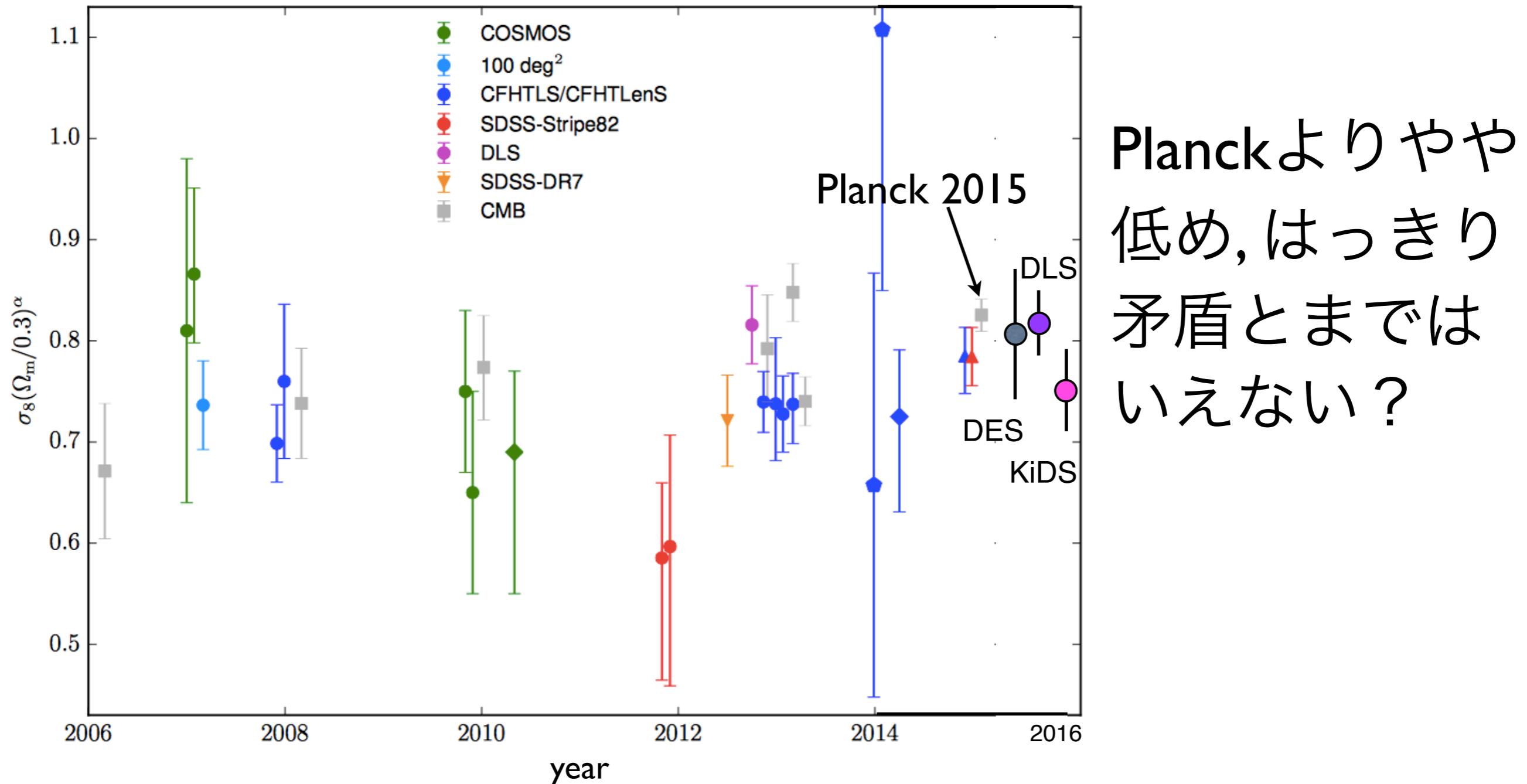
DLS (Jee et al. 2016)



DES SV (DES collab. 2016)



cosmic shearによる σ_8 制限

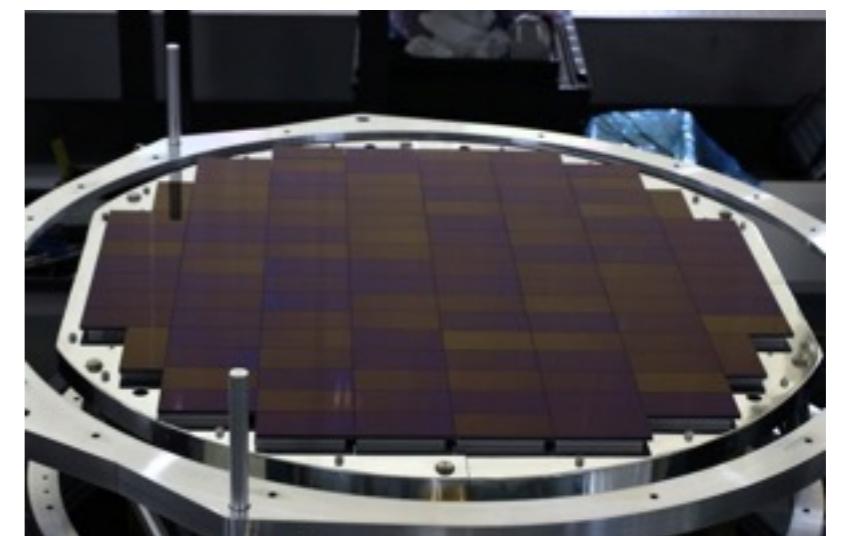
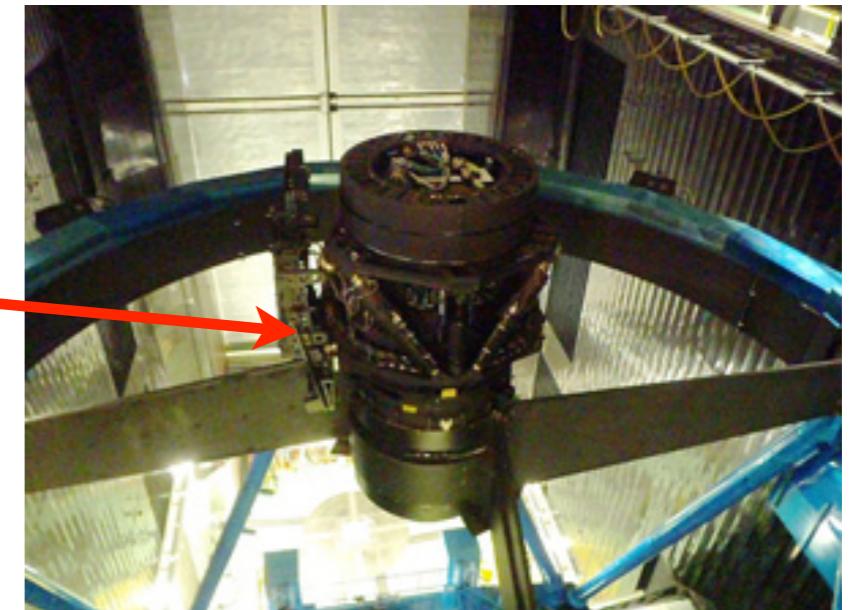
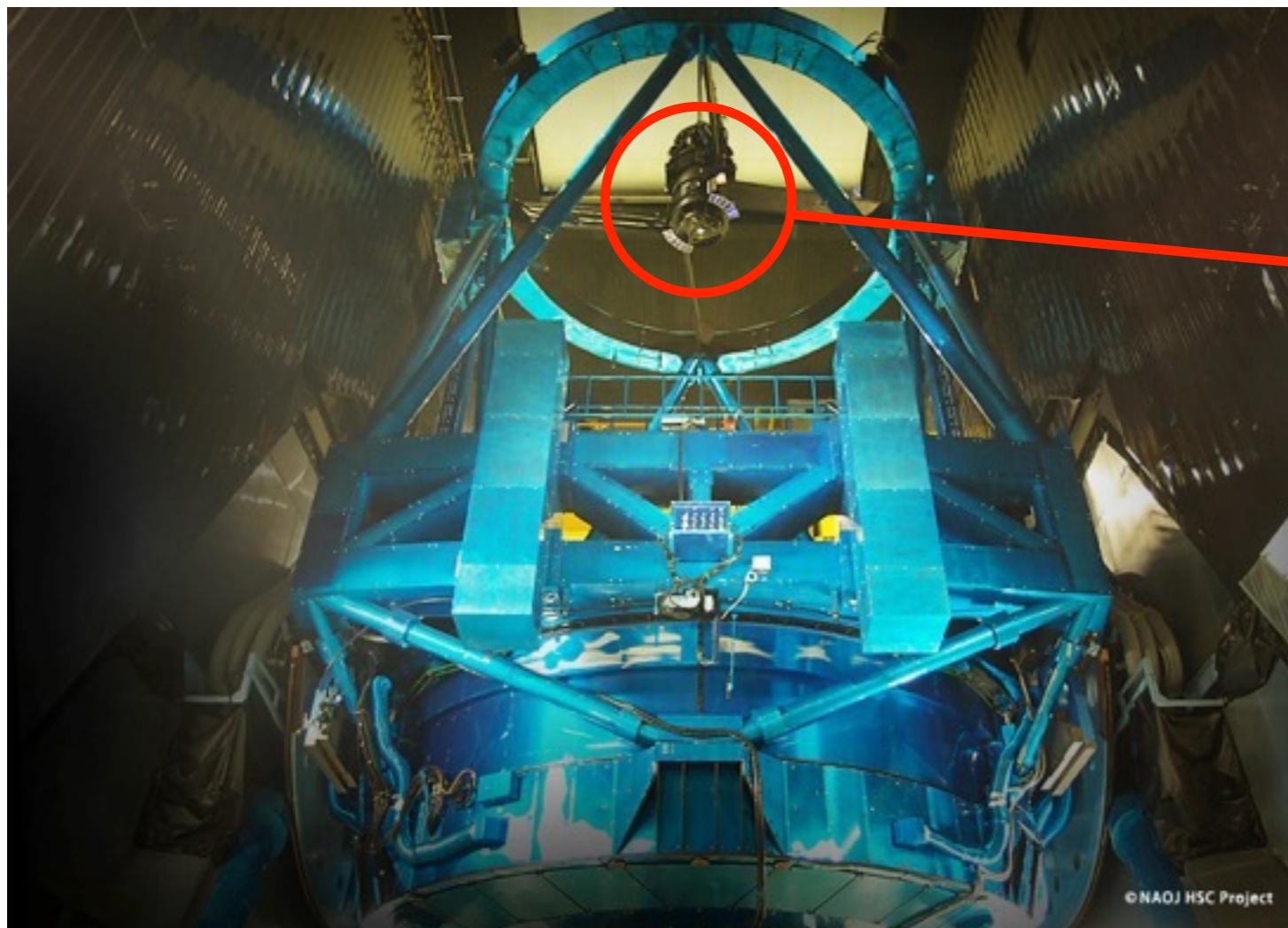


Kilbinger 2015, updated by C. Heymans

密度揺らぎ問題: まとめ

- CMB (Planck) から期待される近傍宇宙の密度揺らぎは実際の観測とくらべて高め
- 銀河団の number counts では重力レンズで銀河団質量を精確に較正することが必要
- cosmic shear による密度揺らぎの直接的な観測も可能
- KiDS, DES, HSC の進展により近いうちにもっとはっきりした描像が得られるだろう

