観測的相対論効果が引き起こす大規模構造の双極子的非等方性とその検出可能性

嵯峨承平

(パリ天文台)

Collaborators:

Atsushi Taruya(基研), Yann Rasera(パリ天文台), Michel-Andrès Breton(ICE,IEEC)

目次

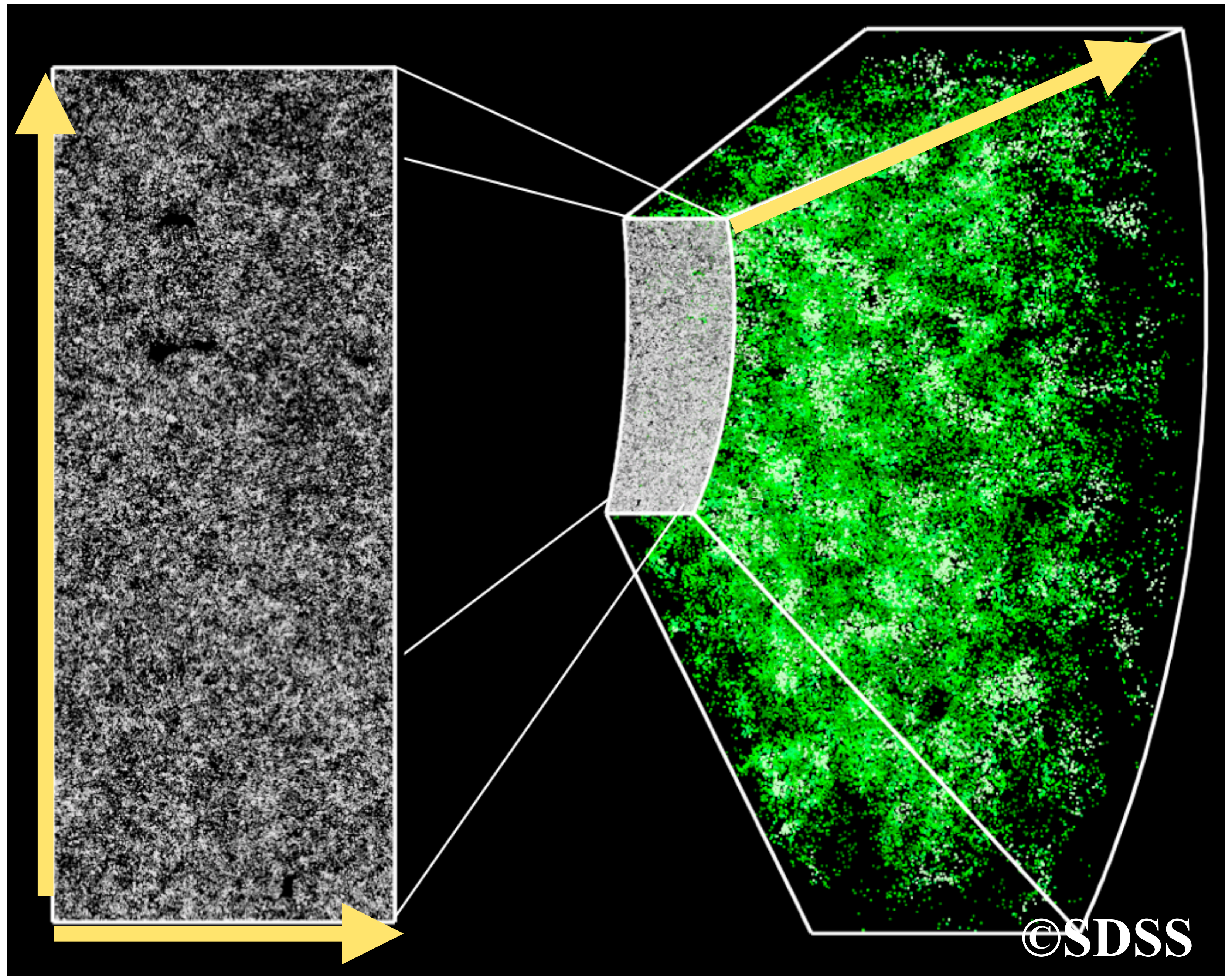
References:

M-A.Breton, Y.Rasera, A.Taruya, O.Lacombe, **SS** (1803.04294)
A.Taruya, **SS**, M-A.Breton, Y.Rasera, T.Fujita (1908.03854)
SS, A.Taruya, M-A.Breton, Y.Rasera (2004.03772)
SS, A.Taruya, Y.Rasera, M-A.Breton (2109.06012)
SS, A.Taruya, Y.Rasera, M-A.Breton (in prep)

1.1. 銀河赤方偏移サーベイ

- 銀河赤方偏移サーベイ

赤方偏移: $z = \dfrac{\lambda_{\mathrm{obs}} - \lambda_{em}}{\lambda_{\mathrm{em}}}$　　天球面上の位置: (θ, ϕ)



- 観測される赤方偏移

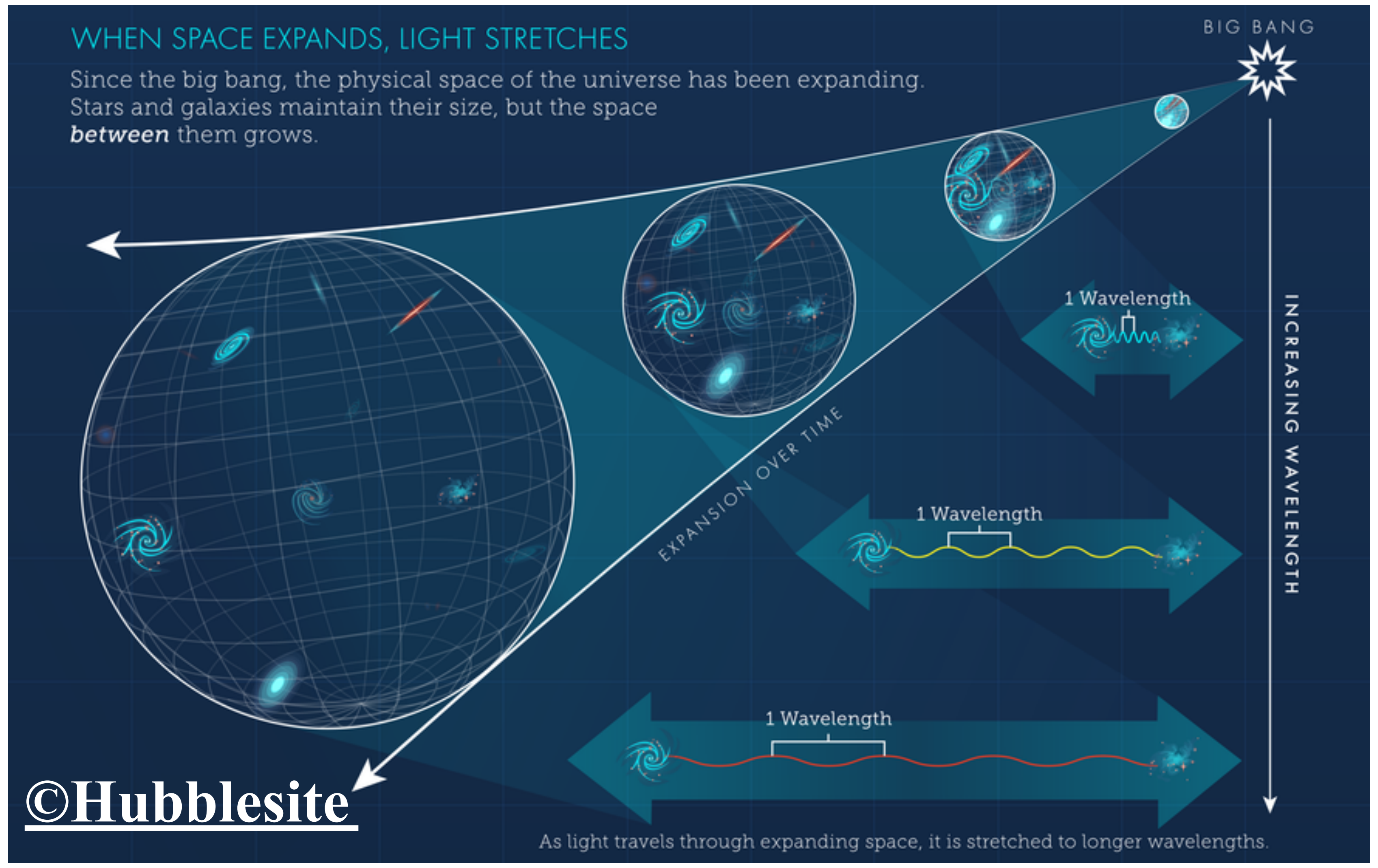
宇宙論的赤方偏移 (ハッブル=ルメートル則)　+ 銀河の特異速度によるドップラー効果

