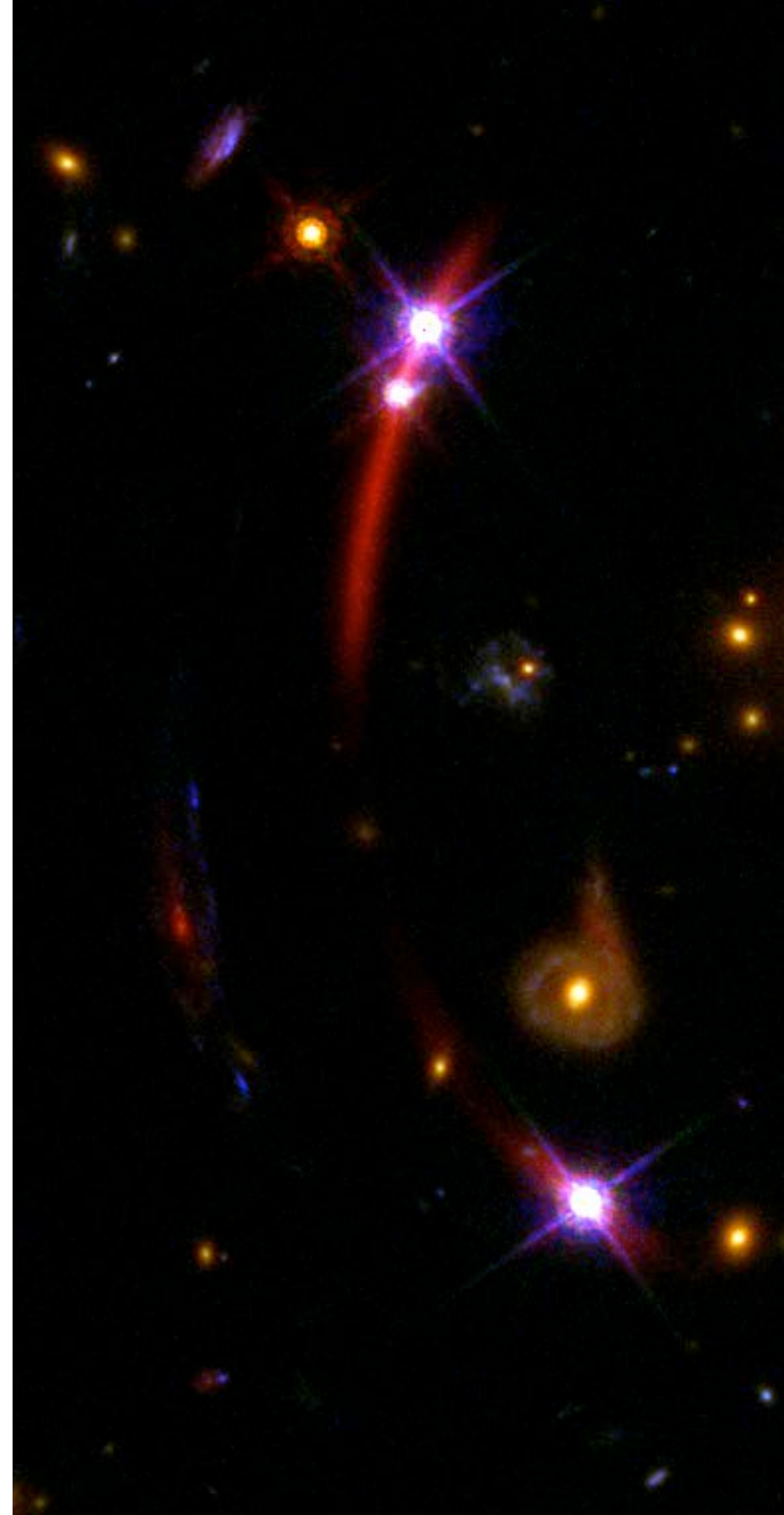


HSCサーベイと 重力レンズ

大栗真宗 (Kavli IPMU)



研究会「HSCサーベイによるサイエンス」
2012.9.26 国立天文台



第1章 はじめに

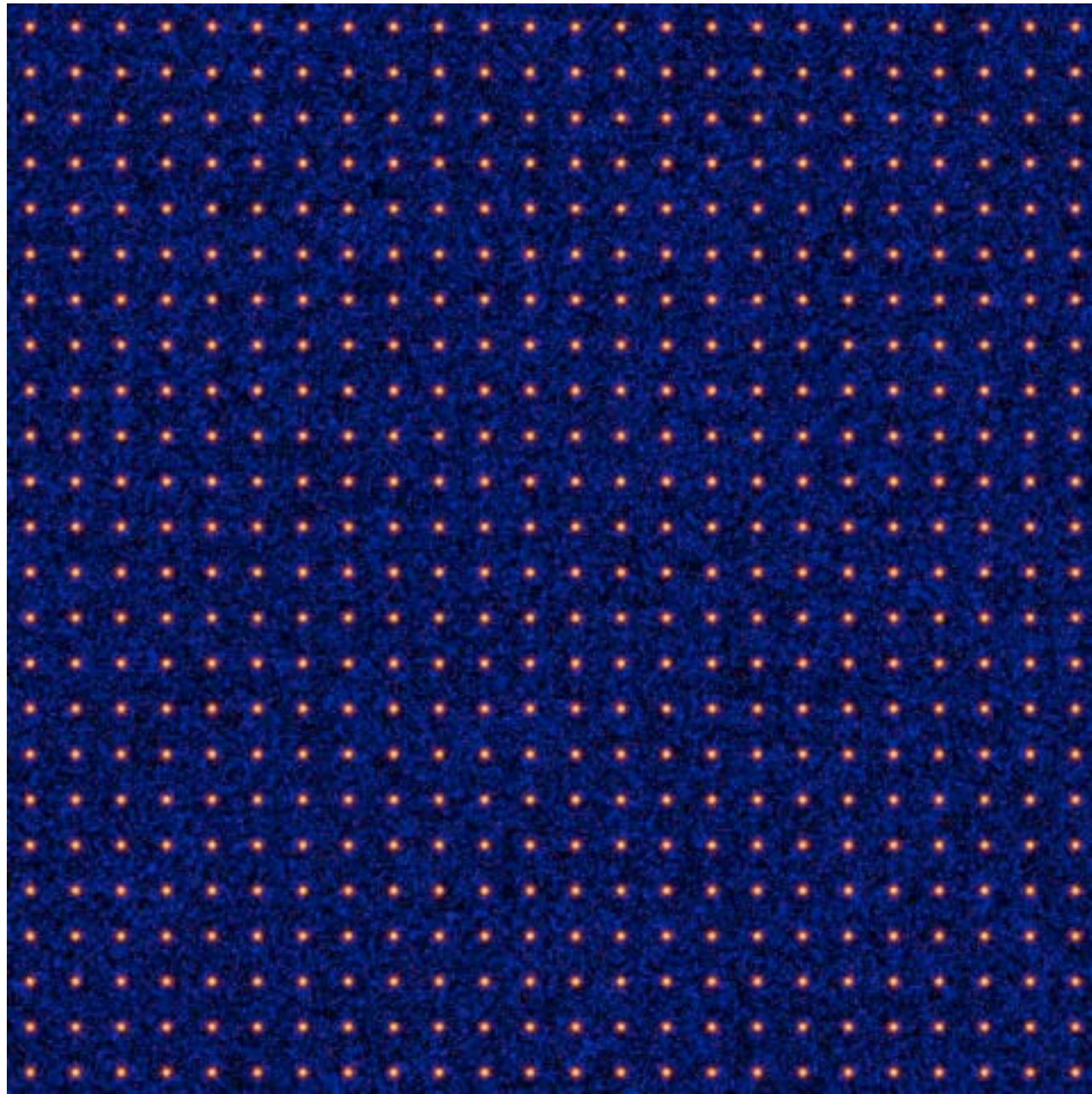
宇宙が何で構成されていて、それがどのように時間進化して現在に至ったのかを明らかにすることは、宇宙論の中心的なテーマである。近傍の銀河団内の銀河の運動学的な考察により、電磁波による観測では検出できない、いわゆる「ダークマター」が大量に存在することは比較的早い時期から認識されていた。ダークマターの正体はいまだ明らかになっていないが、その中でも冷たいダークマター (CDM) モデルが注目を集めている。とある初期条件のもと、計算機の中で CDM の力学的な時間発展を調べてみると、宇宙年齢程度たった後の CDM の分布の様子が、我々の近傍の銀河や銀河団の分布（大規模構造）の様子とよい一致を示す、というのが CDM モデルを支持する論拠である。最近では CDM のパラダイムは当然のこととして受け入れ、大規模構造の分布から宇宙の幾何学を決める宇宙論パラメータを求めるといような仕事が行われるようになり、研究が一段と精密化している。