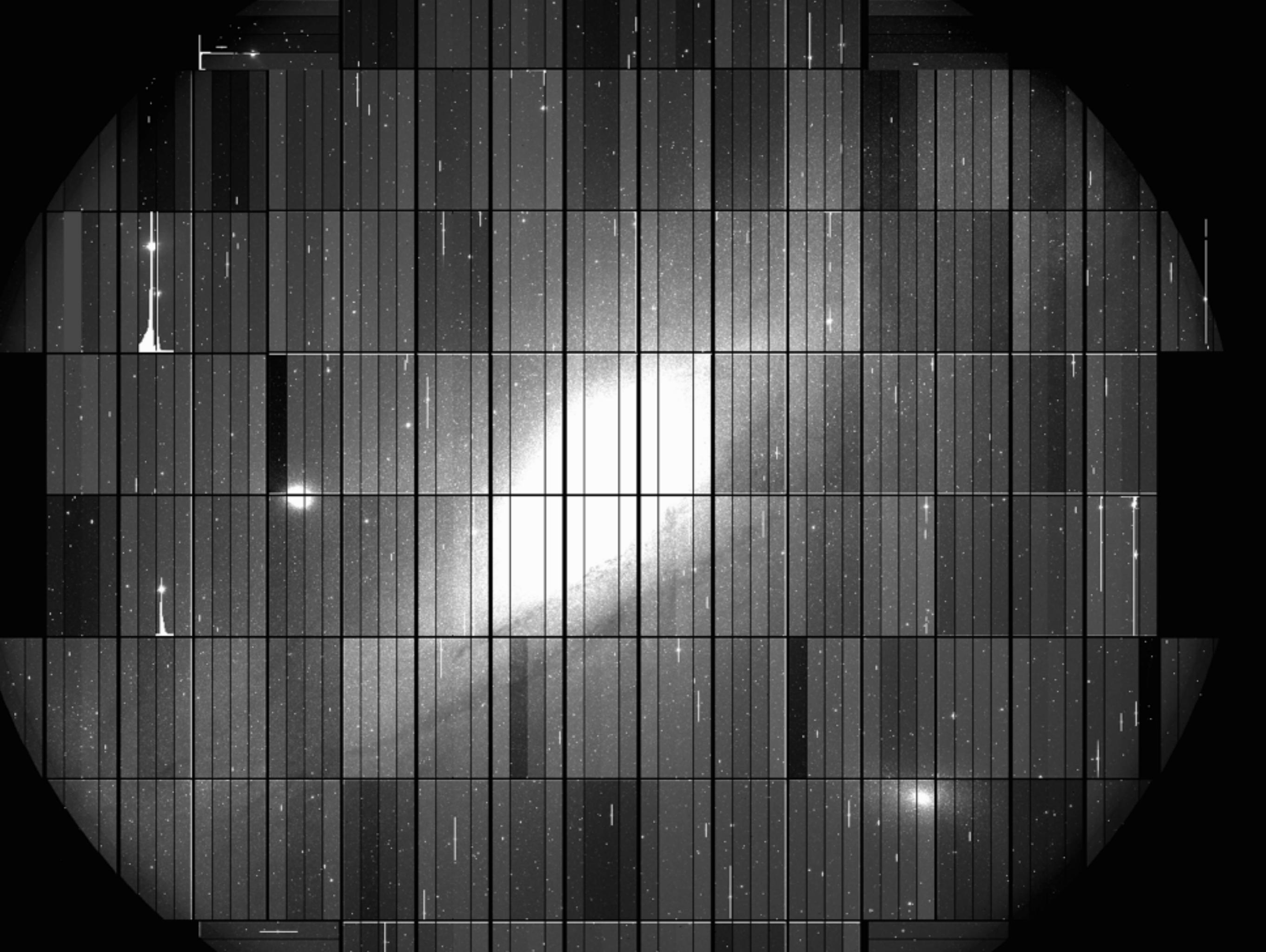
Hyper Suprime-Cam (HSC)



- 重さ 3トン、116個のCCD
チップ、視野 1.7 deg^2

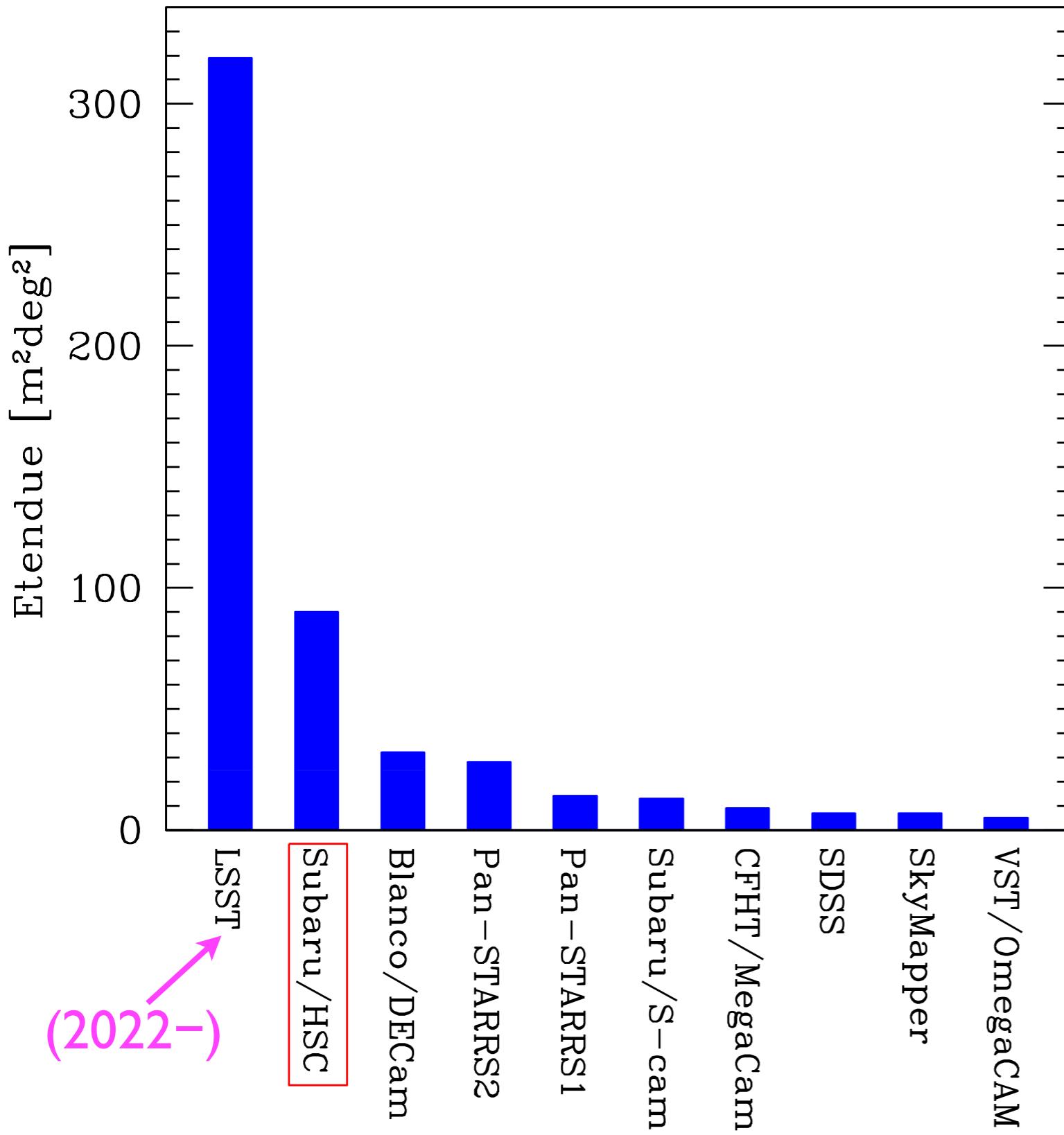


PI: S. Miyazaki
(NAOJ)





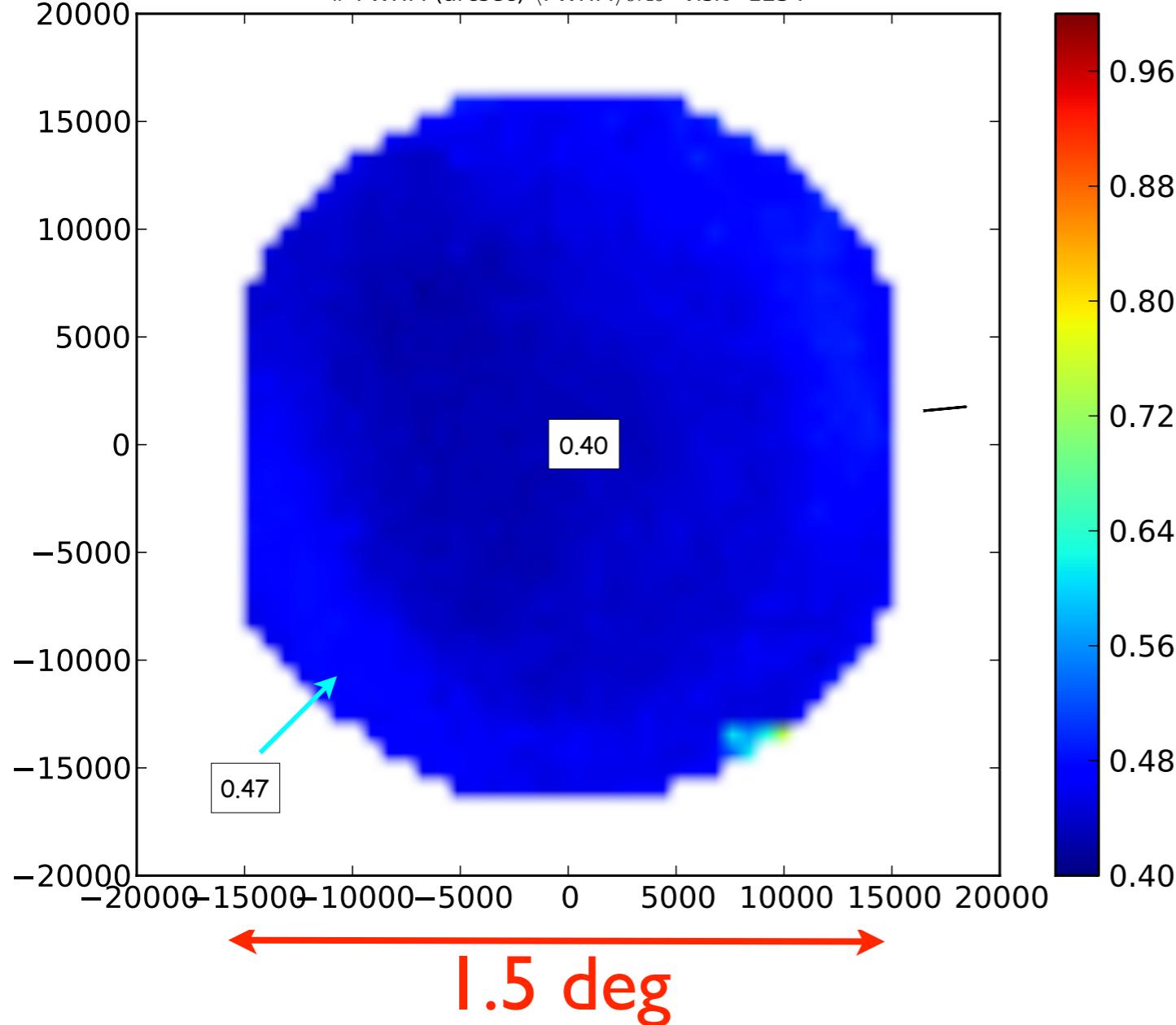
サーベイ速度



- $\text{Etendue} = \text{視野} \times \text{主鏡面積}$
 - サーベイ速度
- 現存するカメラの中で HSC は圧倒的に最大 etendue をもつ

結像性能

object=SSP-Wide filter=HSC-i exptime=200.0 alt=69.83 inr=5.5 hst=02:22:02.214 (corrected)
FWHM (arcsec) $\langle \text{FWHM} \rangle 0.45''$ visit=1254



(HSC-Wide i-band, 200 sec)