- 銀河赤方偏移サーベイで描かれる宇宙の3次元地図

赤方偏移の情報から得られる銀河の位置 ≠ 実際の位置

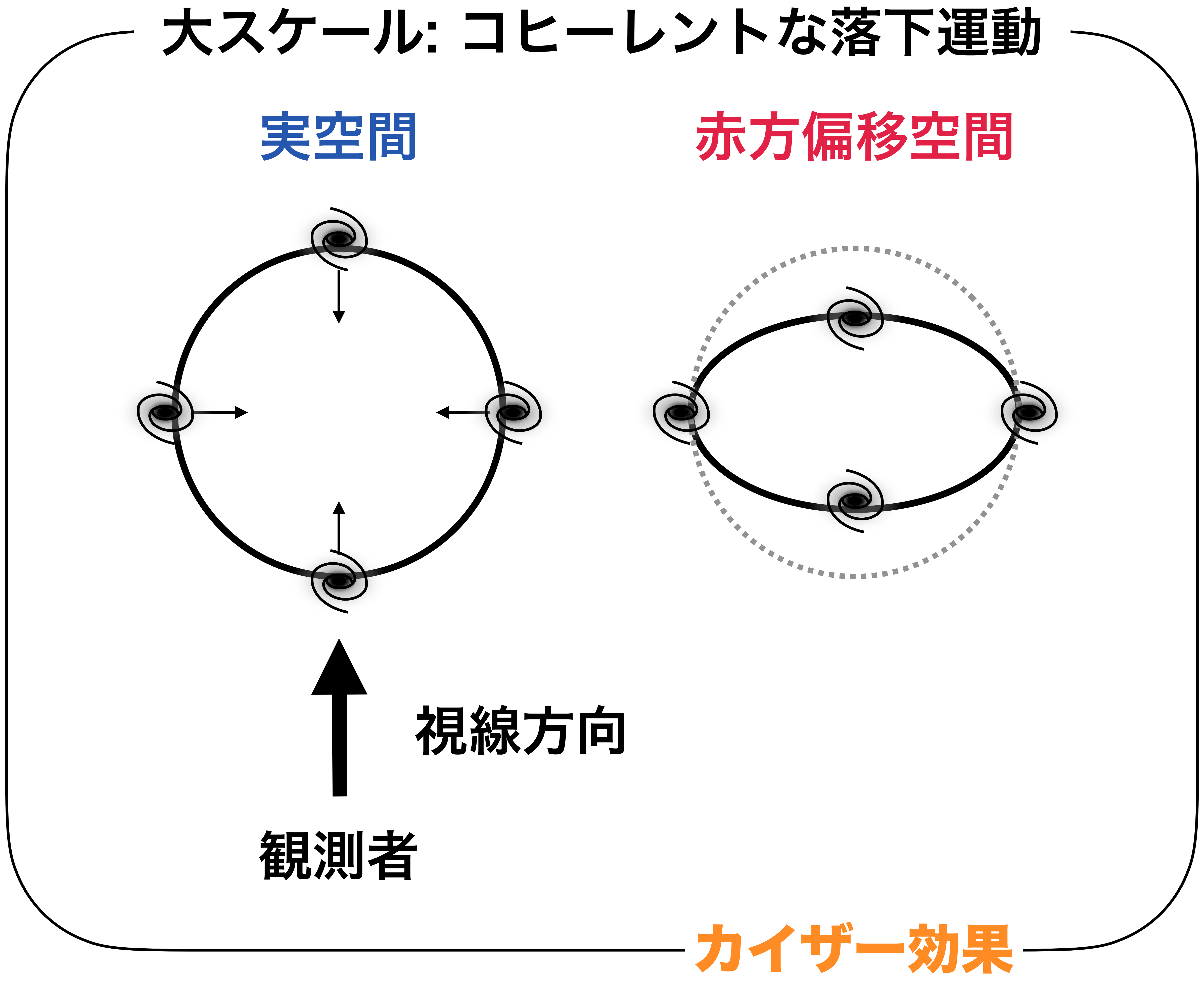
観測する銀河の分布は歪んでみえる

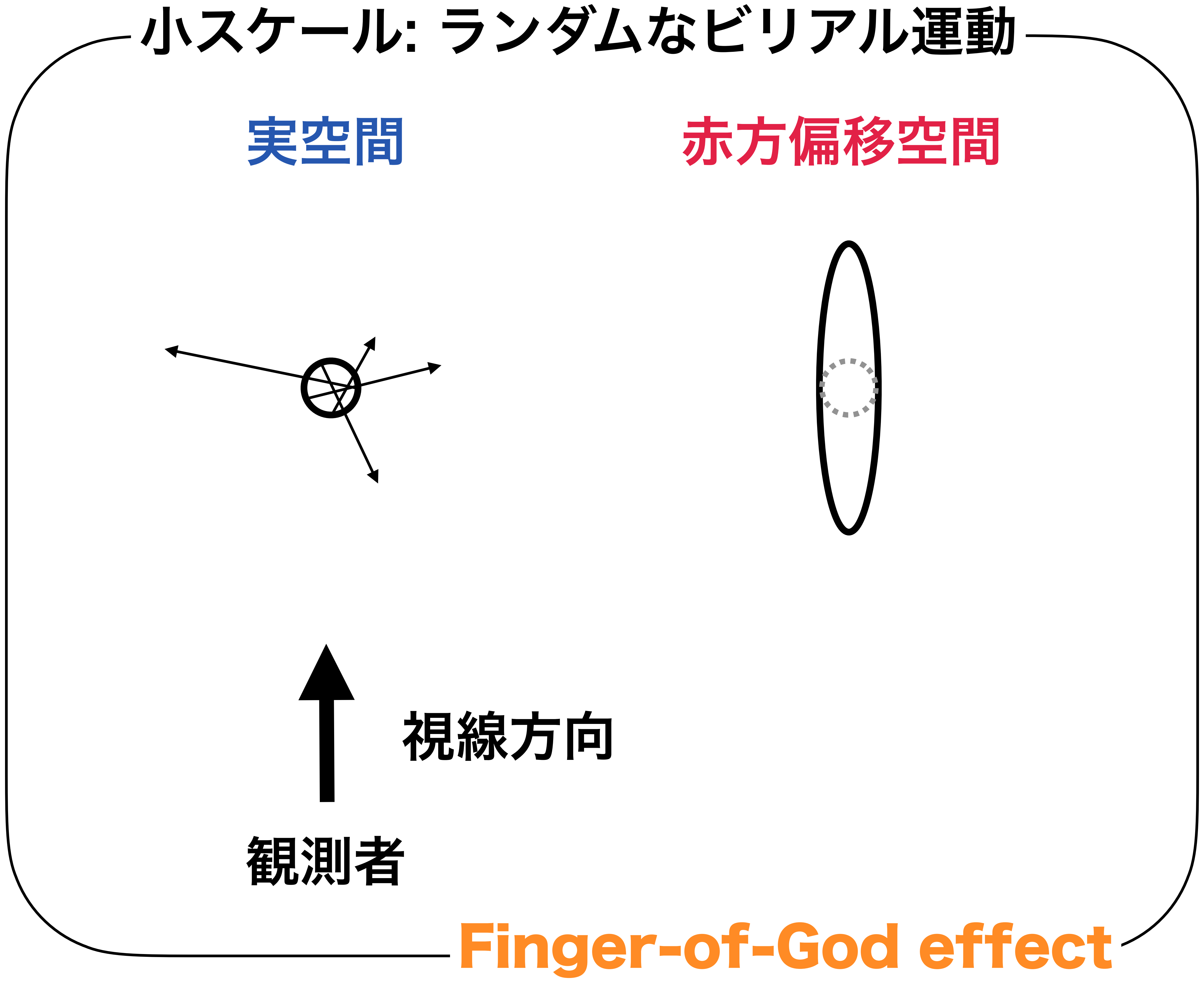
➡ 赤方偏移空間歪み(Redshift space distortions, RSD)



1.2. 赤方偏移空間ゆがみ(RSD)

主要な歪みの原因: 銀河の特異速度によるドップラー効果





重力によって引き起こされる特異速度が非等方性の強さに関係 ➡ 重力の宇宙論的なテスト