CDM モデルは非常に成功を収めていると言われているが、その検証にはまだひとつ大きな問題が残されている。それは理論と観測の比較の仕方にある。観測で得られるのは、銀河や銀河団と言った光の量の分布であり、一方理論が予言するのは質量の分布である。どのくらいの質量のもとで、どのくらいの光が発生するかというのはいわゆる銀河形成の問題で、電磁気、流体といった物理過程が複雑に関与し、いまなお天体物理学の最前線の課題である。つまり観測量である光を質量に変換するにはある仮定が必要だが、その仮定にはまだ不定性が高いのである。以上のような理由により、現在の宇宙論の大黒柱である CDM モデルは、実は充分検討されたとは言えない状況なのである。これを打破するには質量分布のより直接的な観測が必要である。

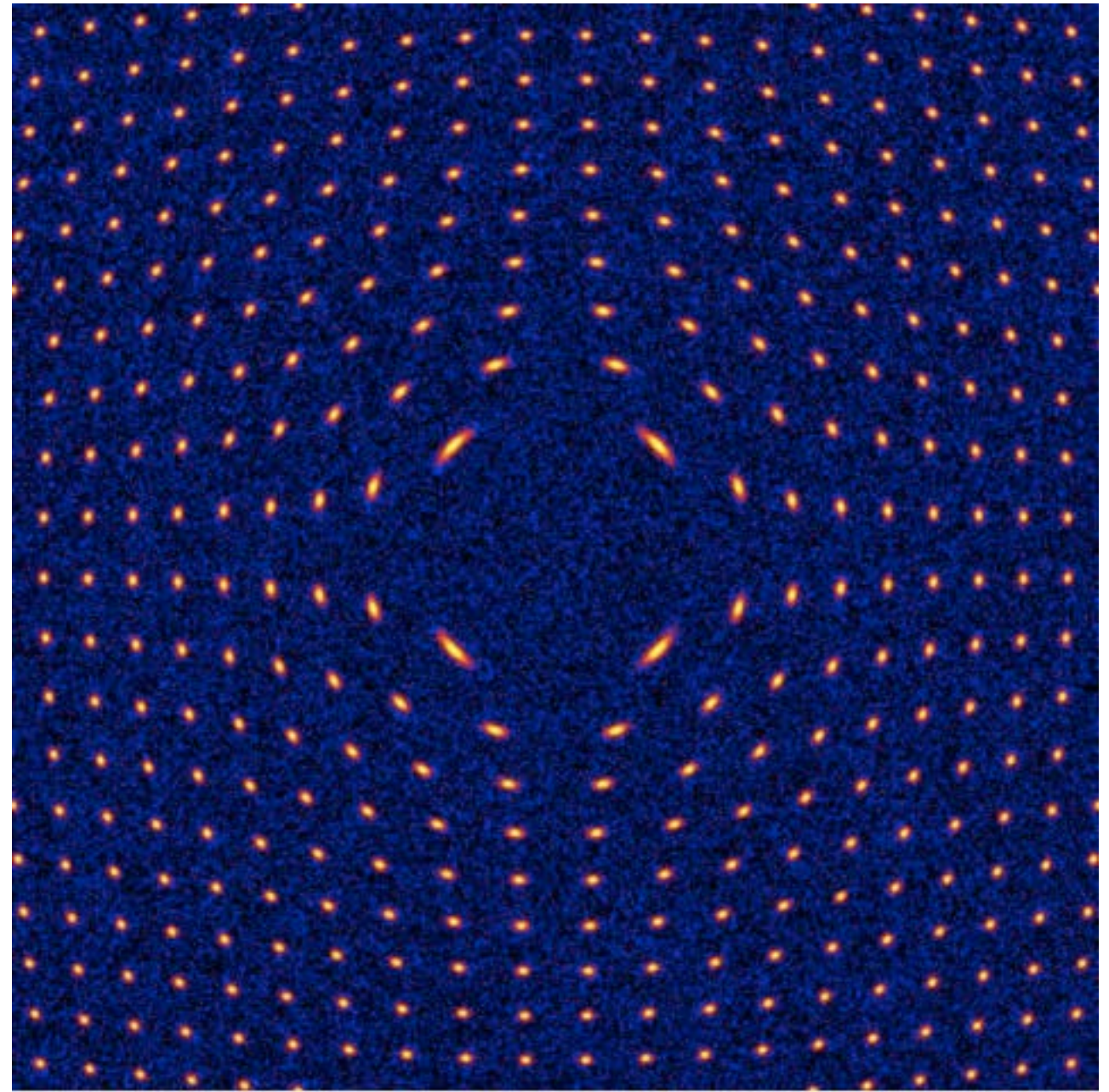
我々の目標は、宇宙論的なスケールで引き起こされる重力レンズ効果を用いて質量分布の直接観測を行い、宇宙の質量と光の関係を明らかにし、銀河形成の理論の検証を行うことにある。さらにこの結果をもとに、CDM パラダイムの検証を行う。重力レンズ効果とは、遠方にある銀河の像を視線中にある質量が歪めることである。この歪みを多数の背景銀河について計測することにより、前景天体の大局的な質量分布を推定することが可能である。原理は比較的単純なのであるが、遠方で暗い銀河の形状を精度よく計測するためには、