- 視野全体に渡って
~0.4'' FWHM の
優れたシーケンス

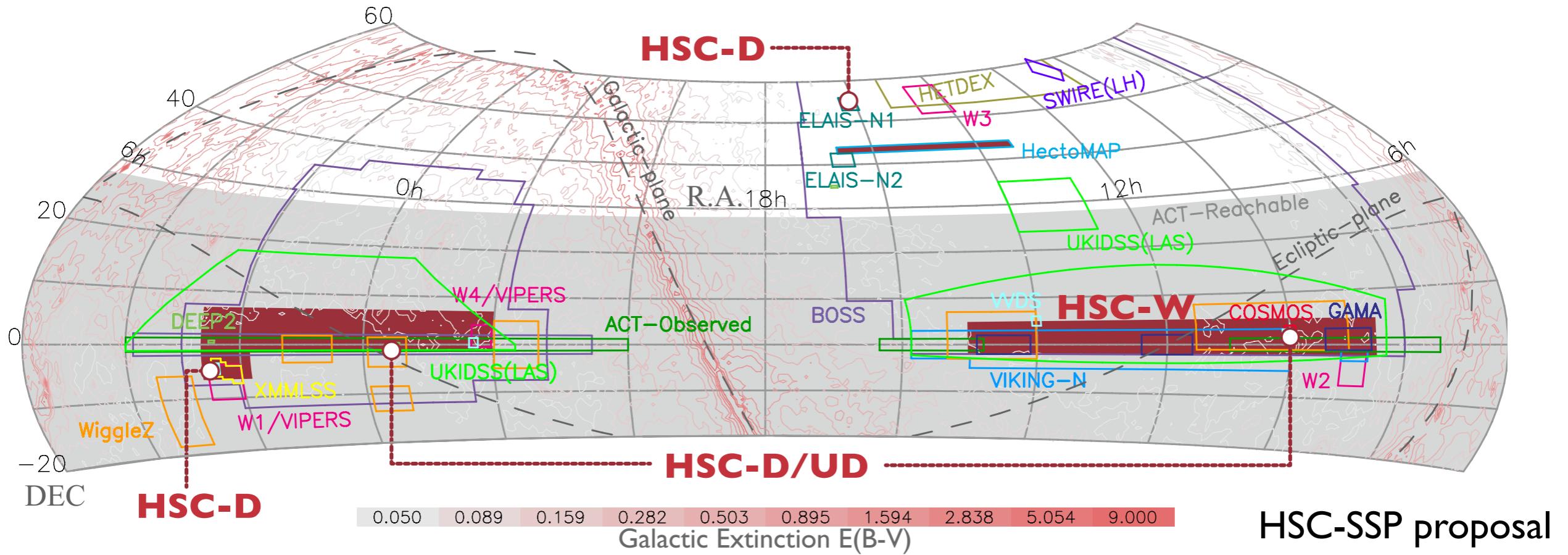
簡単な歴史

- 2006 HSC 科研費スタート (PI: 唐牛)
- 2008 プリンストンと台湾参加
- 2009 SuMIRe 研究費スタート (PI: 村山)
- 2012 Oct すばる戦略枠 (SSP) プロポーザル提出
- 2013 Feb 全 CCD チップでファーストライト
- 2013 Apr HSC-SSP採択 (計300晩)
- 2014 Mar HSC-SSPサービス開始 (5-6年)

すばる戦略枠 (SSP)

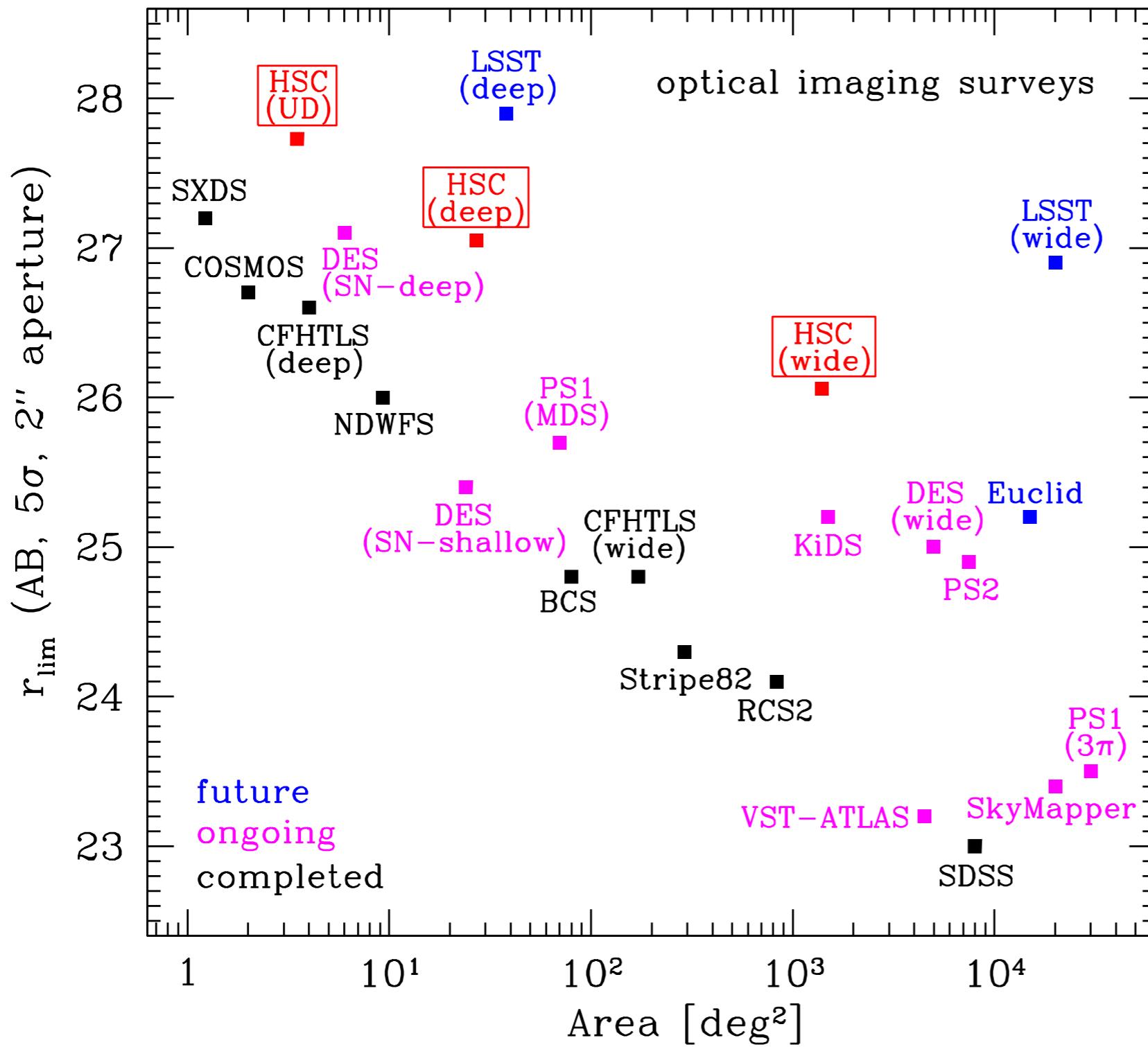
- すばる戦略枠 = Subaru Strategic Program (SSP)
- すばるに新しい装置が搭載された時、まとまった時間を割り当てインパクトの大きい結果を得る
- これまで: SEEDS (HiCHAO) 120晩
FastSound (FMOS) 40晩
HSC-SSP (HSC) 300晩

HSC-SSPサーベイ



- 三つのレイヤーから構成
 - wide (1400 deg², 限界等級 $r_{\text{lim}} \sim 26$, grizy)
 - deep (27 deg², 限界等級 $r_{\text{lim}} \sim 27$, grizy+3NBs)
 - ultra-deep (3.5 deg², 限界等級 $r_{\text{lim}} \sim 28$, grizy+3NBs)

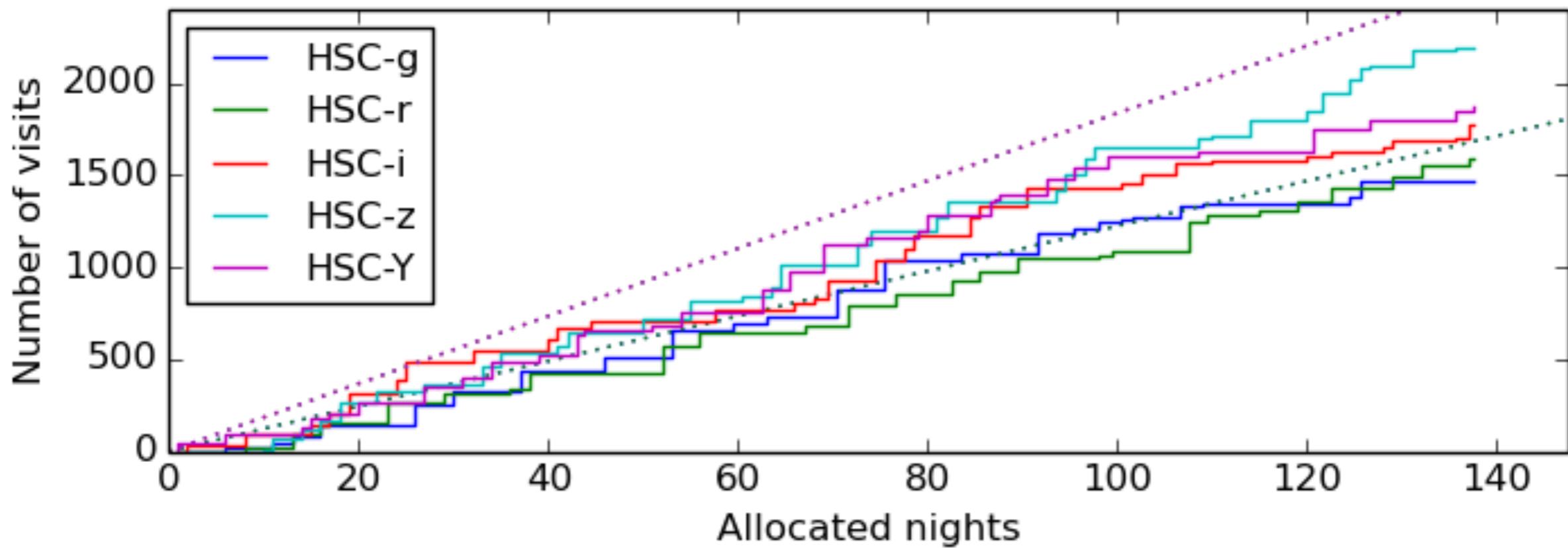
サーベイの比較



広く深い HSC
サーベイは
たいへんユニー
ク

現在の状況 (as of 2017 Mar 8)

- 137夜分すでに観測
- ~300 deg² 分の Wide の full depth full color 領域



HSC-SSP サーベイポリシー

- 日本の研究者は誰でも参加可能 (“all-Japan”)
- SDSS と同様のオープンな “bottom up” ポリシー
- すべての研究者は、プロジェクトをアナウンスしオープンに研究を進める限りにおいて自分の興味に基づいて自由にテーマを設定し研究を行うことができる
- メーリングリスト、wiki、ワーキンググループ、定期的な telecon などによって情報交換

catalog can be retrieved via SQL query

about the data release	schema browser	list jobs	summary table search	direct SQL search	misc	hscMap
(s15a)					problem?	oguri@stars