1.3. 非等方性の定量化

2点相関関数　$\xi^{(\mathrm{s})}(s, \mu) = \left\langle \delta^{(\mathrm{s})}(\boldsymbol{s}_1)\delta^{(\mathrm{s})}(\boldsymbol{s}_2) \right\rangle$　~ 銀河の個数カウント

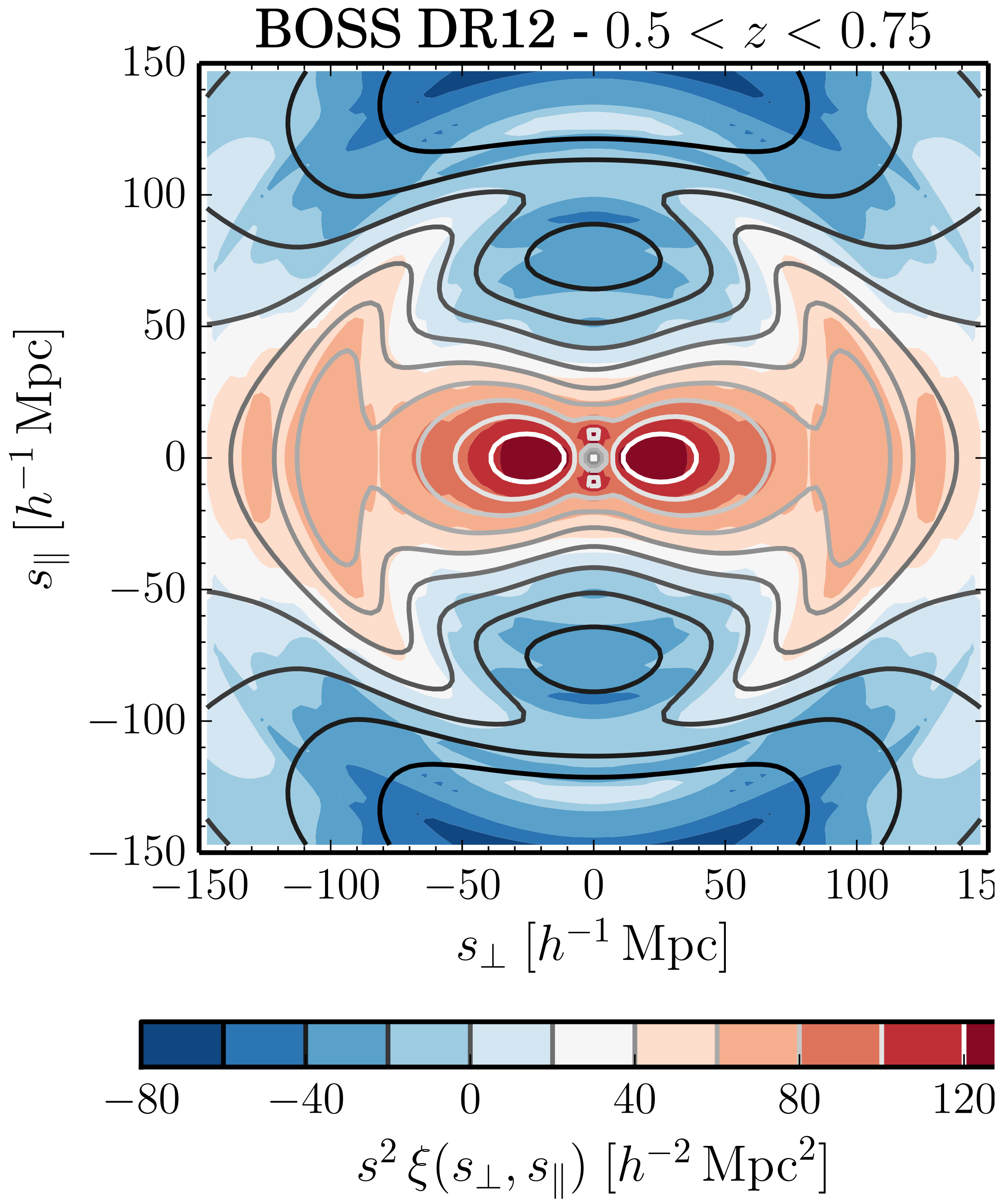
等方性が破れ、2点間の距離 s と、視線方向 $\hat{z}$ からの角度 $\mu = \hat{s}\cdot\hat{z}$ で表現される