simulated by *glafic*

重力レンズ現象



no lensing



lens potential at the center

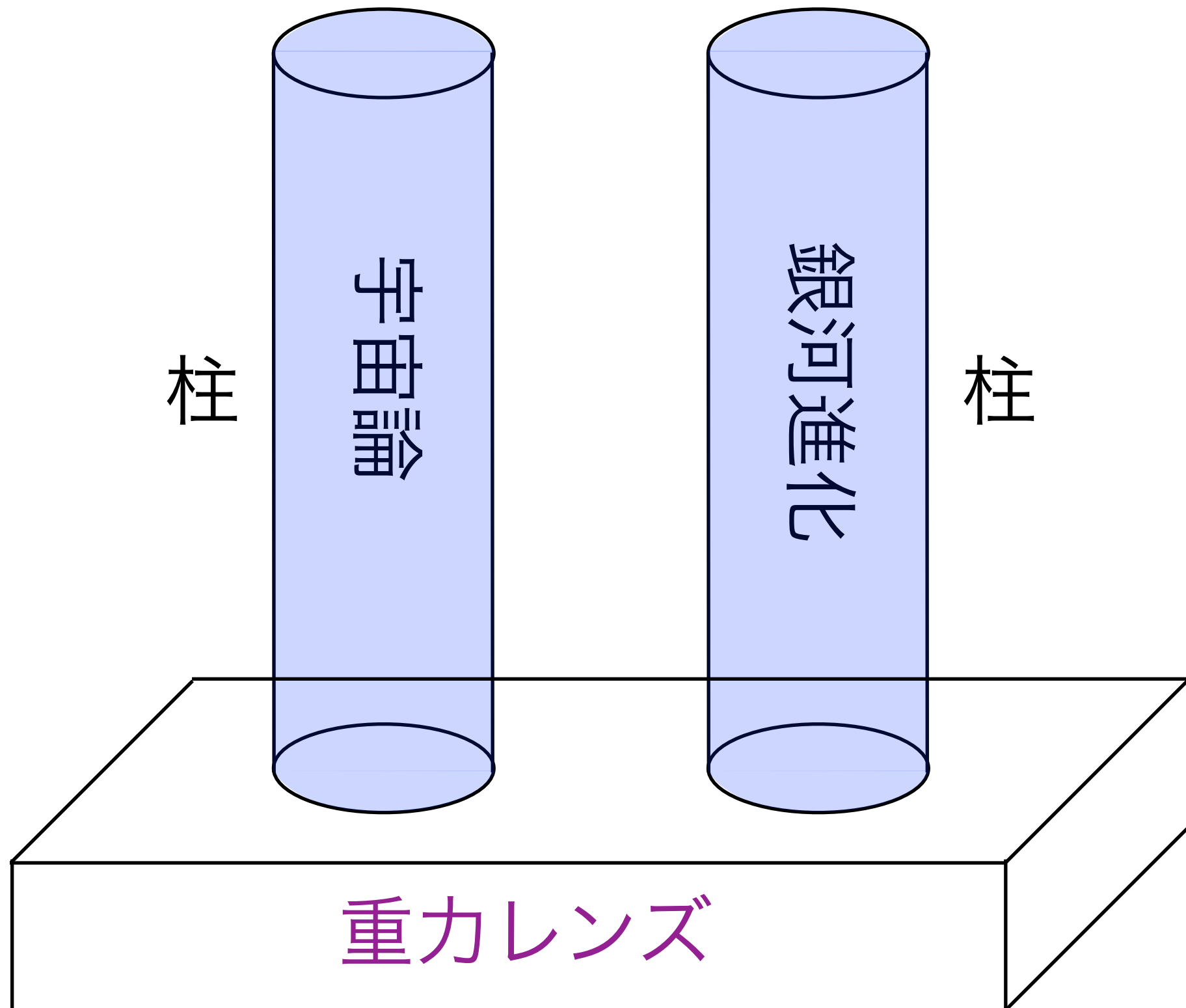
simulated by *glafic*



重力レンズとは

- 重力場による光の曲がりから質量分布推定
- 遠方天体を拡大、増光
- 「目的」ではなく「手段」である
- 広範な応用

HSCサーベイ



銀河進化研究と重力レンズ

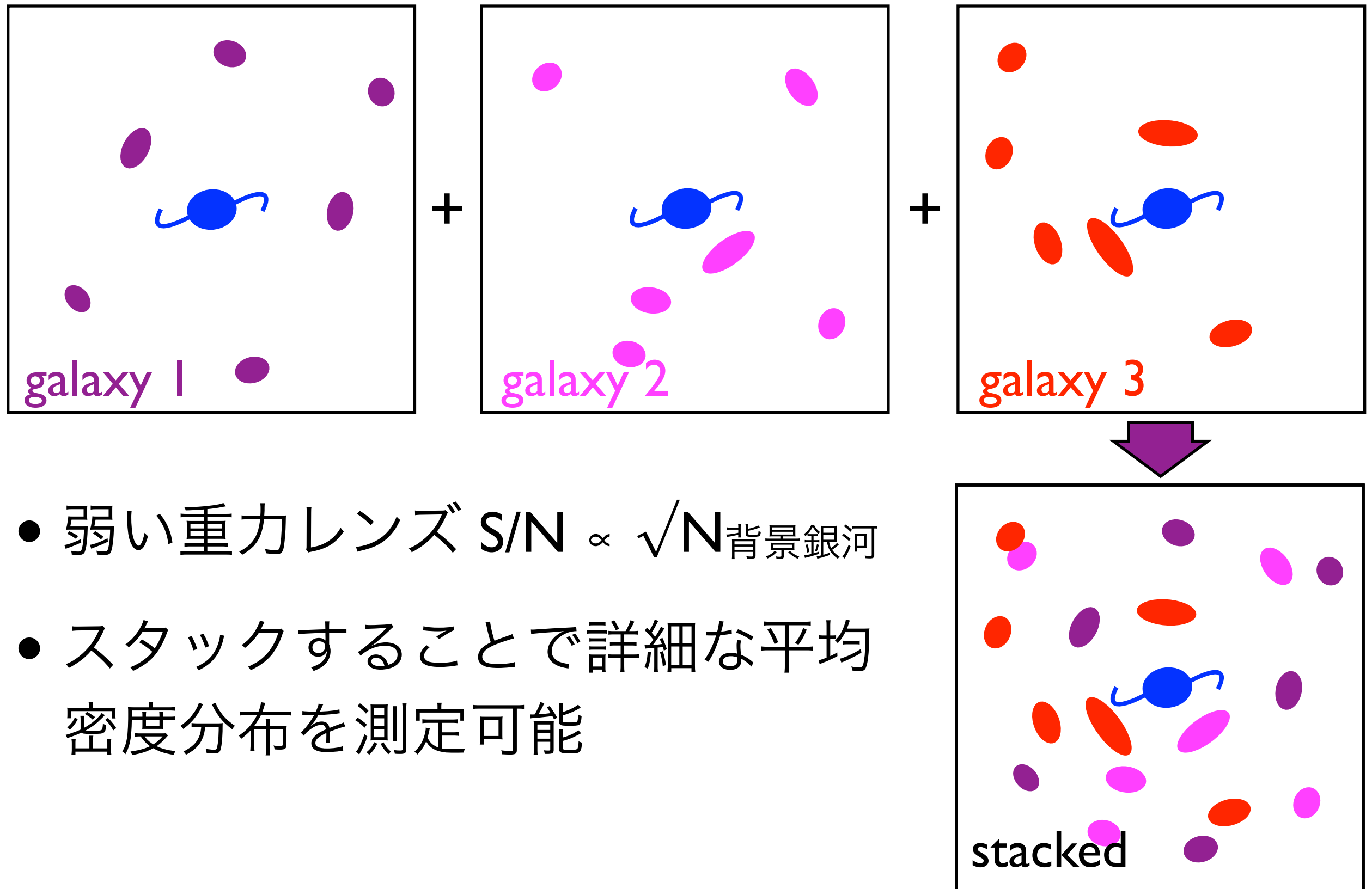
ダークハロー

銀河

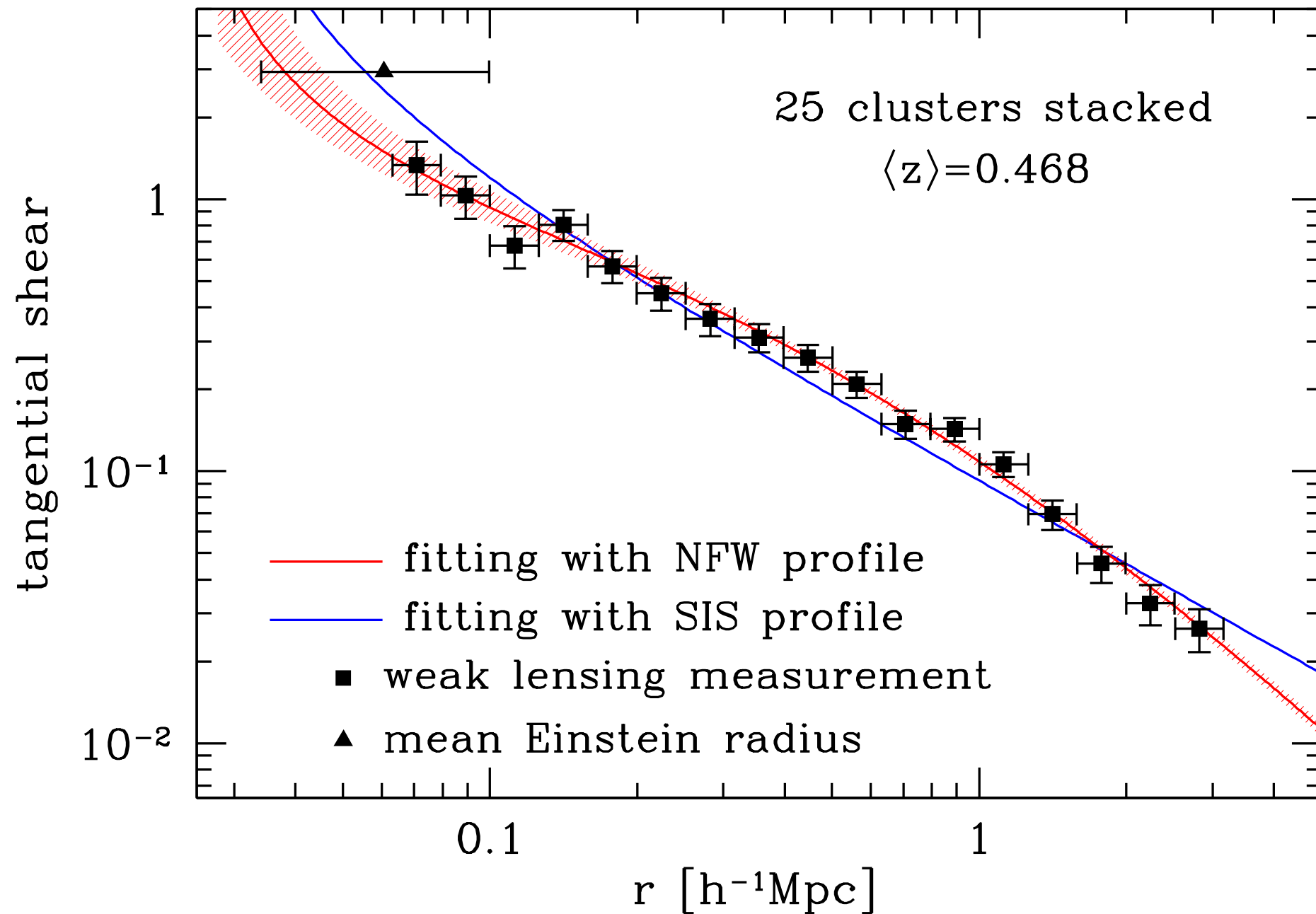
AGN/BH

- 主なゴール（の一つ） =
銀河とダークハローの対応
とその進化を理解する
- 主なアプローチ
 - クラスタリング
 - 重力レンズ

統計の威力：stacked weak lensing