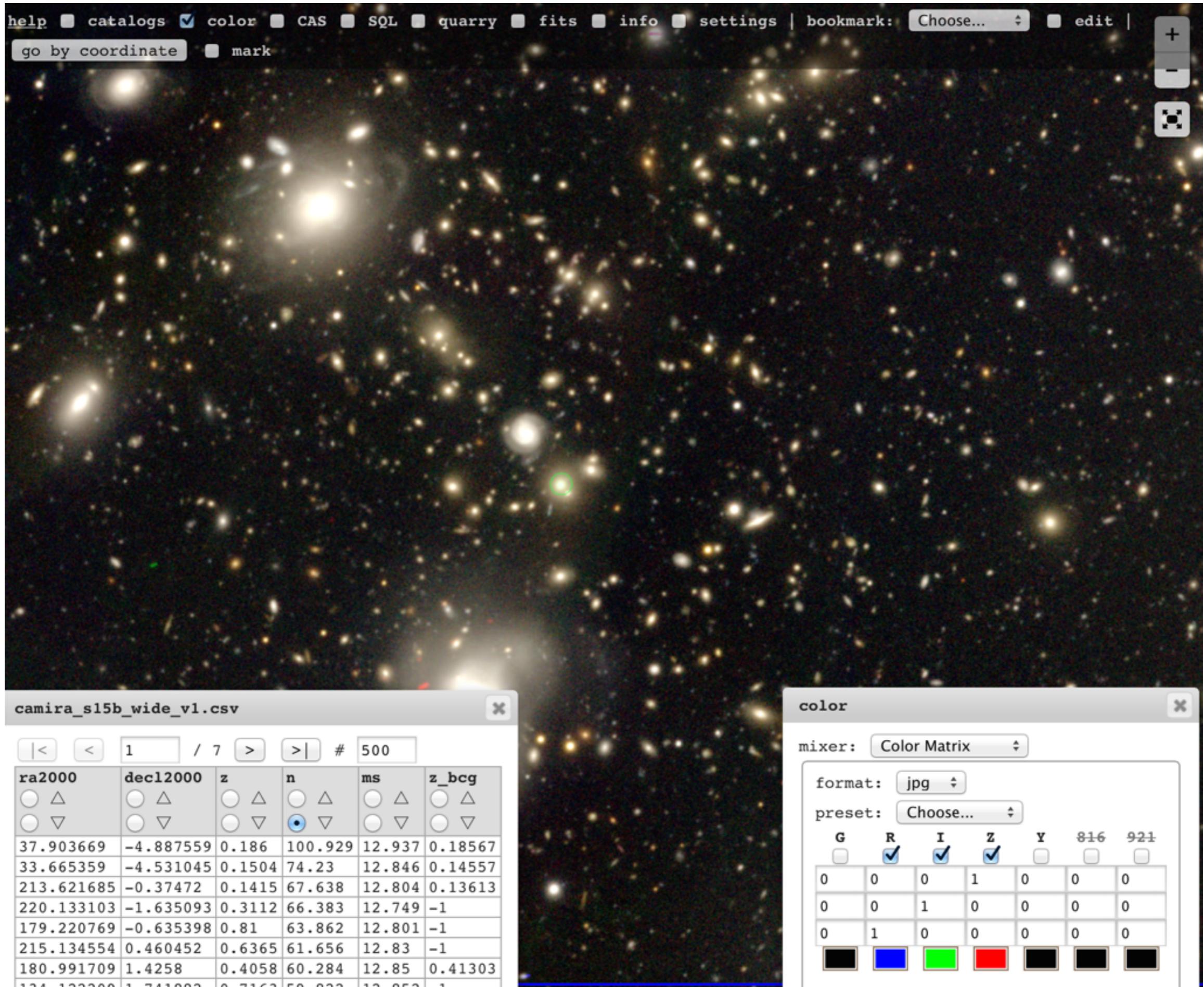
name: catalog-job 2016-08-06

release: dr1 ▾

SQL: Press ctrl-space or ctrl-I to activate autocompletion (experimental). Press ctrl-enter to preview

```
1 --
2 --- put your SQL here
3 --
4 SELECT photo.ra2000, photo.decl2000,
5     photo.gmag_kron - photo.a_g as gmag, photo.gmag_kron_err as gmag_err,
6     photo.rmag_kron - photo.a_r as rmag, photo.rmag_kron_err as rmag_err,
7     photo.imag_kron - photo.a_i as imag, photo.imag_kron_err as imag_err,
8     photo.zmag_kron - photo.a_z as zmag, photo.zmag_kron_err as zmag_err,
9     photo.ymag_kron - photo.a_y as ymag, photo.ymag_kron_err as ymag_err,
10    photo.gmag_cmodel - photo.a_g as cgmag, photo.gmag_cmodel_err as cgmag_err,
11    photo.rmag_cmodel - photo.a_r as crmag, photo.rmag_cmodel_err as crmag_err,
12    photo.imag_cmodel - photo.a_i as cimag, photo.imag_cmodel_err as cimag_err,
13    photo.zmag_cmodel - photo.a_z as czmag, photo.zmag_cmodel_err as czmag_err,
14    photo.ymag_cmodel - photo.a_y as cymag, photo.ymag_cmodel_err as cymag_err,
15    g_flag.countinputs as gin,
16    r_flag.countinputs as rin,
17    i_flag.countinputs as iin,
18    z_flag.countinputs as zin,
19    y_flag.countinputs as yin,
20    g_flag.cmodel_flux_flags as gcflag,
21    r_flag.cmodel_flux_flags as rcflag,
22    i_flag.cmodel_flux_flags as icflag,
23    z_flag.cmodel_flux_flags as zcflag,
24    y_flag.cmodel_flux_flags as ycflag,
25    refl.deblend_nchild
26 FROM s15a_wide.photoobj_mosaic_deepcoadd_merged as photo
27     JOIN s15a_wide.mosaic_reflist_deepcoadd as refl USING (id)
28     JOIN s15a_wide.mosaic_forceflag_g_deepcoadd_merged as g_flag USING (id)
29     JOIN s15a_wide.mosaic_forceflag_r_deepcoadd_merged as r_flag USING (id)
30     JOIN s15a_wide.mosaic_forceflag_i_deepcoadd_merged as i_flag USING (id)
31     JOIN s15a_wide.mosaic_forceflag_z_deepcoadd_merged as z_flag USING (id)
32     JOIN s15a_wide.mosaic_forceflag_y_deepcoadd_merged as y_flag USING (id)
33     JOIN s15a_wide.mosaic_measflag_i_deepcoadd as i_mflag USING (id)
34
35 WHERE photo.ra2000 BETWEEN 35.314319 AND 35.648341
36     AND photo.decl2000 BETWEEN -3.848230 AND -3.514896
37
```

nice image viewer ‘hscMap’ for visual inspection

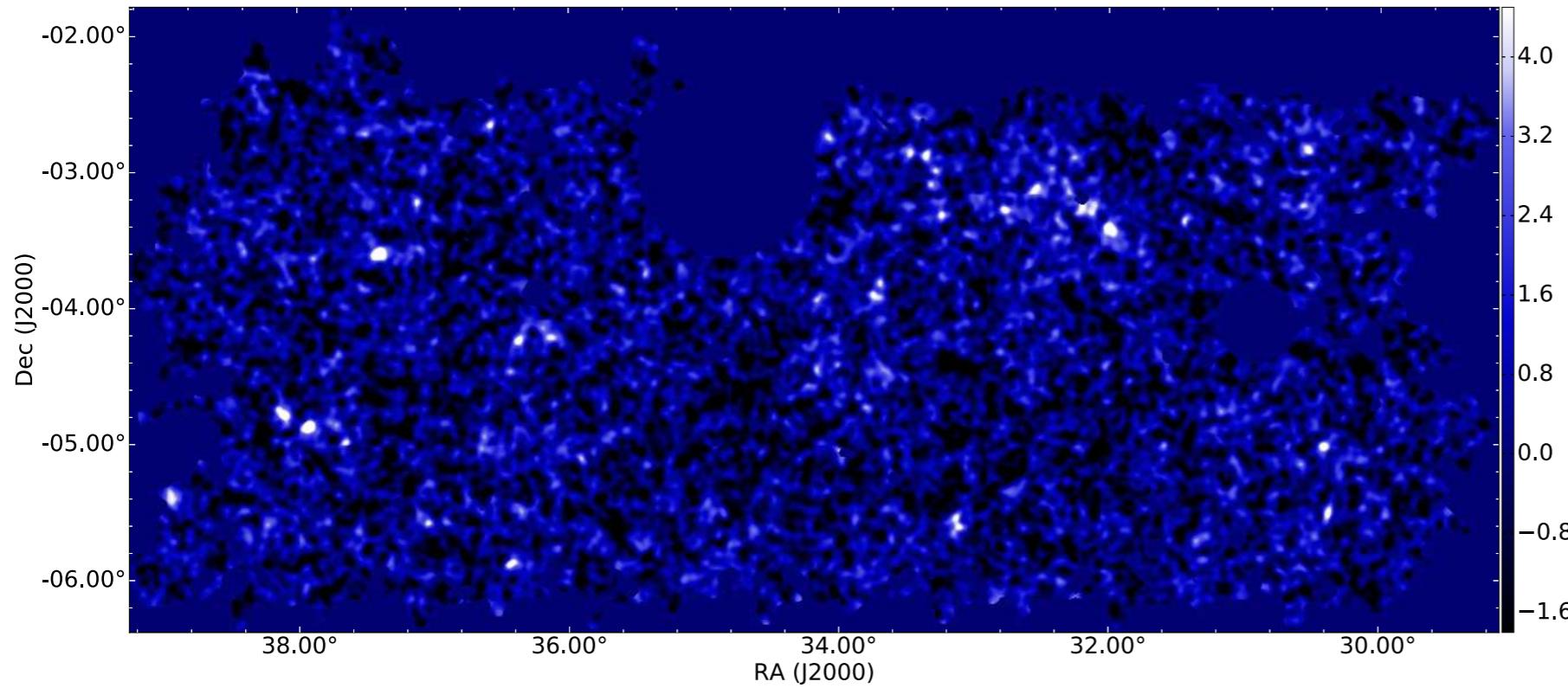


HSC-SSP weak lensing の現状

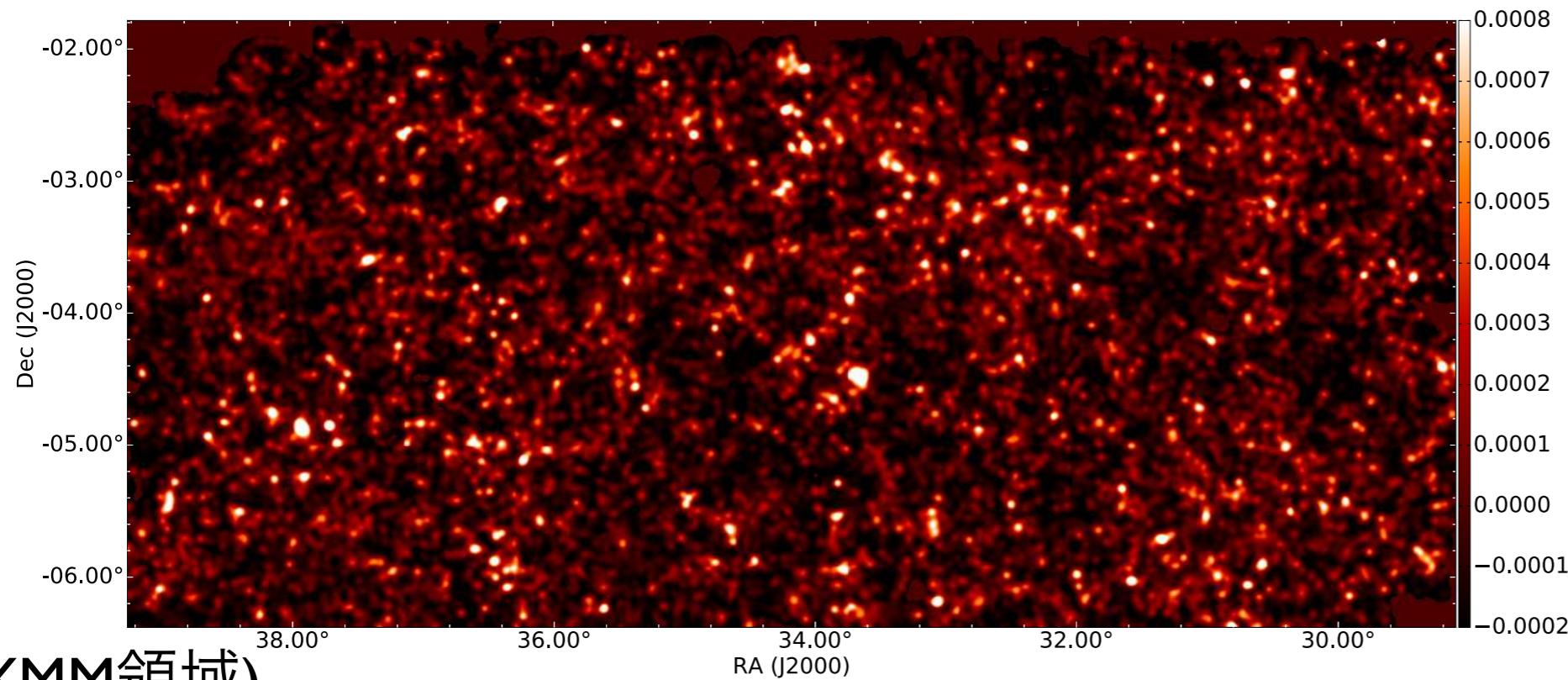
- 銀河の shape 測定、カタログの作成、系統誤差や精度のチェックを皆さんずっと行ってきた
- 最初のサイエンス解析用のカタログ ($\sim 160 \text{ deg}^2$) がほぼ完成
- 今年春から夏にかけて初期成果論文を投稿予定