多重極展開

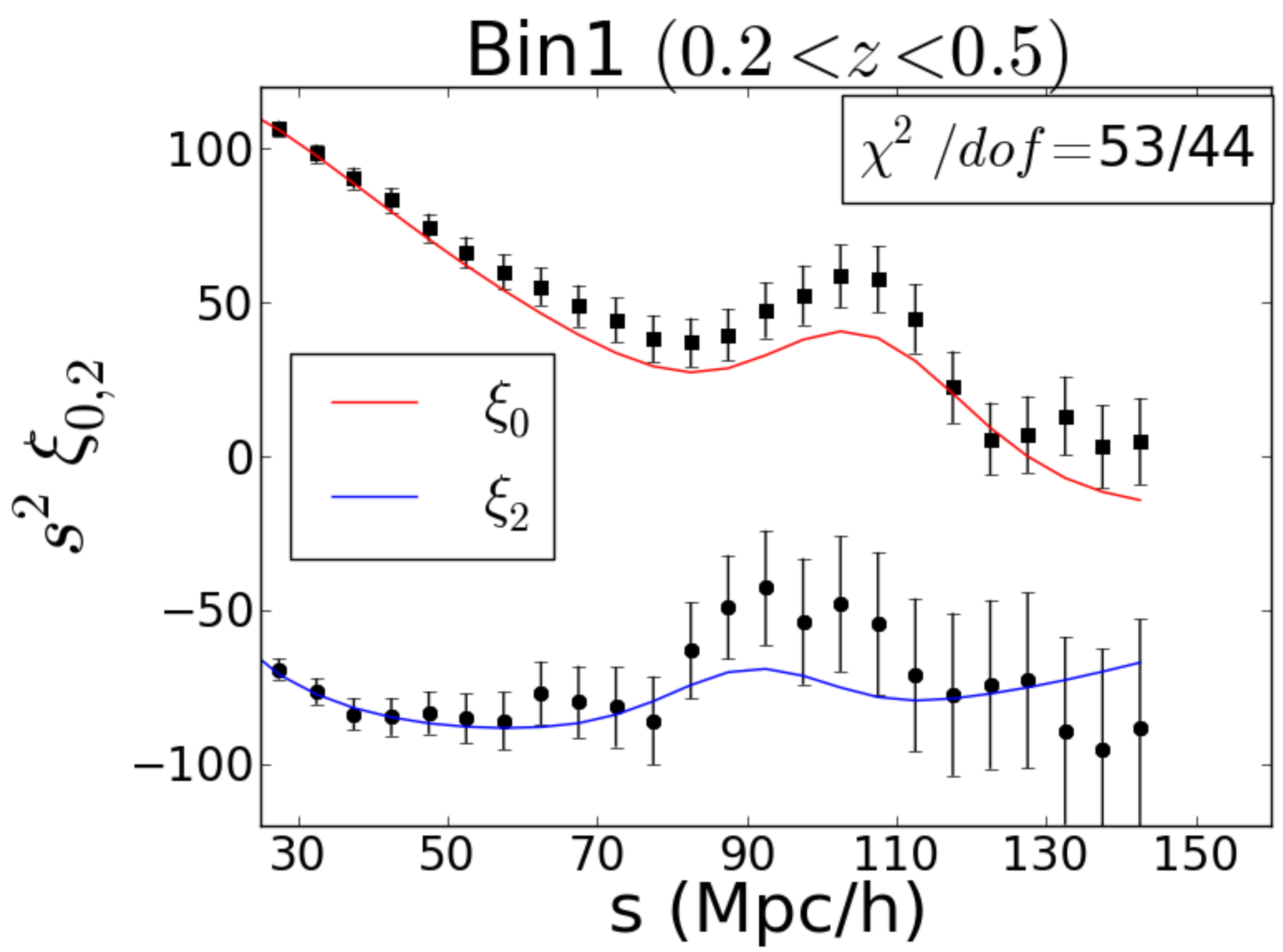
$$\xi_\ell(s) = \frac{2\ell+1}{2}\int_{-1}^{1} \mathrm{d}\mu \; \xi^{(\mathrm{s})}(s, \mu)\mathscr{P}_\ell(\mu)$$

($\mathscr{P}_\ell(\mu)$: Legendre polynomial)

観測(BOSS DR12)



S.Alam et al. [1607.03155]



S.Satpathy et al. [1607.03148]

1.4. RSDによる重力のテスト

赤方偏移空間と実空間の間の関係

$$\boldsymbol{s} = \boldsymbol{r} + \frac{1+z}{H(z)}\left(\boldsymbol{v}\cdot\hat{z}\right)\hat{z}$$ **(特殊相対論, $v/c \ll 1$),** **$\hat{z}$: 視線方向ベクトル**

N. Kaiser (1987)

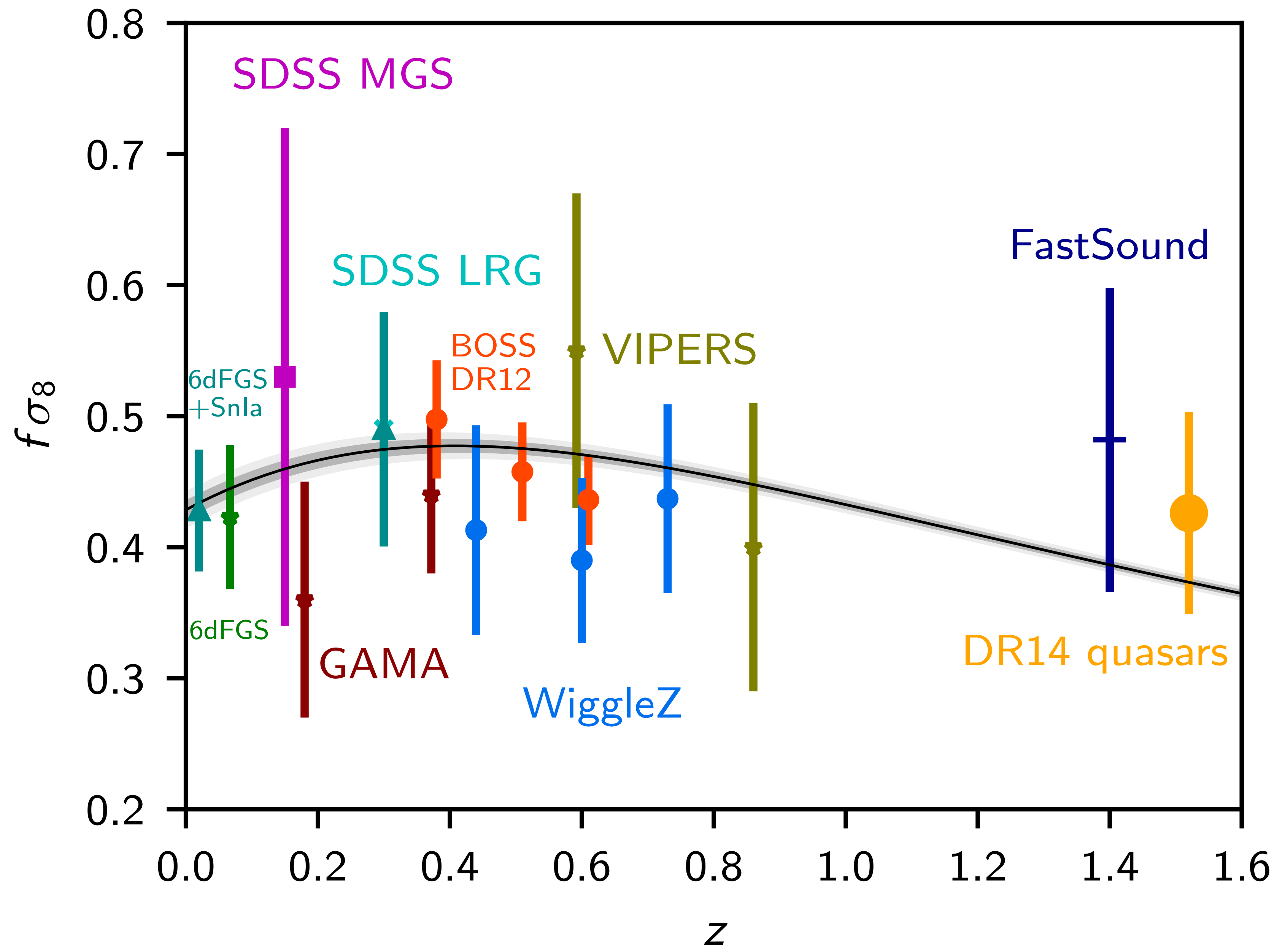
連続の式(線形)：$\dot{\delta}_{\rm L} + \frac{1}{a}\nabla\cdot\boldsymbol{v} \simeq 0$