統計の威力：stacked weak lensing



25個の銀河団
のスタック

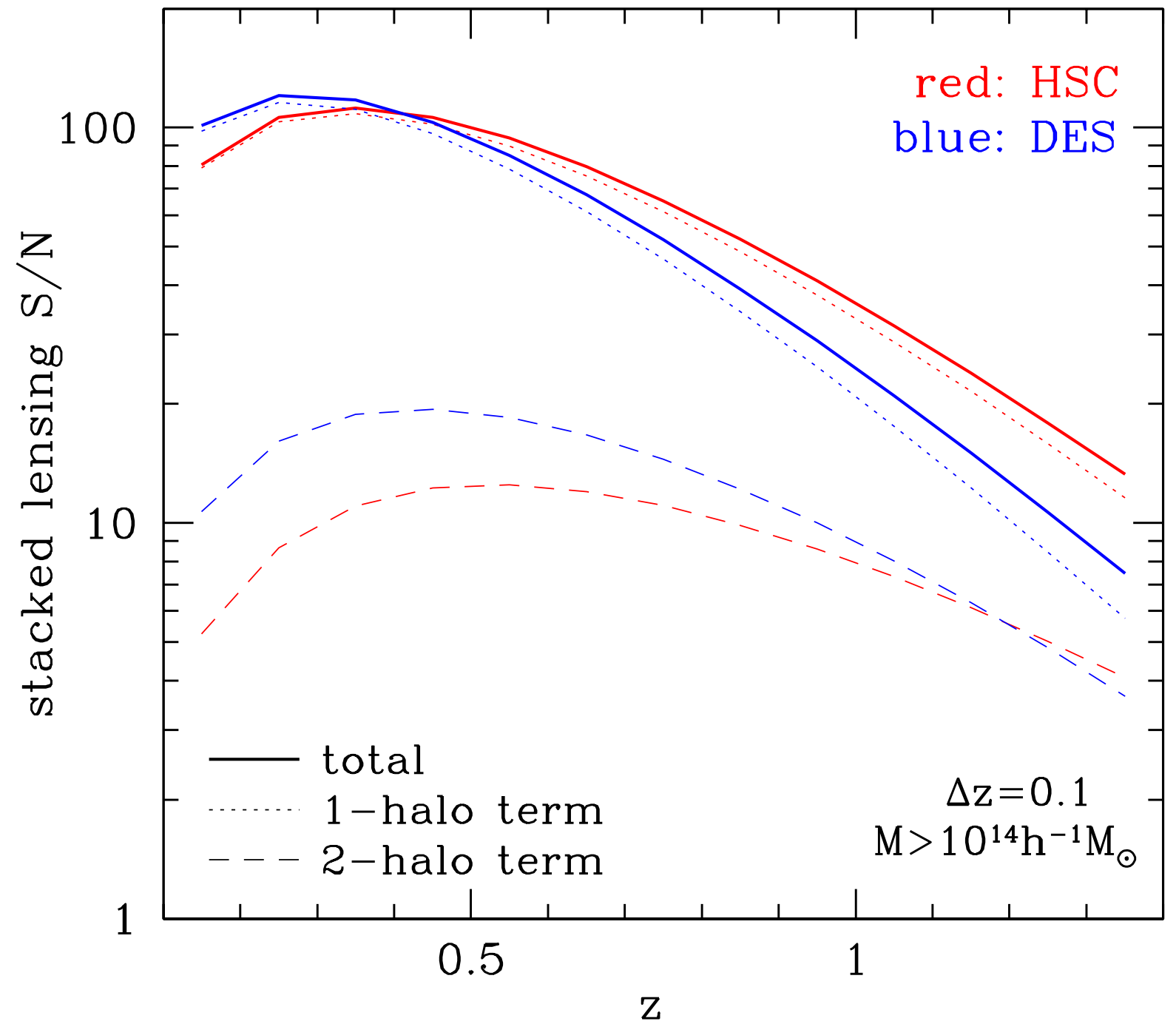
密度分布は
いわゆる

「NFW分布」
と非常によく
一致

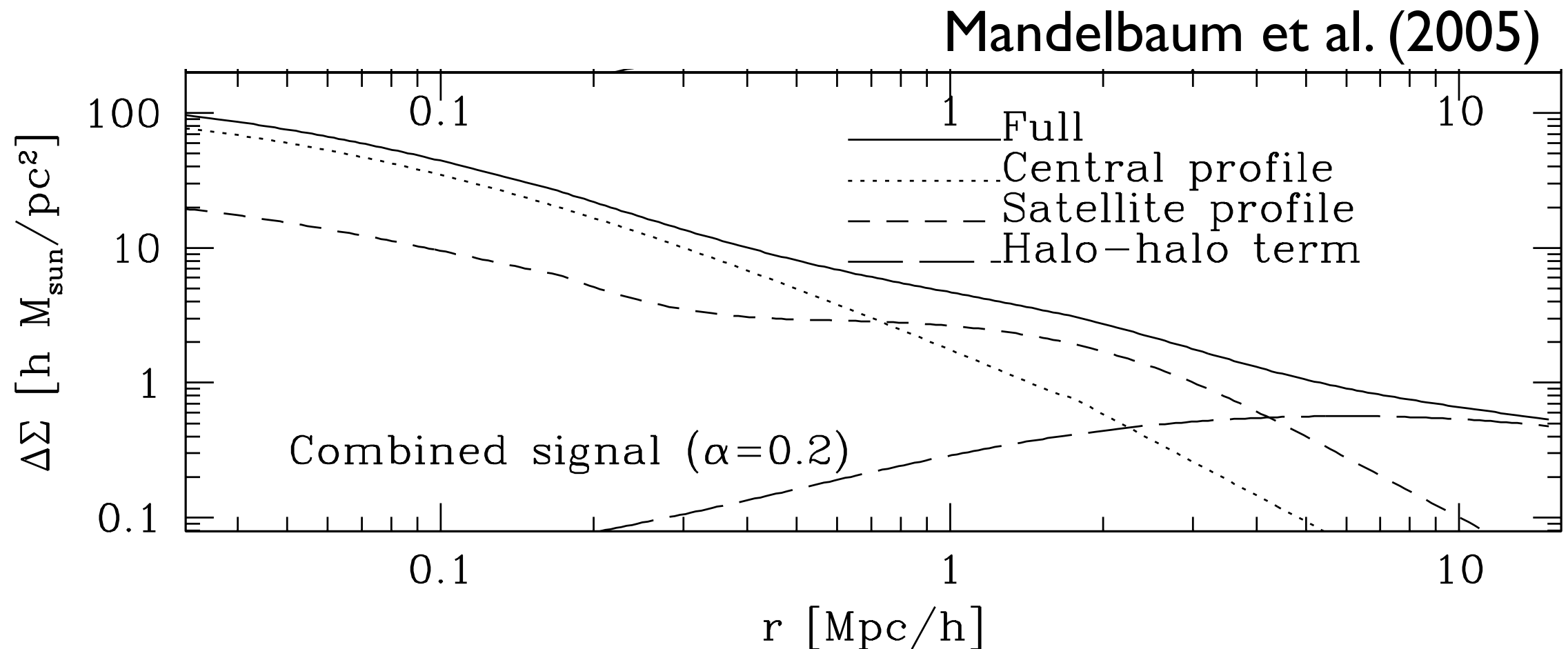
(すばる Suprime-cam の成果)

stacked weak lensing: HSC vs DES

- HSC 1400deg²
vs. DES 5000deg²
- low- z で同程度、
high- z ではむしろ
勝つ！



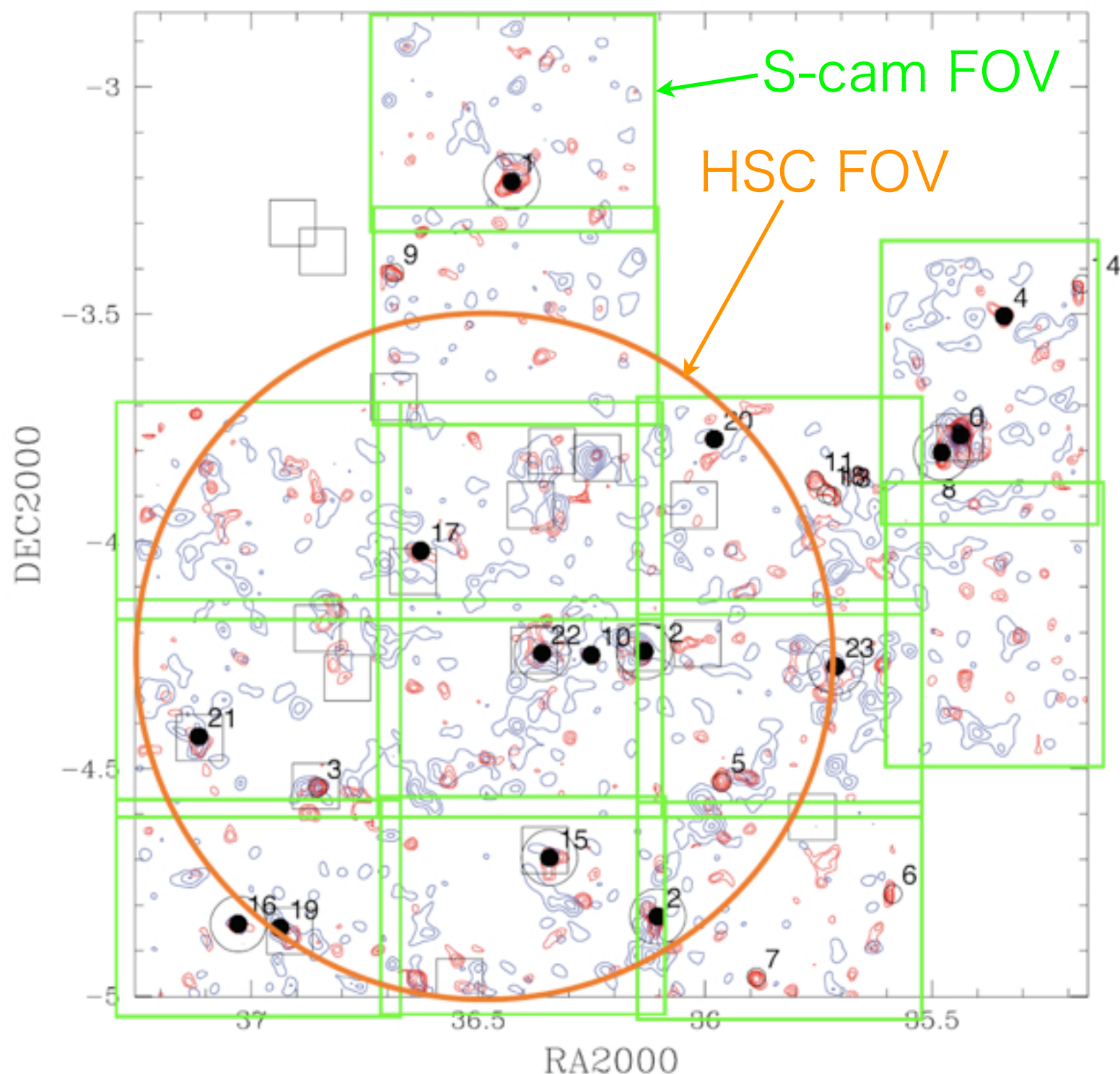
stacked galaxy-galaxy weak lensing



- ハローの質量、中心 or 衛星銀河の割合 etc
- さまざまな z 、銀河タイプのbinで調べる

(see also talk by Alexie Leauthaud)