(以下の結果はすべて **preliminary**)

重力レンズ質量マップ

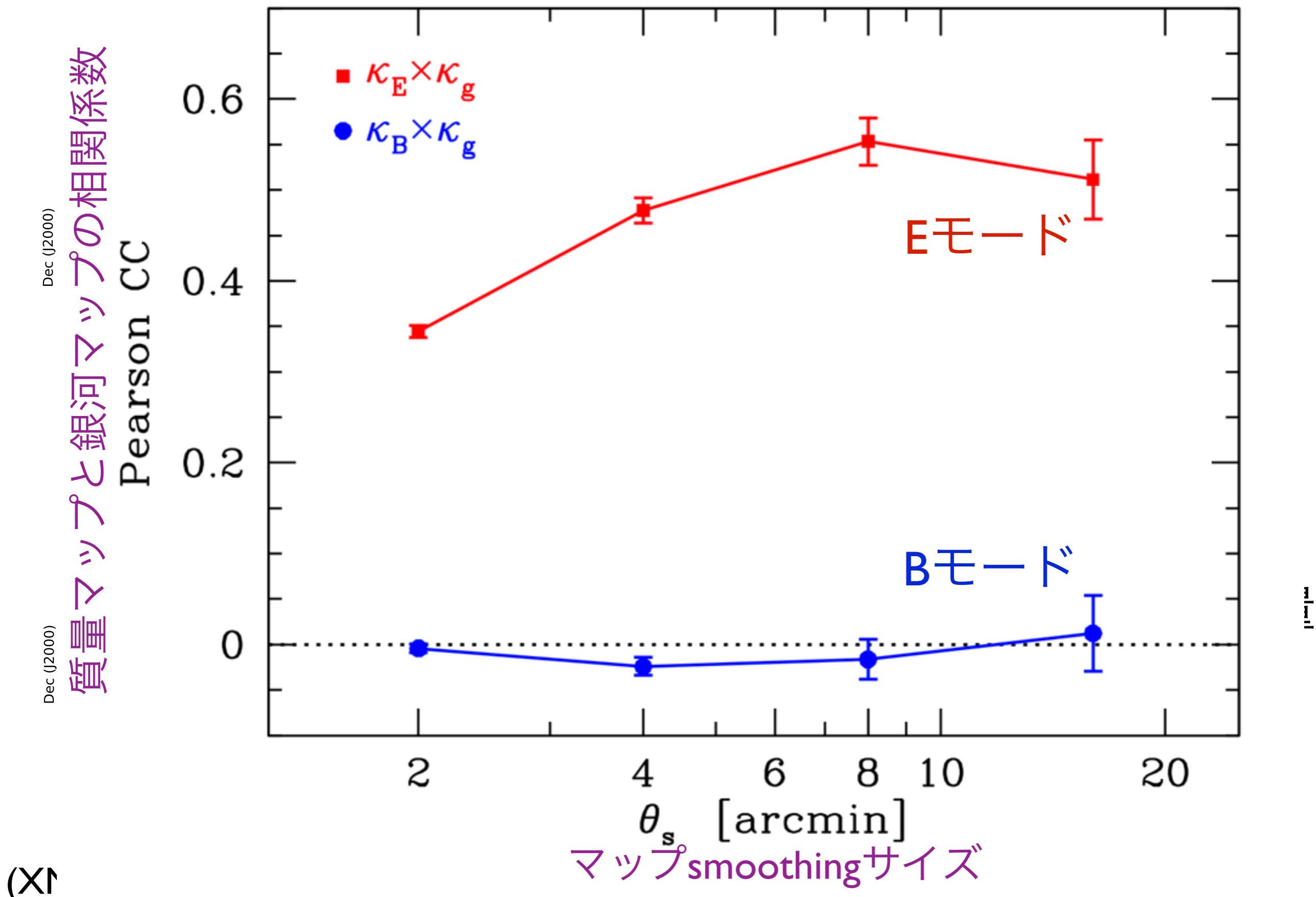


重力レンズ
質量マップ

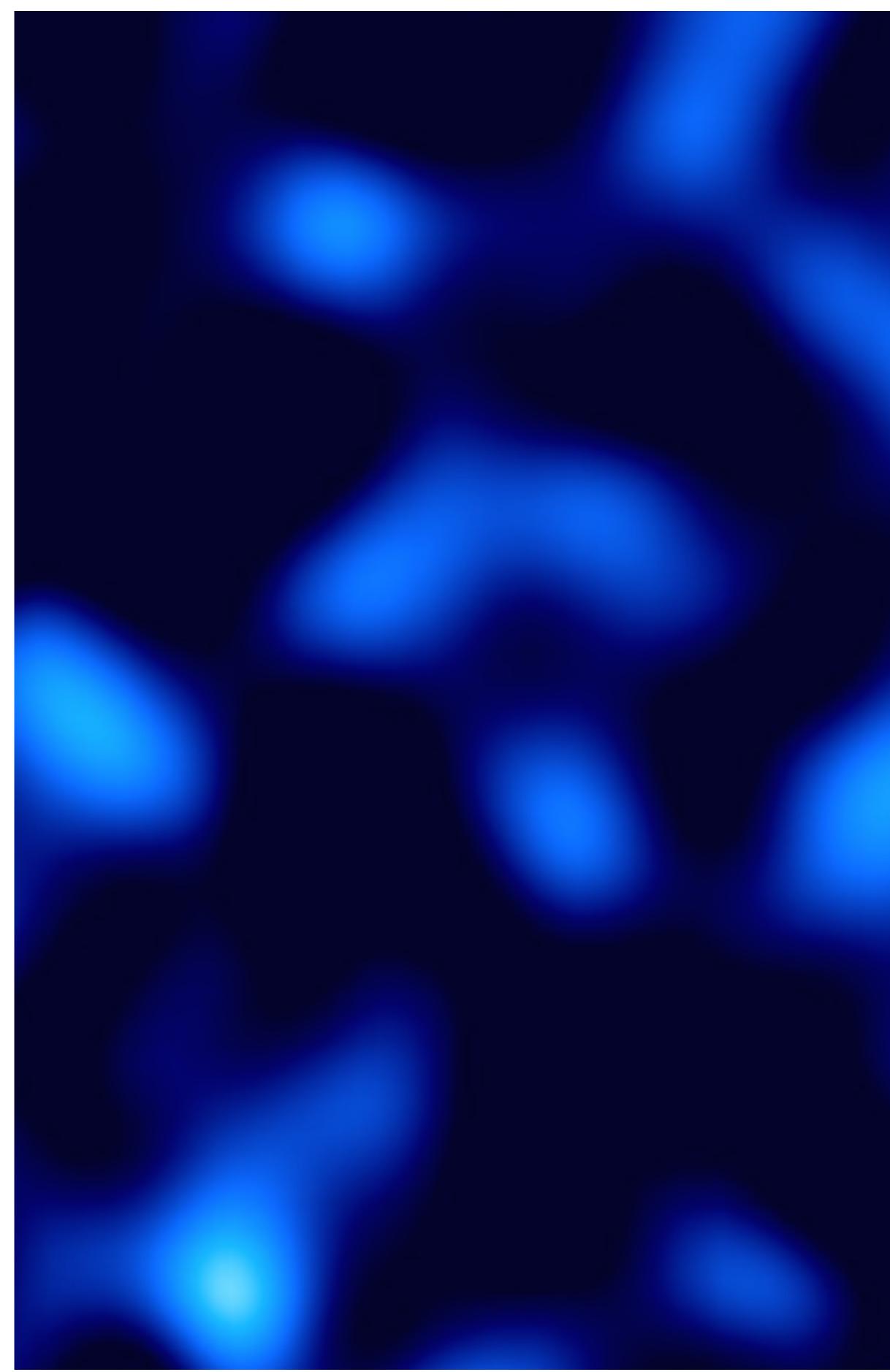
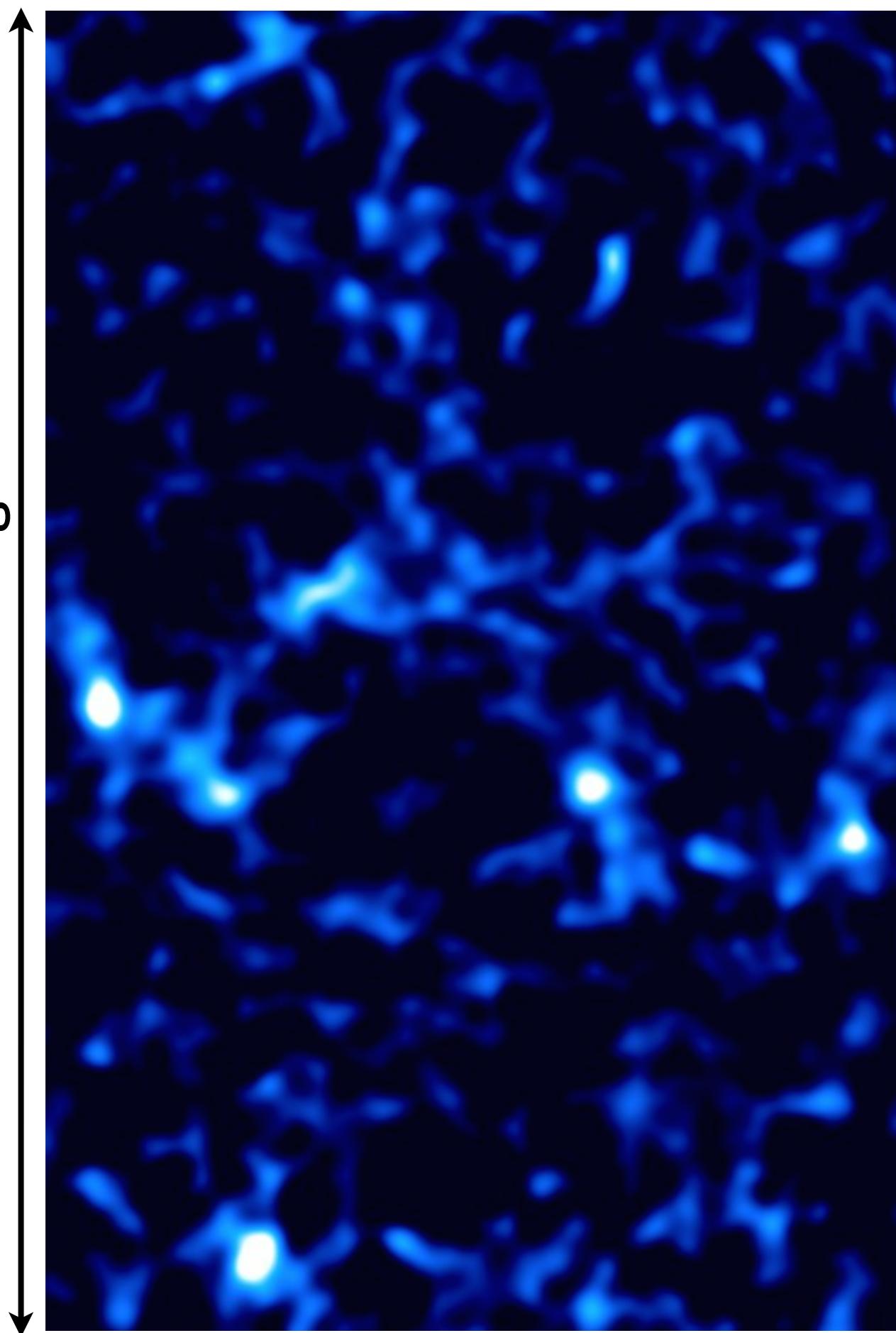


銀河の星質量
マップ

(XMM領域)