赤方偏移空間と実空間の間の数の保存：$\left(1+\delta^{(\rm s)}(\boldsymbol{s})\right)\mathrm{d}^3s = \left(1+\delta(\boldsymbol{r})\right)\mathrm{d}^3r$

カイザー公式

$$\delta^{(\rm s)}(\boldsymbol{k}) = \left(b + f(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{z})^2\right)\delta_{\rm L}(\boldsymbol{k}) \qquad f \equiv \frac{\mathrm{d}\ln\delta_{\rm L}}{\mathrm{d}\ln a}$$ **：線形成長率**

Planck 2018 VI [1807.06209]



線形成長率 f は重力理論に依存 (ΛCDM：$f \approx \left(\Omega_{\rm m}(a)\right)^{0.55}$)

目次

2.1. 観測的な相対論効果

観測される赤方偏移

宇宙論的赤方偏移 (ハッブル=ルメートル則) + 銀河の特異速度によるドップラー効果

他の特殊・一般相対論的効果も観測される赤方偏移に影響を与える

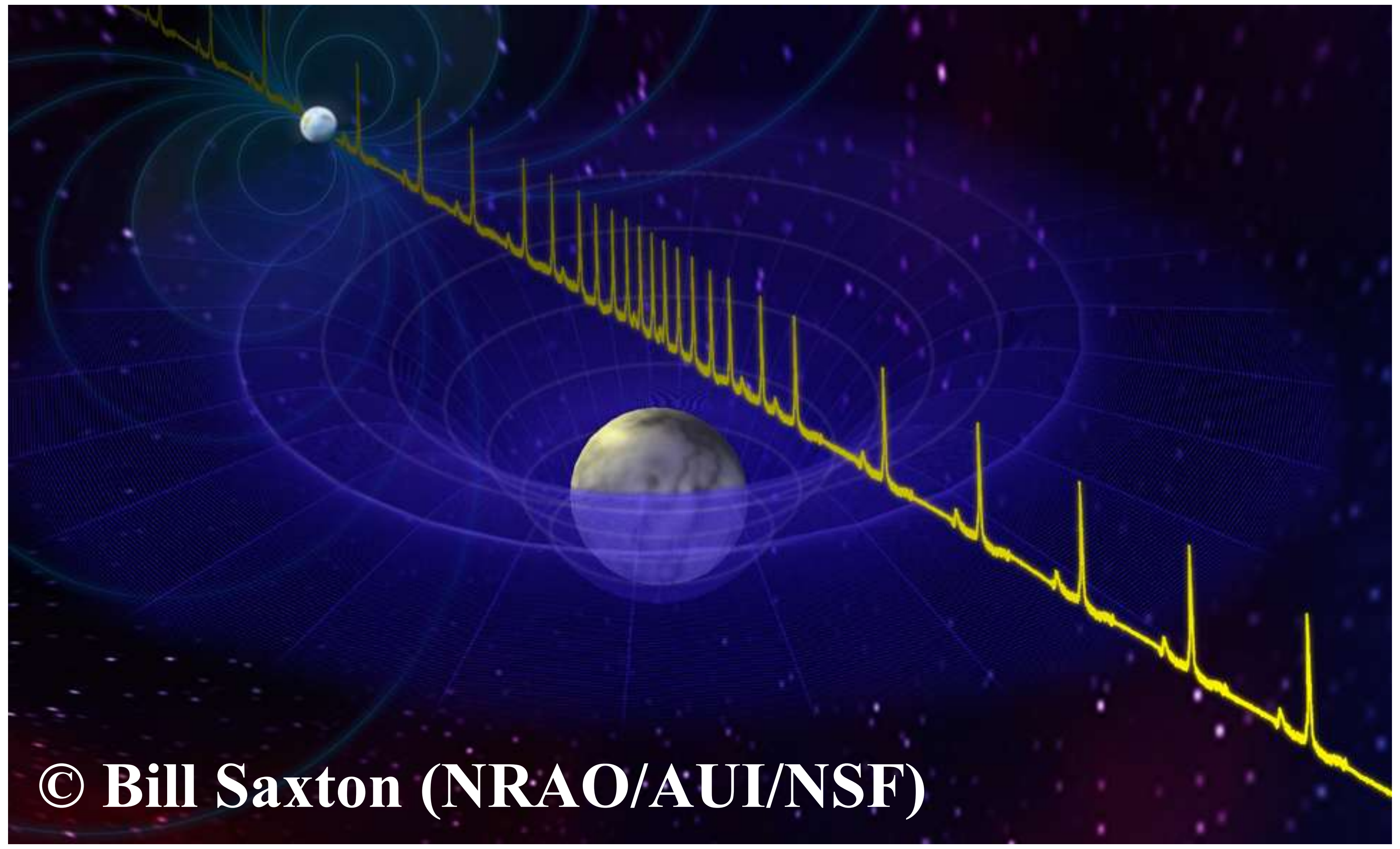
+ 重力赤方偏移 (ザックス=ヴォルフェ効果)