重力レンズハロー探査

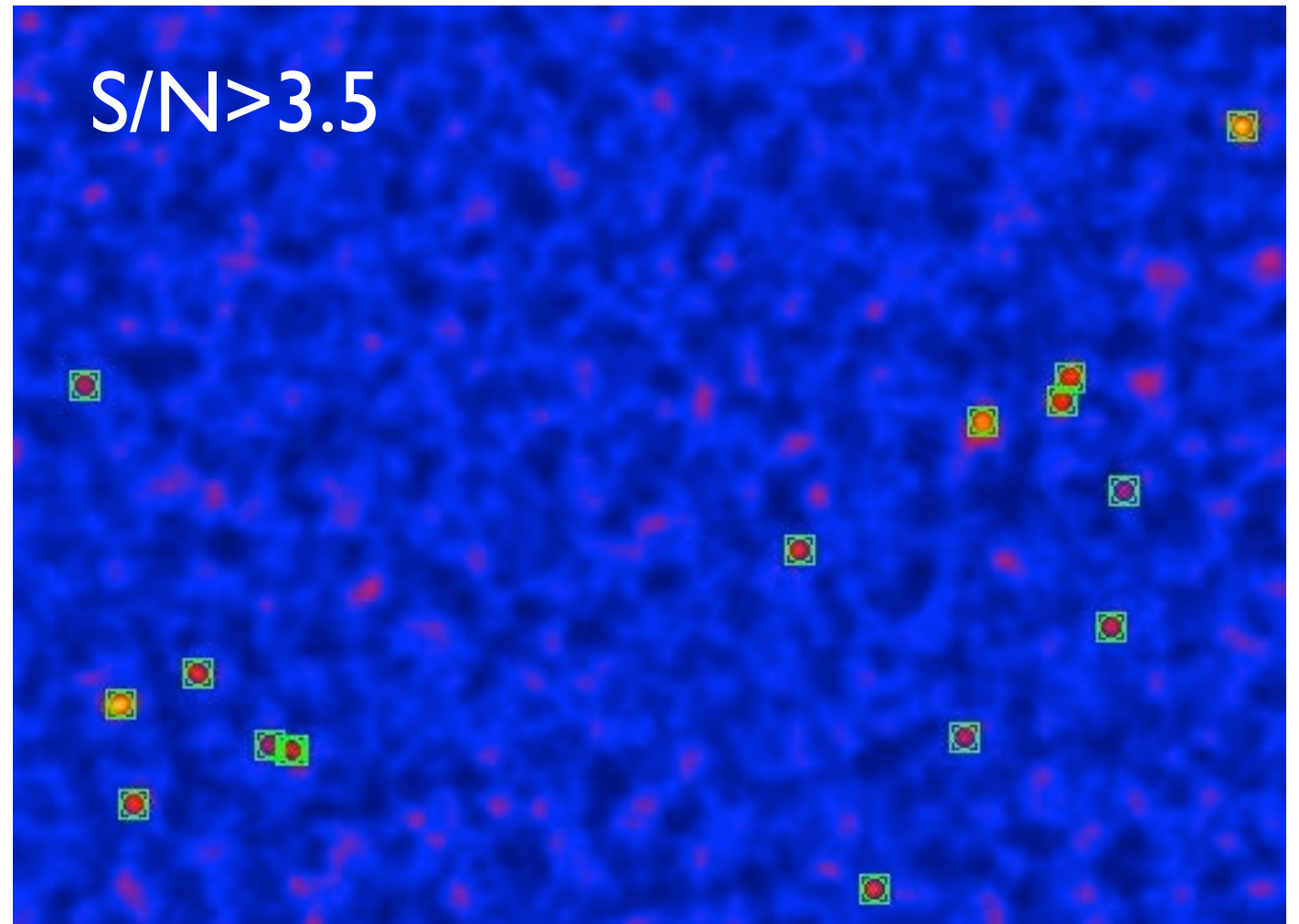


- 弱い重力レンズから構築した質量マップからハロー探索
- ダークマターと銀河(バリオン)の対応の理解に重要
- すばるSuprime-camがパイオニア的貢献 (Miyazaki et al. 2002,2007)

Miyazaki et al. (2007)

重力レンズで選ばれたハローの性質

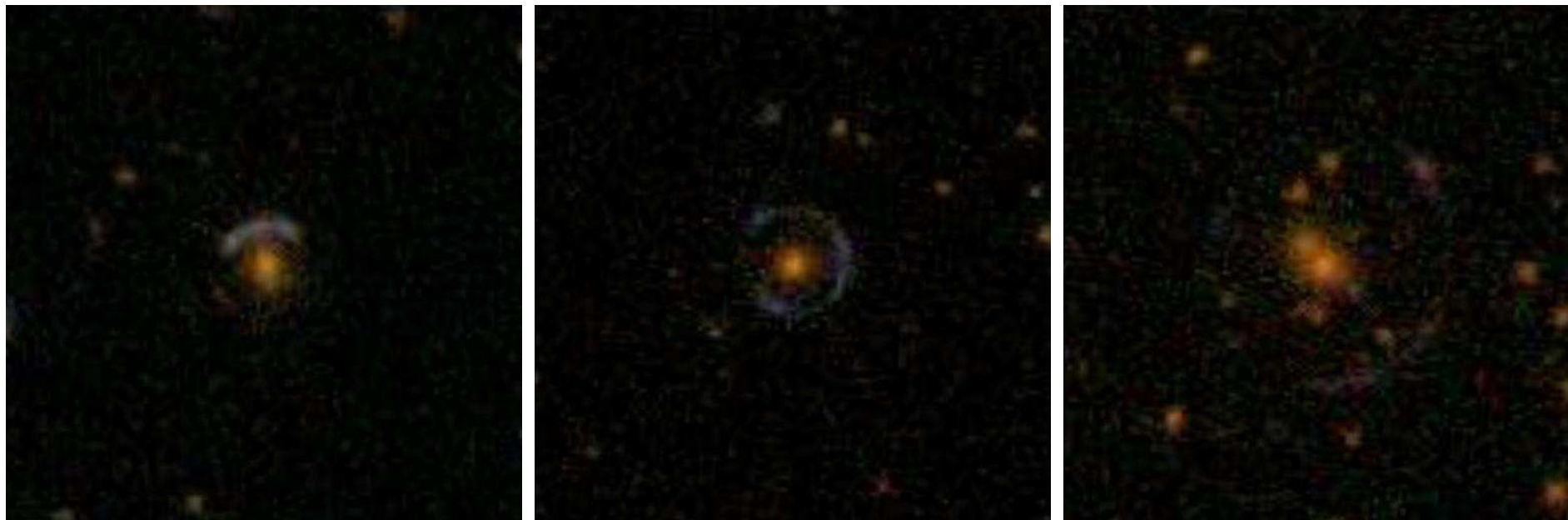
- ハロー質量と重力レンズピークの弱い相関
(ハローの個性のため)
- 向きバイアスの存在：
長軸と視線方向が揃う確率大
- 解釈に注意が必要、
しかしこれらの性質
は理論的に予言可能!