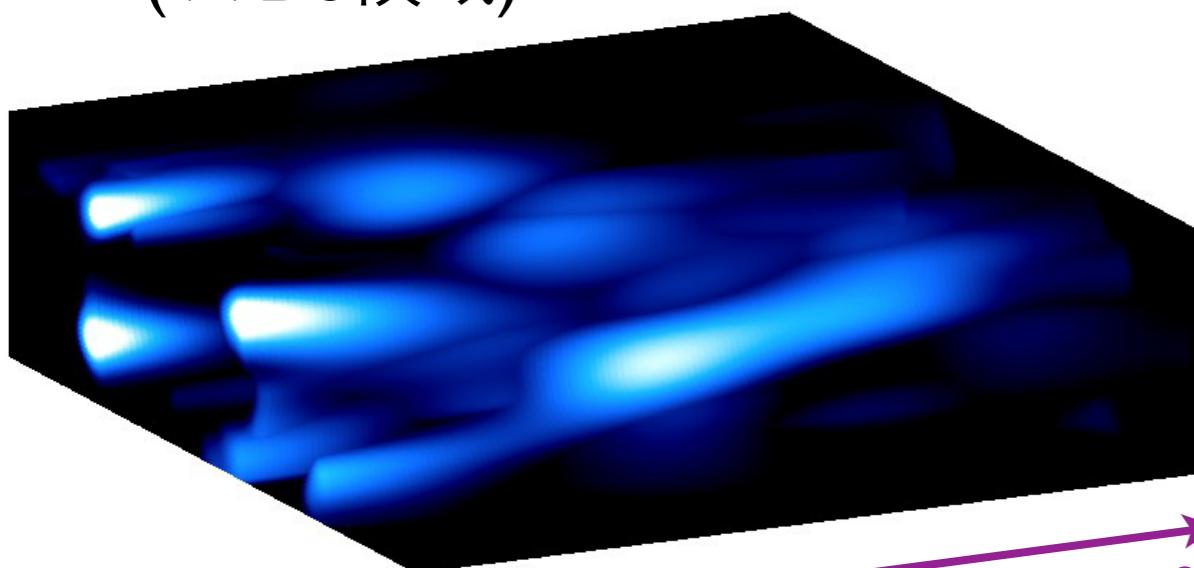
$\frac{1}{\ell} \text{ deg}$



DES-like

三次元質量マップ

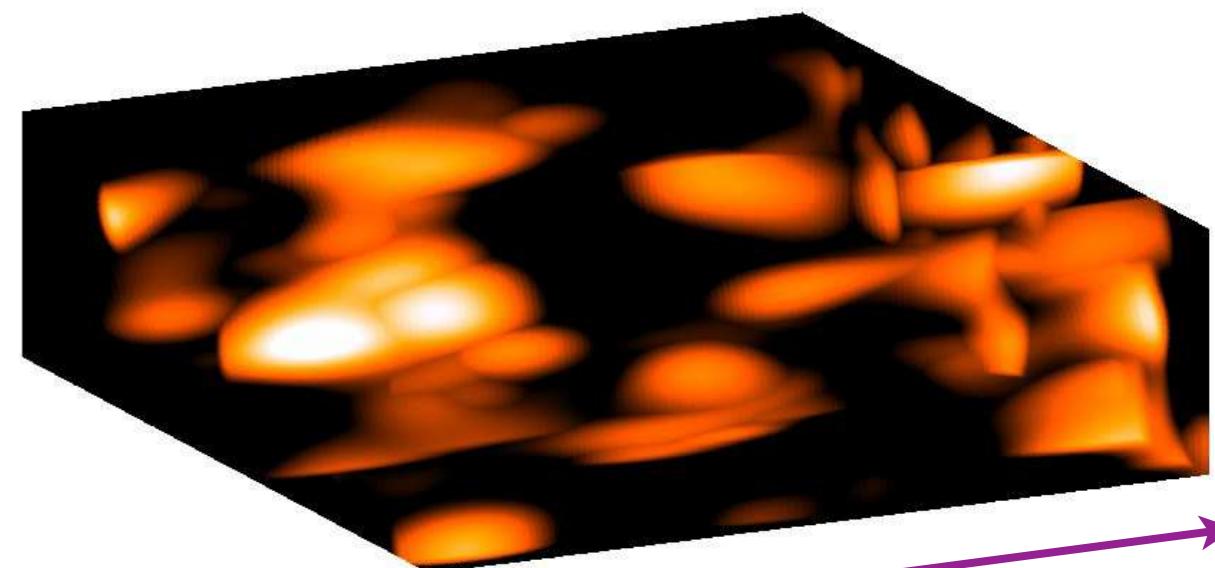
(VVDS領域)