+ 積分ザックス=ヴォルフェ効果

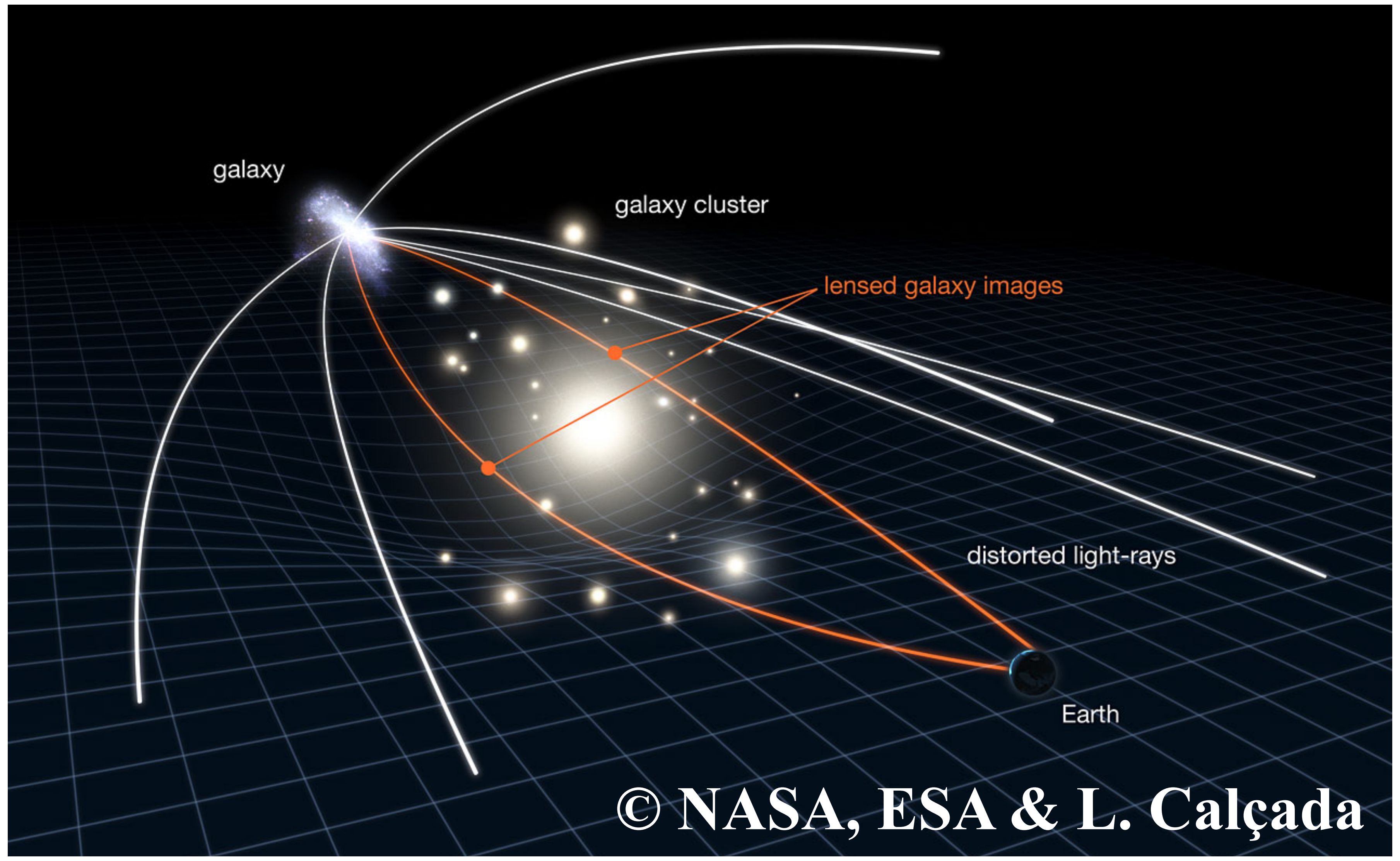
+ シャピロー時間遅延効果

+ 重力レンズ効果

+ ...



© Bill Saxton (NRAO/AUI/NSF)



© NASA, ESA & L. Calçada

2.2. どのような痕跡がRSDに残るか①

A.Challinor and A.Lewis [1105.5292]
C.Bonvin and R.Durrer [1105.5280]
J.Yoo [1409.3223], and many works

そのために...

FLRW計量 + 摂動

$$\mathrm{d}s^2 = \left[-(1+2\Phi)\mathrm{d}t^2 + a^2(1-2\Psi)\mathrm{d}x^2\right]$$

測地線方程式

$$\frac{\mathrm{d}k^\mu}{\mathrm{d}\lambda} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta}k^\alpha k^\beta = 0$$

観測される赤方偏移

$$1+z = \frac{(k_\mu u^\mu)_\mathrm{S}}{(k_\mu u^\mu)_\mathrm{O}}$$

赤方偏移空間と実空間の間の関係

(弱場近似)

$$\boldsymbol{s} = \boldsymbol{r} + \frac{1+z}{H}(\boldsymbol{v}\cdot\hat{\boldsymbol{r}})\hat{\boldsymbol{r}} \boxed{+\frac{1+z}{H}\left(-\Phi + \frac{1}{2}v^2 - \int_t^{t_0}\left(\dot{\Phi}+\dot{\Psi}\right)\mathrm{d}t'\right)\hat{\boldsymbol{r}} - \int_0^\chi (\Psi+\Psi)\mathrm{d}\chi'\,\hat{\boldsymbol{r}} - \int_0^\chi (\chi-\chi')\nabla_\perp(\Phi+\Psi)\mathrm{d}\chi'}$$

赤方偏移空間の密度ゆらぎ(線形), c.f. カイザー公式

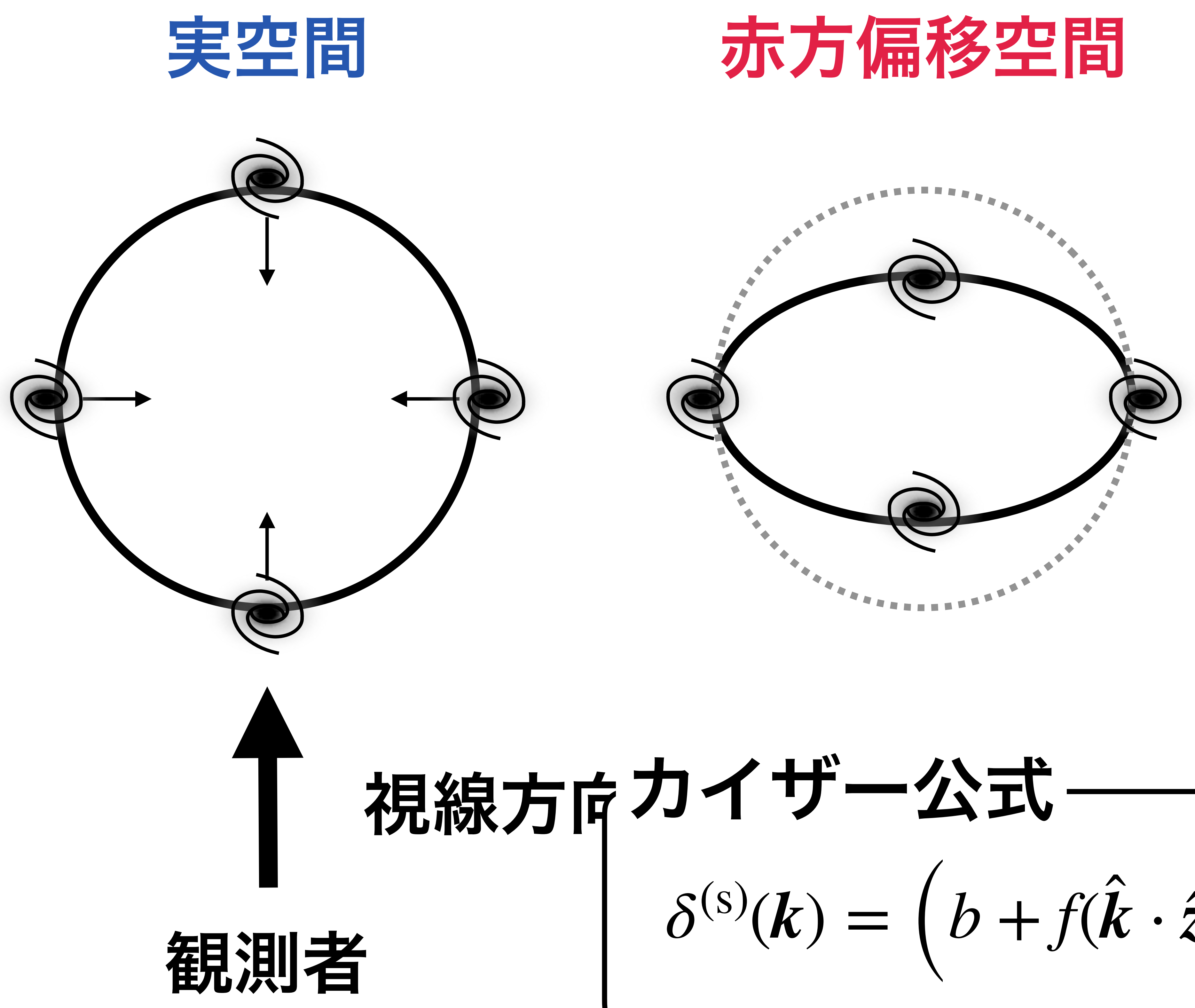
$$\begin{aligned}\delta^{(\mathrm{s})} = b\delta &- \frac{1}{\mathcal{H}}\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{r}}(\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\boldsymbol{v}) \\ &- \left(\frac{2}{r\mathcal{H}} + \frac{\dot{\mathcal{H}}}{\mathcal{H}^2}\right)\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\boldsymbol{v} + \frac{1}{\mathcal{H}}\left(\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\frac{\partial}{\partial\boldsymbol{r}}\Psi + \mathcal{H}\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\boldsymbol{v} + \hat{\boldsymbol{r}}\cdot\dot{\boldsymbol{v}}\right) \\ &- 2\Phi + \Psi + \frac{\dot{\Phi}}{\mathcal{H}} + \frac{1}{r}\int_0^r \mathrm{d}r'\left(2 - \frac{r-r'}{r'}\Delta_\Omega\right)(\Phi+\Psi) + \left(\frac{2}{r\mathcal{H}} + \frac{\dot{\mathcal{H}}}{\mathcal{H}^2}\right)\left(\Psi + \int_0^r \mathrm{d}r'\left(\dot{\Psi}+\dot{\Phi}\right)\right)\end{aligned}$$