(N体シミュレーション+
レイトレーシングで得られた
重力レンズ質量密度マップ)

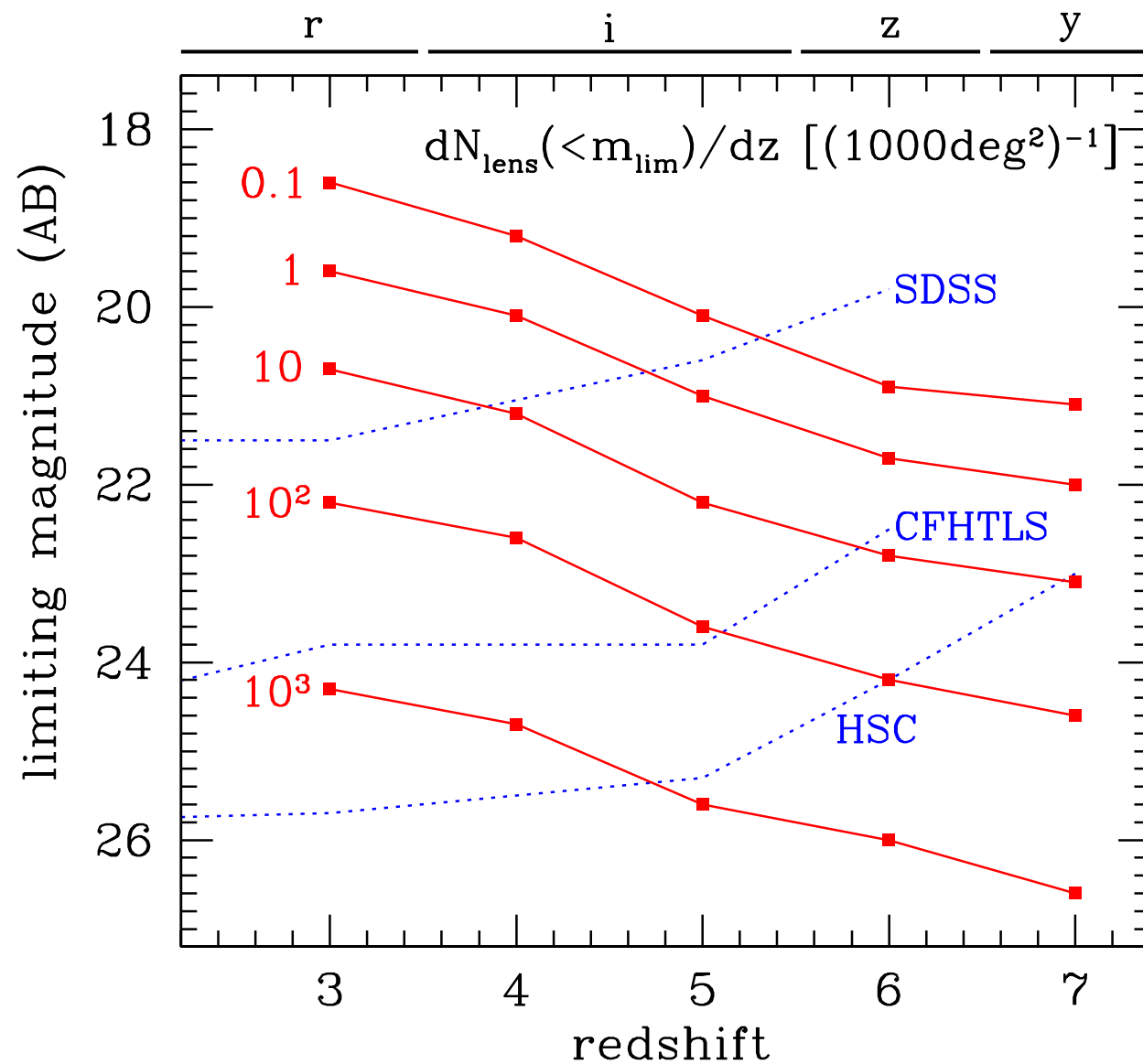
重力レンズ望遠鏡

- 重力レンズは背景銀河を増光・拡大する
- 強い重力レンズを利用した、遠方銀河の検出、高S/N分光、プロフィール測定 etc.



SDSSで発見
された遠方
銀河の強い
重力レンズ

期待される強い重力レンズ数



- $z \sim 6-7$ の遠方天体の強い重力レンズも検出可能
- 広く深いHSCサーベイはこのような「レア天体」の発見にも威力を発揮

宇宙論：次の10年

「一つのパラメータ w を決めるだけでよい」

宇宙論：次の10年

~~「一つのパラメータ w を決めるだけでよい」~~

- ダークエネルギー ($w_0, w_a, \dots$) ← 加速膨張
- 修正重力理論 ($\gamma, \eta, G_{\text{eff}}, \dots$) ← 加速膨張
- 宇宙の曲率 (Ω_K) ← インフレーション
- 原始密度ゆらぎ ($n_s, \alpha_s, r, \dots$) ← インフレーション
- 原始非ガウス性 ($f_{\text{NL}}, g_{\text{NL}}, \dots$) ← インフレーション
- ニュートリノ質量 ($\Sigma m_\nu, N_{\text{eff}}$) ← 素粒子物理

加速膨張：二つのアプローチ

幾何学的テスト

- 膨張速度 $H(z)$ またはその積分で表される距離 $d(z)$ を測定
- SNe Ia, CMB, BAO,

↑
現在の主力

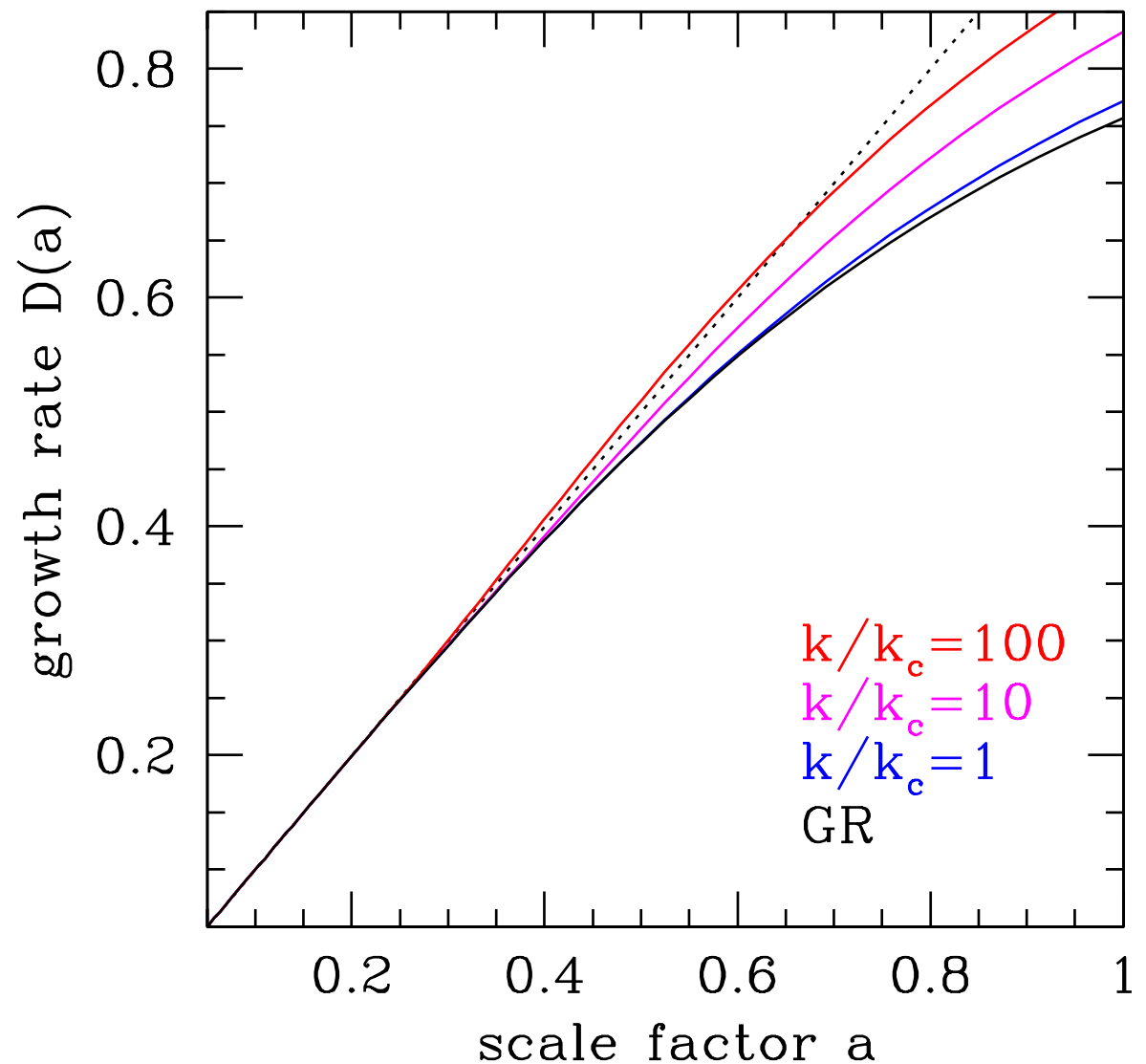
密度ゆらぎの進化

- 加速膨張は密度ゆらぎの時間進化を遅らせる
→ ゆらぎの成長速度 $D(z)$
- weak lensing, clusters,

↑
HSCにより大幅な進展

修正重力理論とゆらぎの進化

- 重力理論の変更によりダークエネルギーなしで加速膨張を説明
- 例え膨張則が同じでも一般相対論の場合とは異なるゆらぎの進化を预言する



[f(R)重力の例]

弱い重力レンズとゆらぎの進化

- 弱い重力レンズは密度ゆらぎを直接測る

視線方向の積分

$$C^{\kappa\kappa}(\ell) = \int d\chi W_{\text{GL}}^2(\chi) \frac{1}{f_K^2(\chi)} P(k = \ell/f_K(\chi))$$