$z=0.15$

$z=0.75$

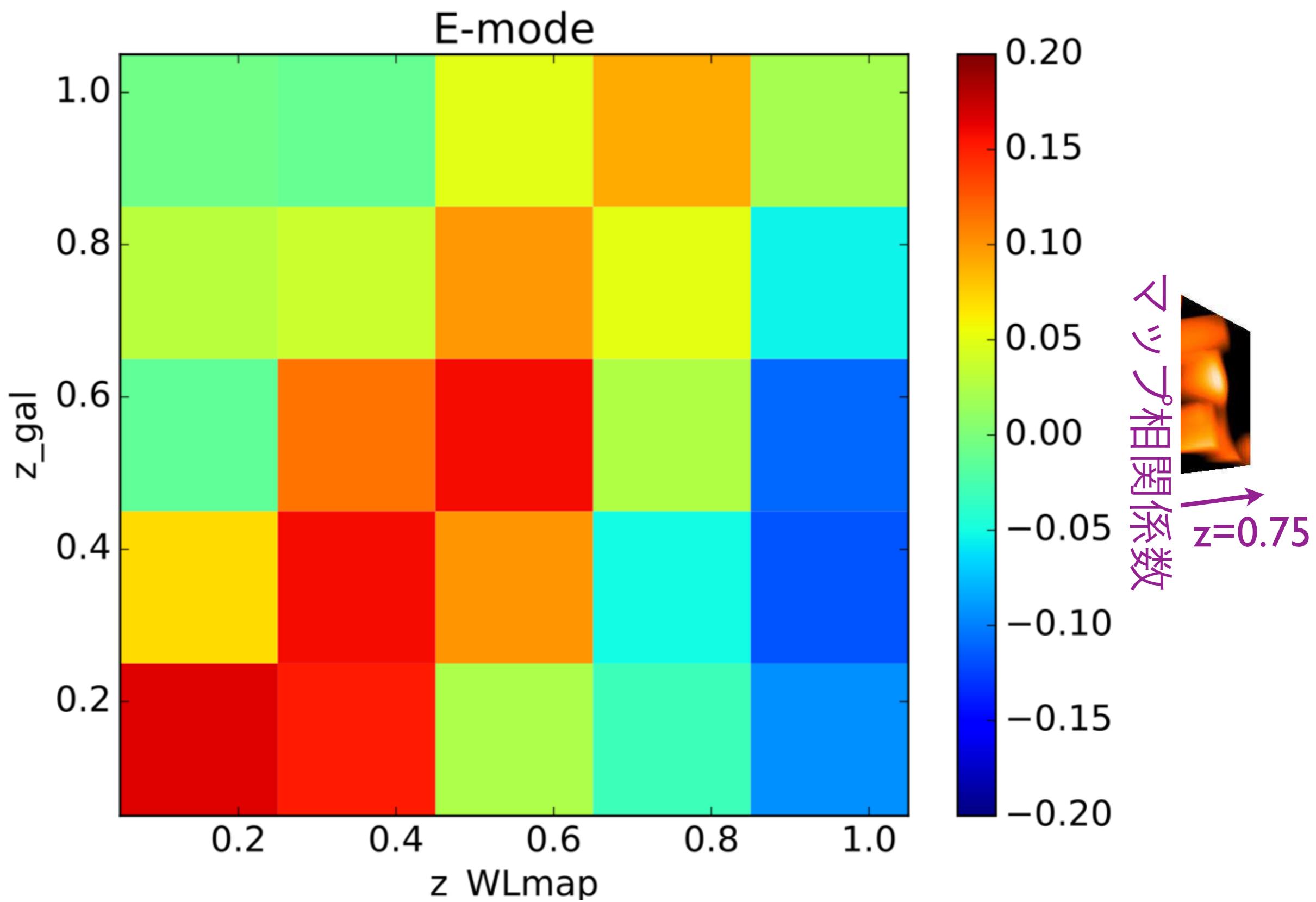
重力レンズ
質量マップ



$z=0.15$

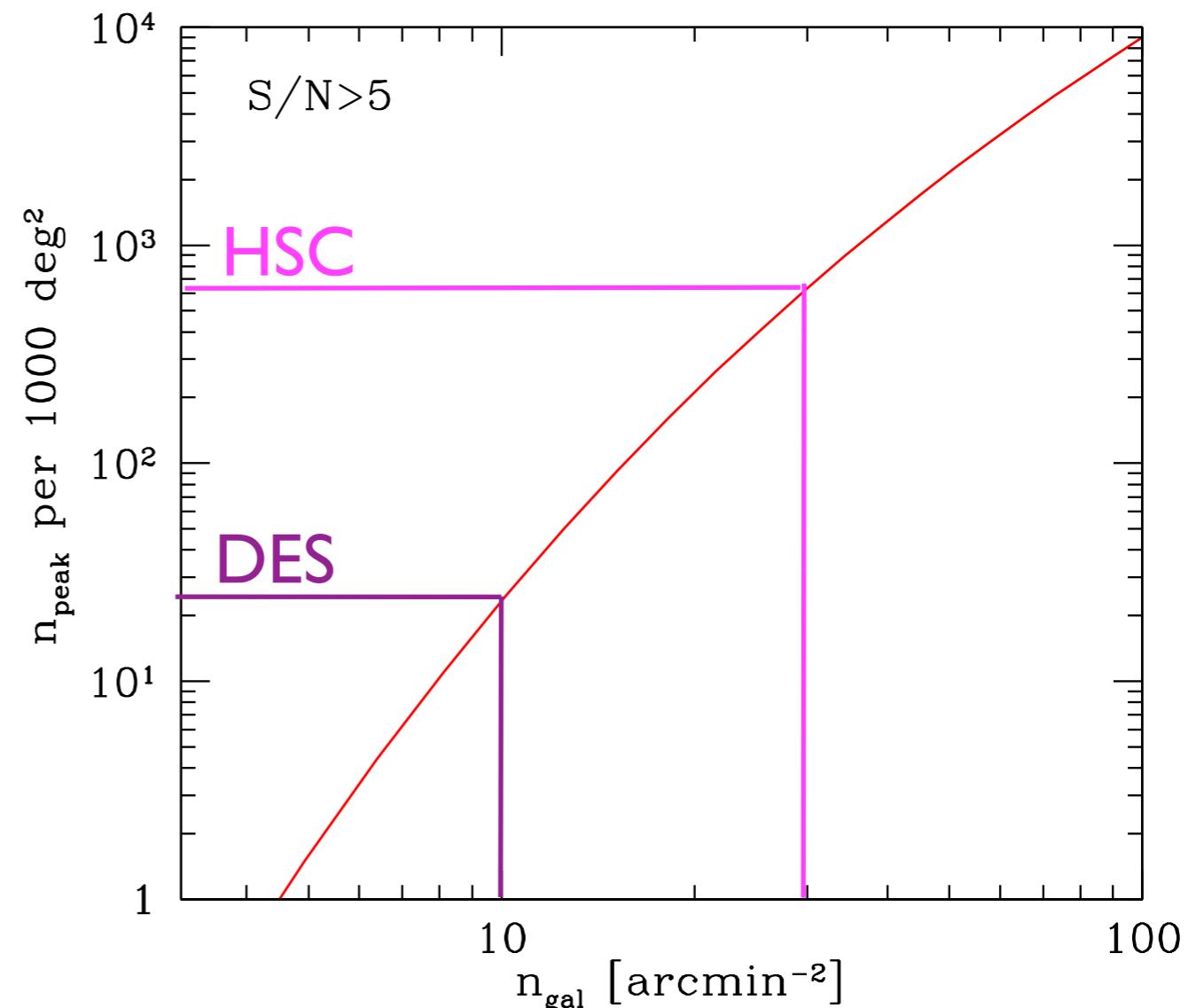
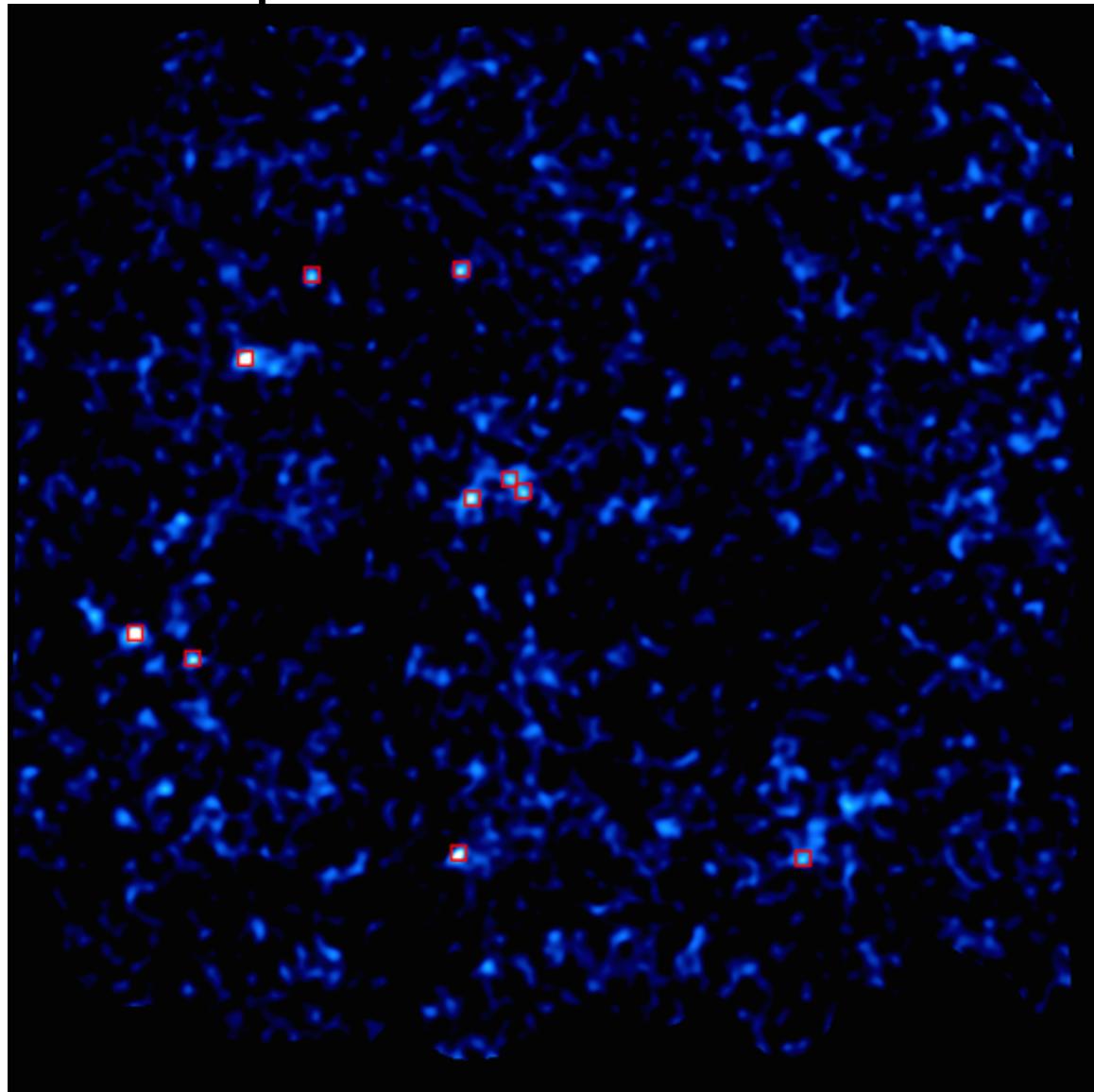
$z=0.75$