2.3. どのような痕跡がRSDに残るか②

A.Challinor and A.Lewis [1105.5292]
C.Bonvin and R.Durrer [1105.5280]
J.Yoo [1409.3223], and many works

ドップラー効果のときを思い出す…

大スケール: コヒーレントな落下運動



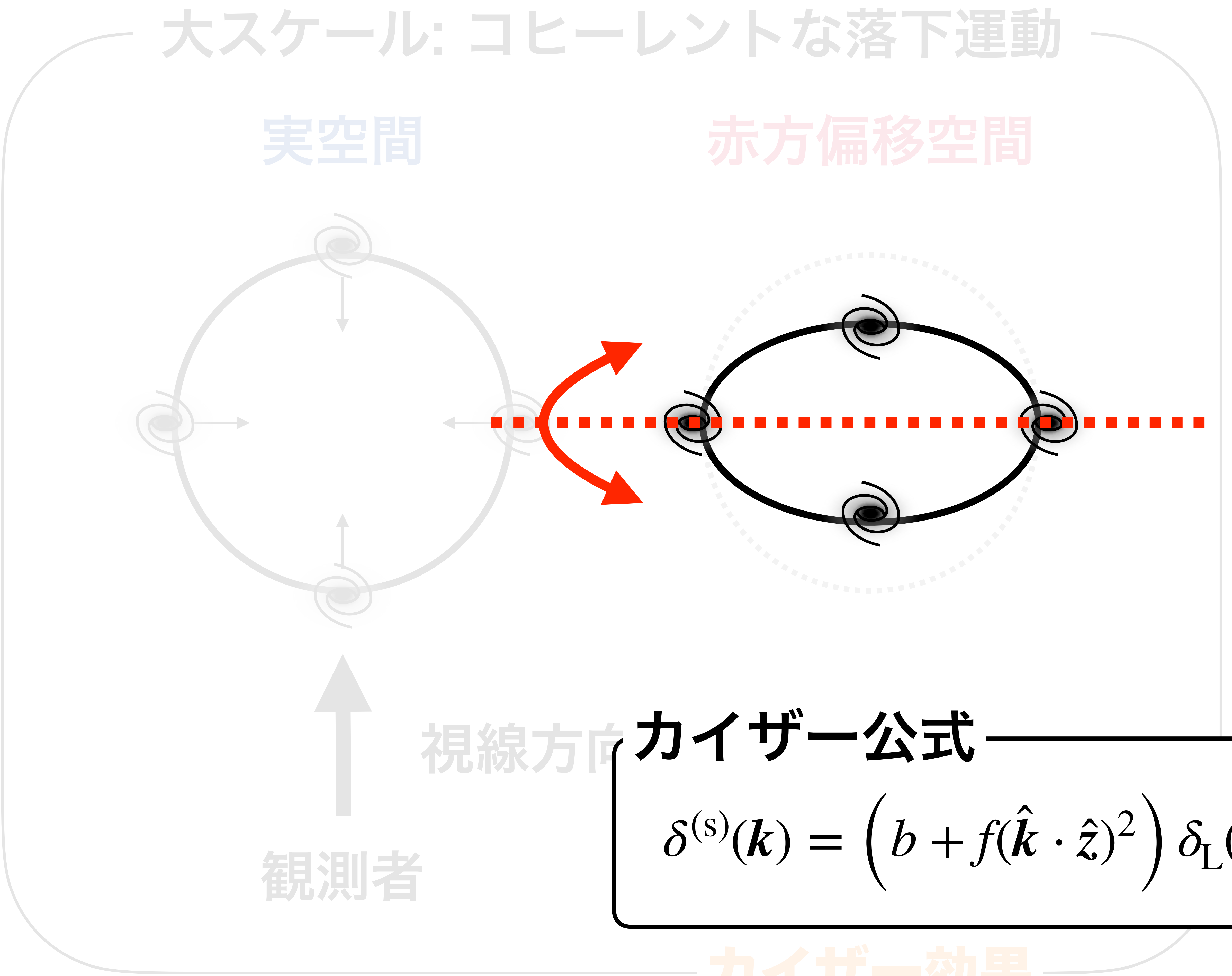
カイザー公式

$$\delta^{(\mathrm{s})}(\boldsymbol{k}) = \left(b + f(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{z})^2\right)\delta_{\mathrm{L}}(\boldsymbol{k})$$

2.3. どのような痕跡がRSDに残るか②

A.Challinor and A.Lewis [1105.5292]
C.Bonvin and R.Durrer [1105.5280]
J.Yoo [1409.3223], and many works

ドップラー効果のときを思い出す...