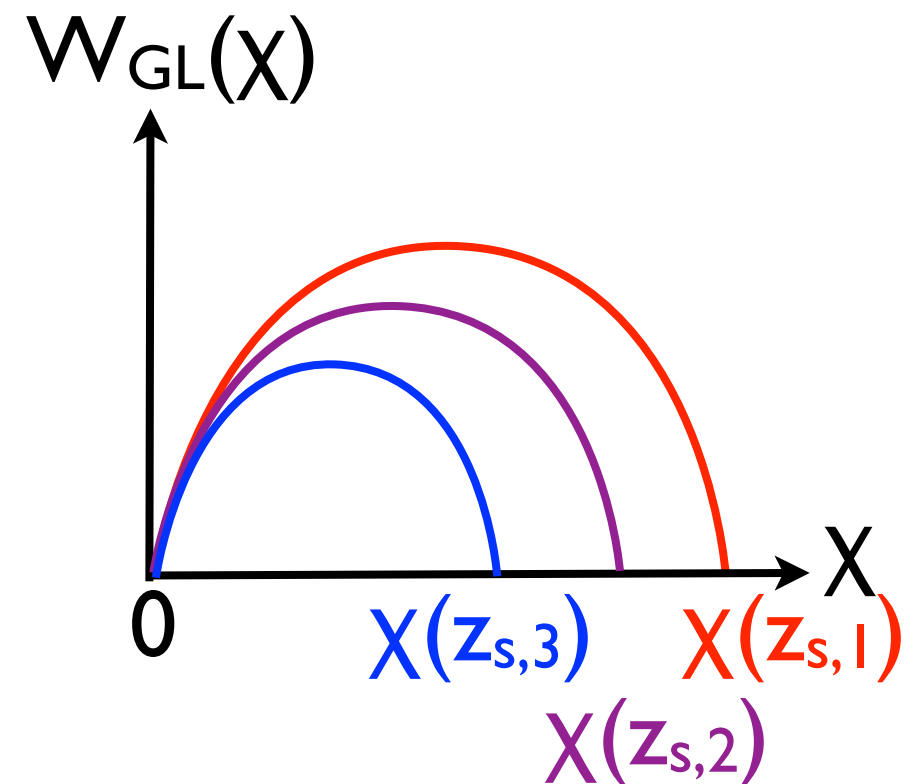
重力レンズ角度
パワースペクトル

密度ゆらぎ
パワースペクトル

- しかし視線方向に積分したゆらぎの総量、
ゆらぎの進化を測るには工夫が必要

方法 1 : cosmic shear tomography

- 異なる赤方偏移 z_s の重力レンズ相関関数を比較
- 異なる z_s の重力レンズは違う z の範囲の密度分布を測る (e.g., Hu 1999)
- さまざまな系統誤差をどう抑えるかが課題
(intrinsic alignment, photo- z , residual additive errors in shapes, ...)



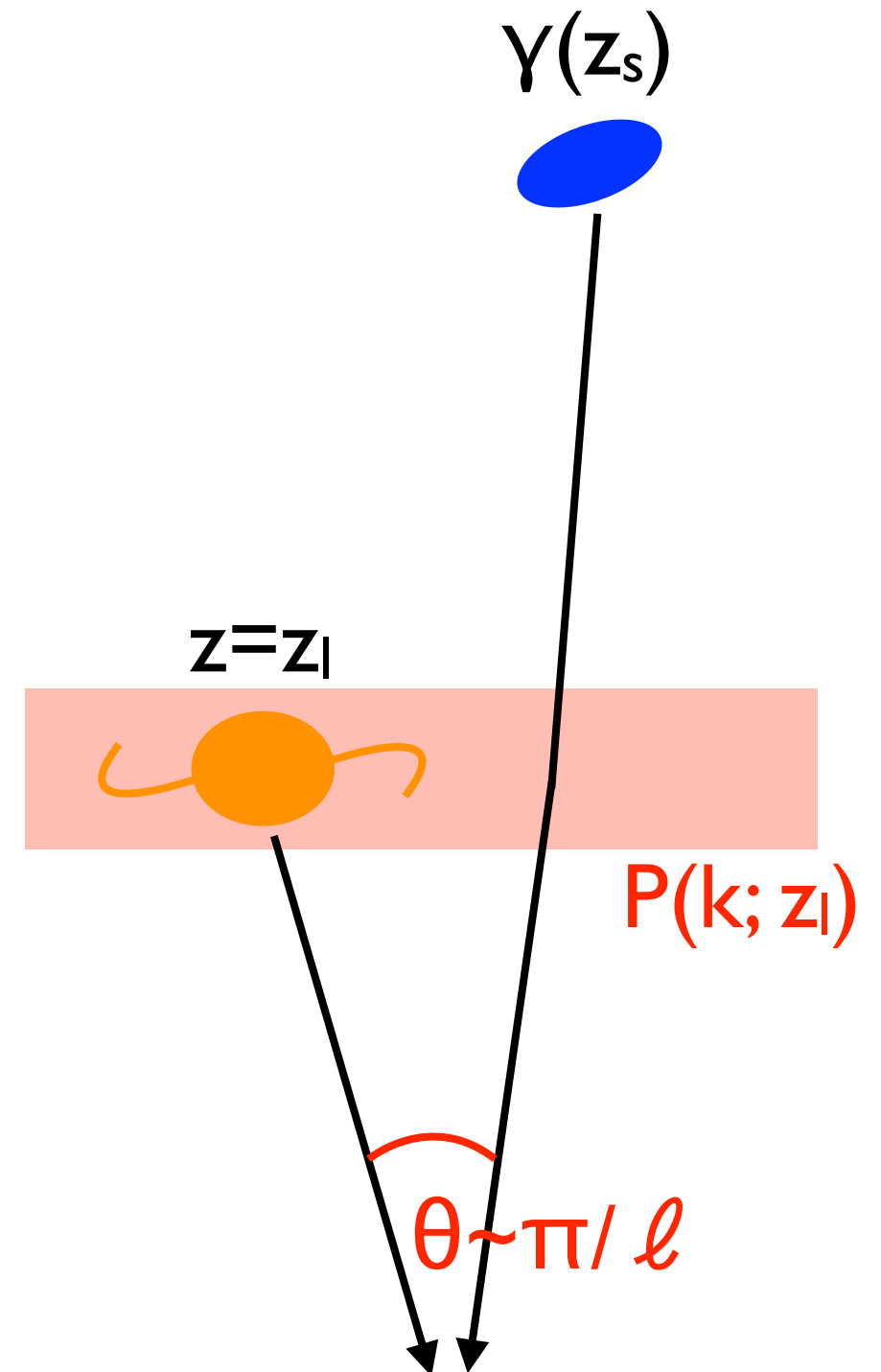
方法2：cross-correlation

- 重力レンズ信号と手前の $z=z_l$ の天体分布とのcross-correlation
- $z=z_l$ の密度ゆらぎの情報を引き出すことができる

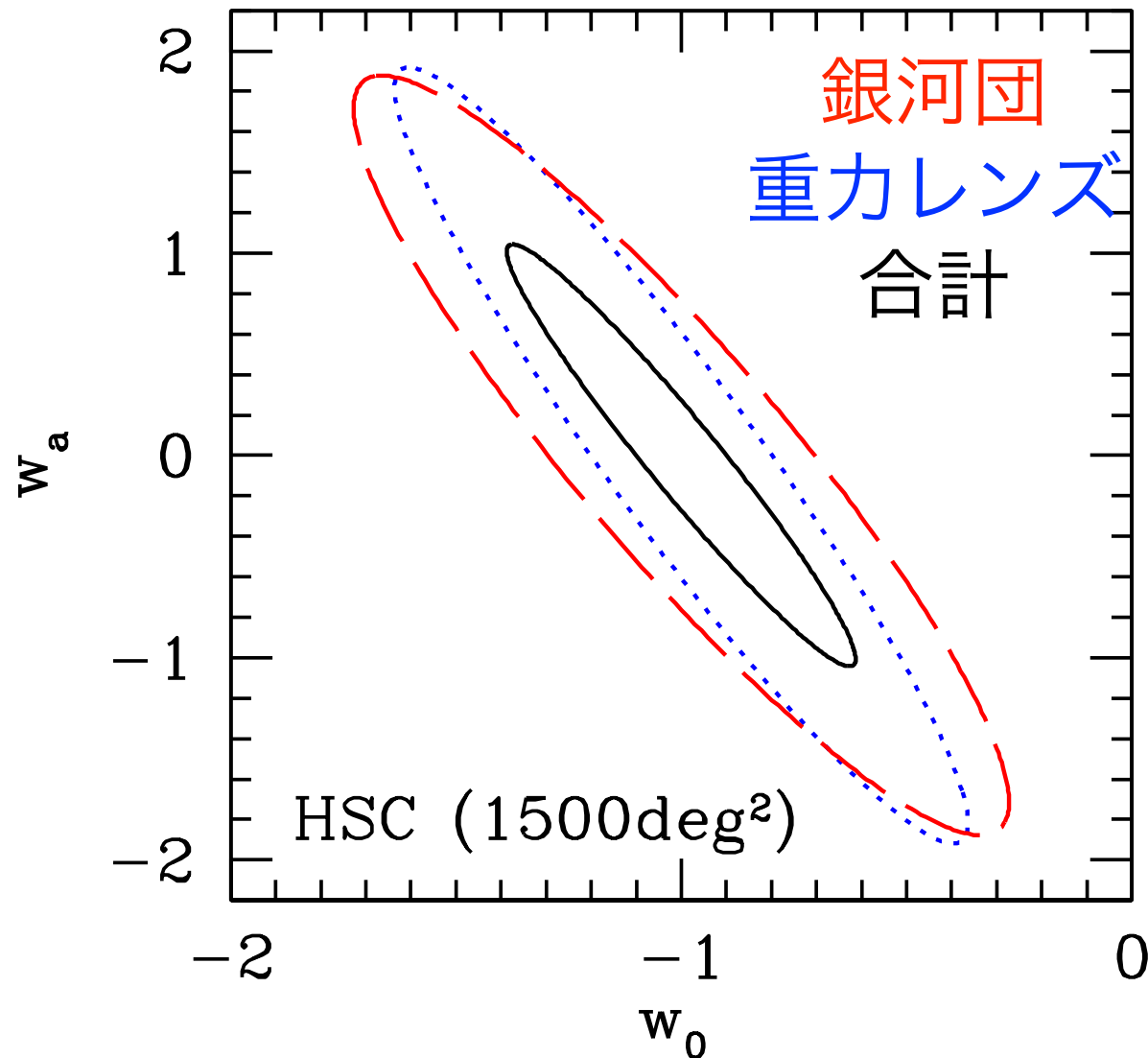
$$C^{\delta\gamma}(\ell) \propto P(k = \ell / f_K(\chi_l); z_l)$$