銀河の星質量
マップ



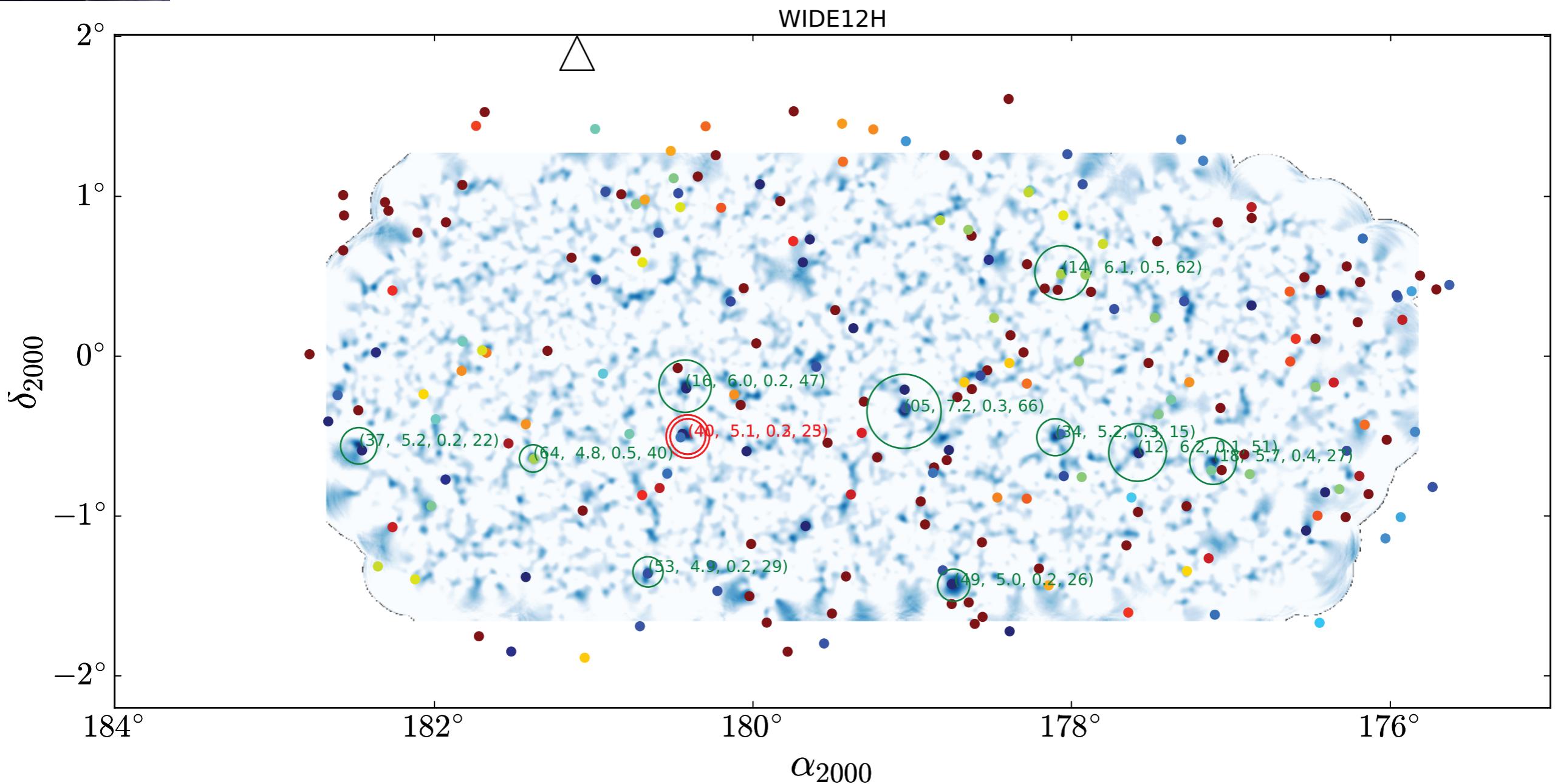
銀河団探査

mass map from Subaru/HSC

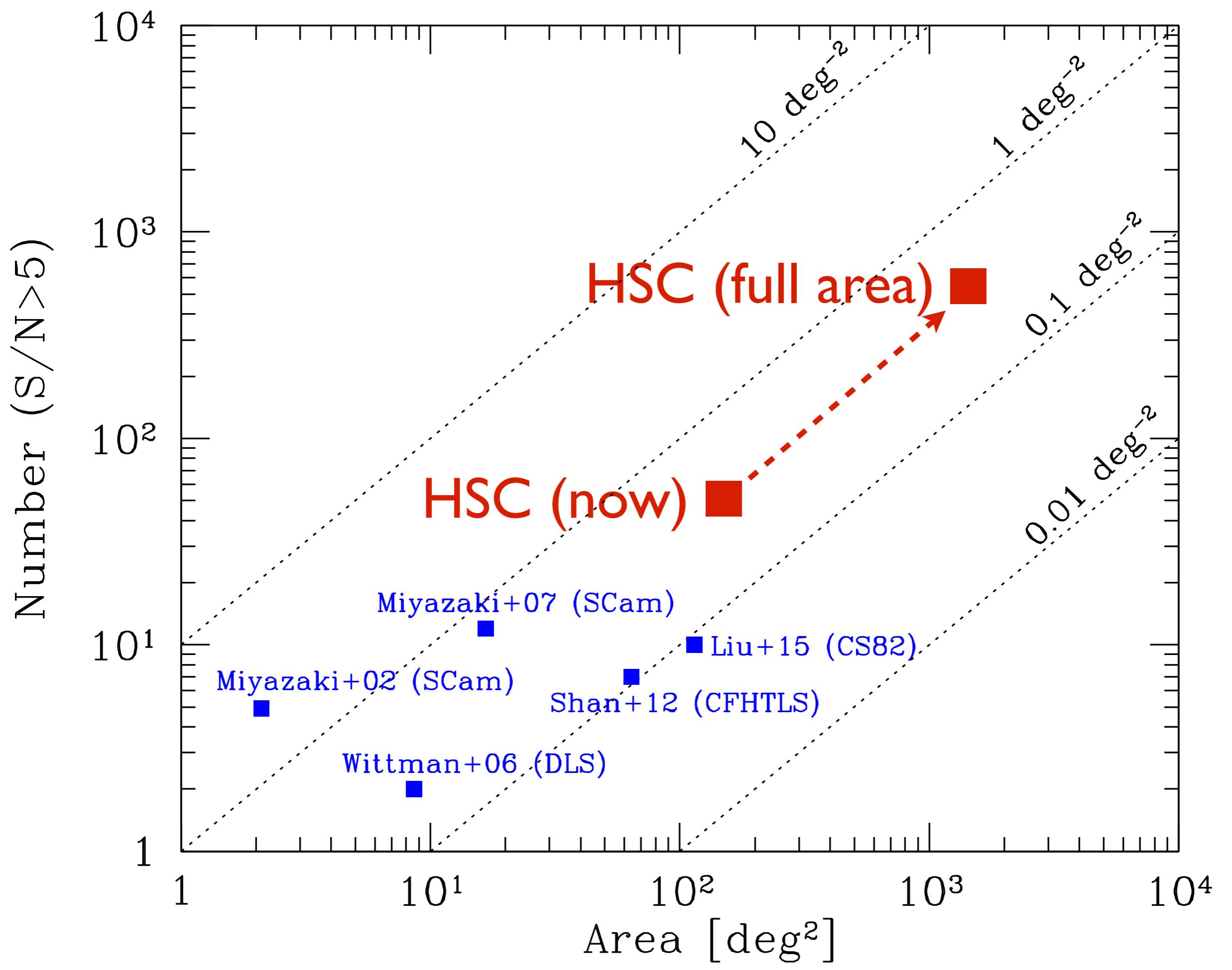


- 質量マップのピークで銀河団探査 (“mass-selected”)
- HSCの深さが本質的に重要

質量マップで選ばれた銀河団



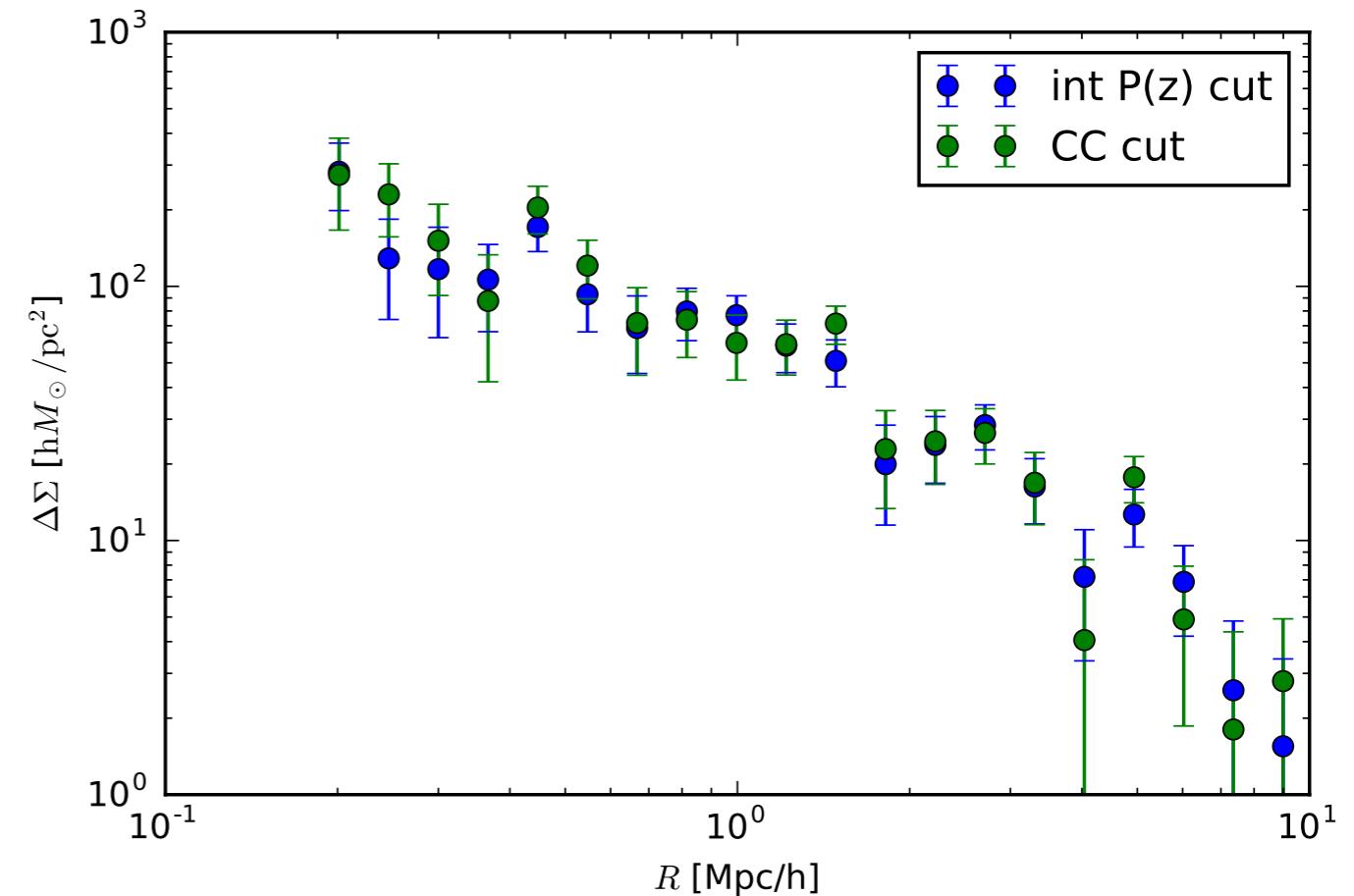
- 71個のピーカ (S/N>4.7) を同定
→ mass-selected 銀河団サンプルを大幅に増加





SZ銀河団質量測定

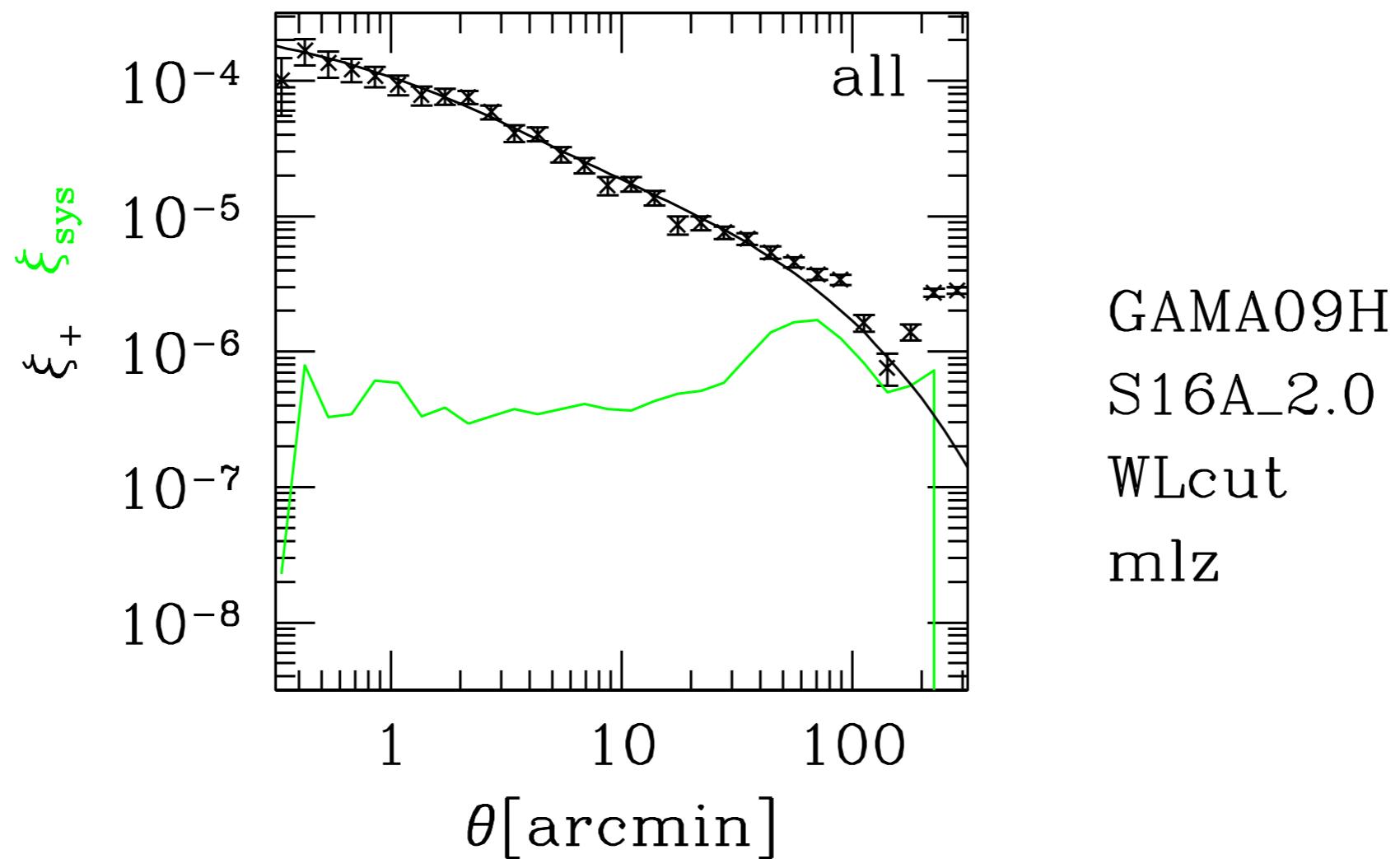
- HSCサーベイ領域は ACTPolサーベイと 大きな overlap
- ACTPol SZ銀河団の 質量をHSCの重力 レンズで測定
- 質量バイアス (l-b) を制限し密度揺らぎ を決める



スタック重力レンズシグナル



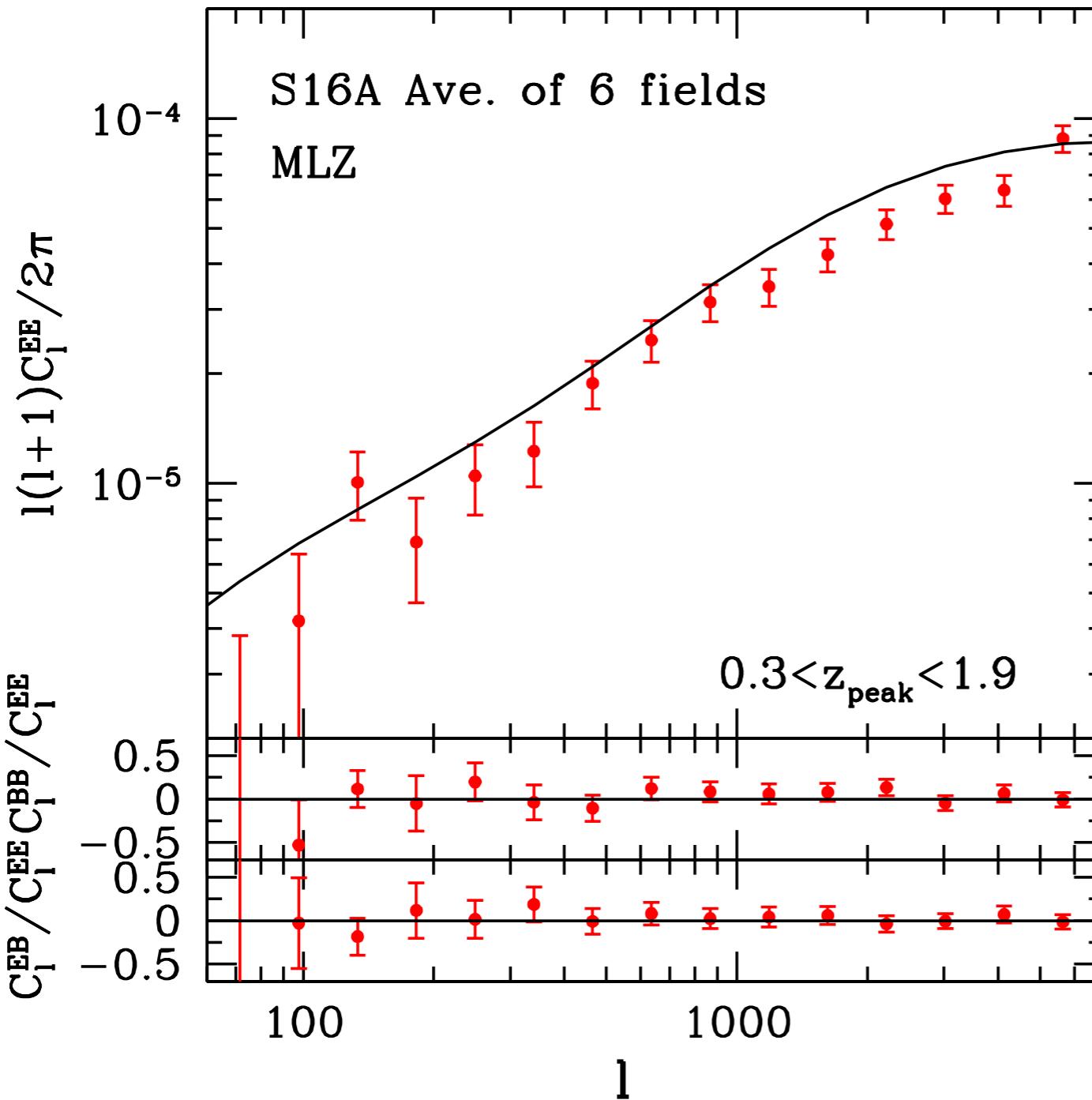
Cosmic shear: 実空間



- shear 二点相関を高S/Nで検出
- 星と銀河の二点相関から見積もった系統誤差は大スケールを除いて無視できる



Cosmic shear: フーリエ空間



- 擬似スペクトル法を用いてEB分解(Hikage et al. 2011)
- マスクの影響を補正し正しくパワースペクトルが求められている

HSCサーベイ：まとめ

- HSCサーベイは順調にすすんでおり、弱い重力レンズ解析もカタログを作成し論文を準備しているところである
- アイデアがあればぜひ使ってください