[大角度のcross-correlation]

- 系統誤差に比較的強い



銀河団-重力レンズ cross-correlation



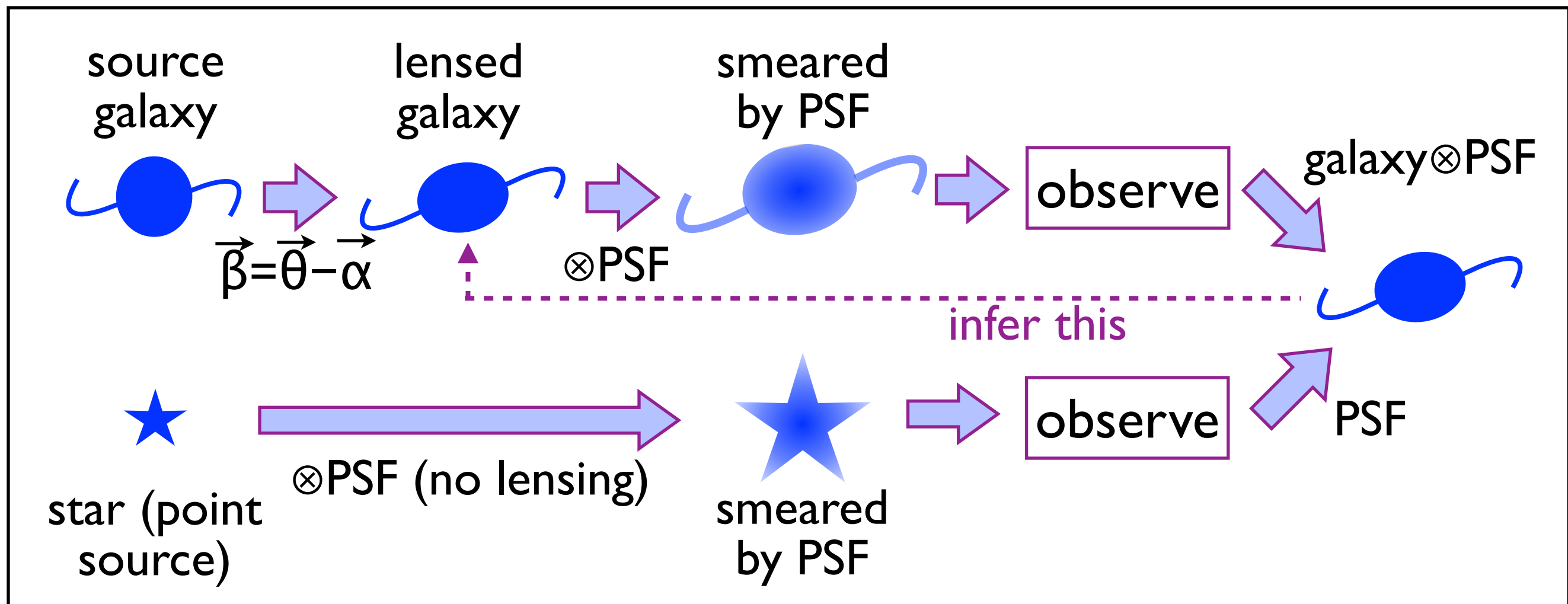
ダークエネルギー状態方程式

$$w(a) = w_0 + (1-a)w_a$$

- cluster-weak lensing cross-correlation = stacked weak lensing
- さまざまな系統誤差を考慮、marginalized
- 期待される制限は系統誤差を無視した cosmic shear からの制限とほぼ同じ

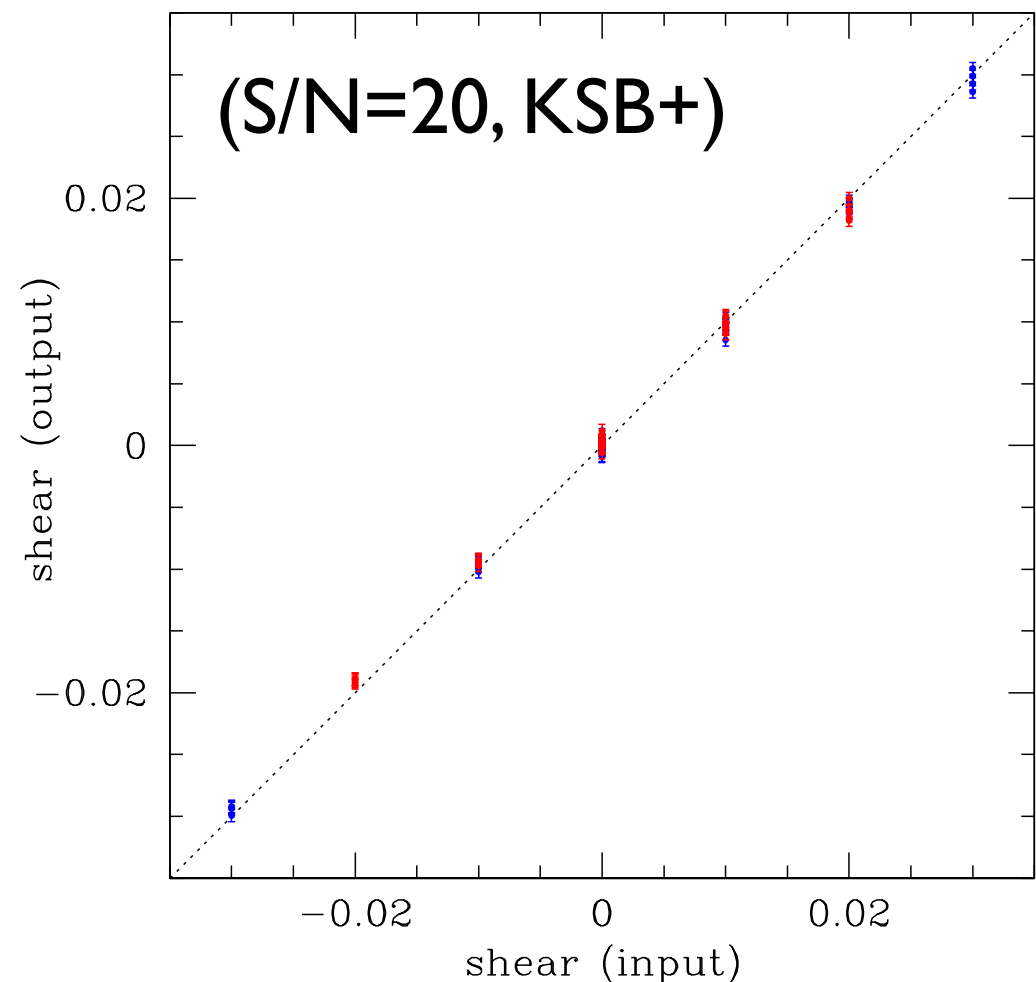
弱い重力レンズの測定

- 弱い重力レンズ信号の正確な測定が鍵
- challenging、しかし重力レンズ効果は完全にシミュレーションできるので精度の検証可能



弱い重力レンズ測定方法のテスト

- HST画像をもとに重力レンズを受けた銀河のHSC画像を作成 (SHERA; Mandelbaum et al. 2012)
- HSC-WLグループの様々な測定方法をテスト
 - KSB+ (大栗)
 - elliptical G-L (宮武)
 - Spergel (峯尾+日影)
 - re-Gauss. (Mandelbaum)
 - e-HOLICs (大倉)
 - Fourier domain (片山)



まとめ

- 重力レンズはHSC製作の動機でもあり、HSCサーベイの主要なサイエンスケースである
- 重力レンズは「目的」ではなく「手段」である
(どのように活用するか、の視点)
- 銀河 (近傍or遠方)、銀河団、AGN、宇宙論など
広範な応用が期待される