カイザー公式

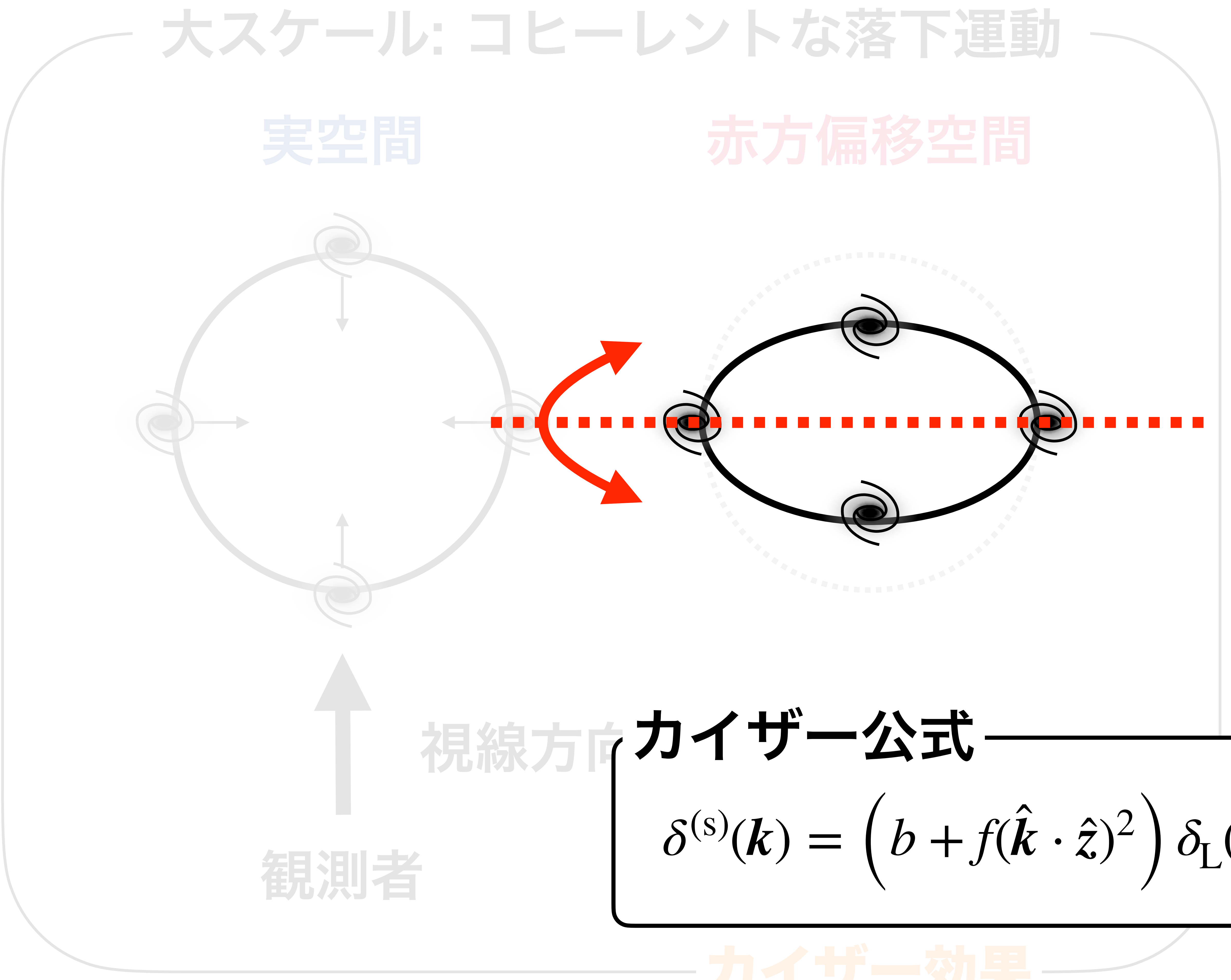
$$\delta^{(\mathrm{s})}(\boldsymbol{k}) = \left(b + f(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{z})^2\right)\delta_{\mathrm{L}}(\boldsymbol{k})$$

(視線方向ベクトル)^2 ~ 偶数次の多重極の非等方性

2.3. どのような痕跡がRSDに残るか②

A.Challinor and A.Lewis [1105.5292]
C.Bonvin and R.Durrer [1105.5280]
J.Yoo [1409.3223], and many works

ドップラー効果のときを思い出す…



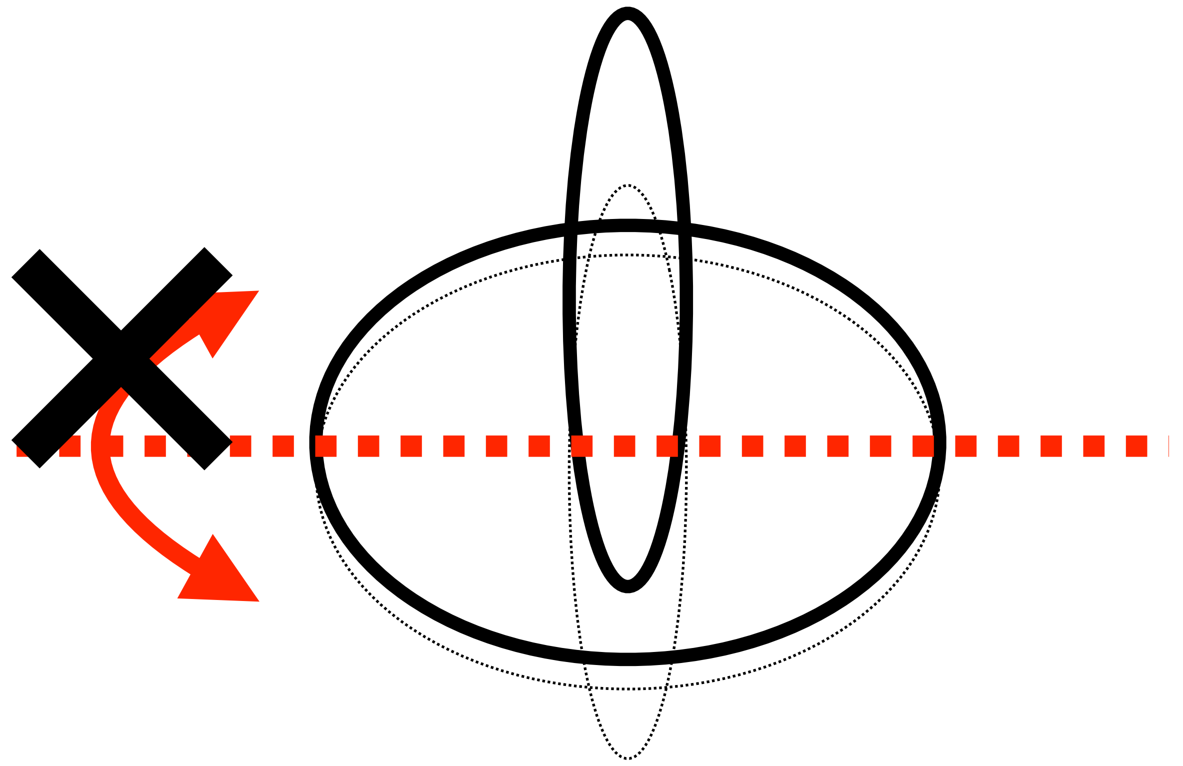
カイザー公式

$$\delta^{(\mathrm{s})}(\boldsymbol{k}) = \left(b + f(\hat{\boldsymbol{k}}\cdot\hat{z})^2\right)\delta_{\mathrm{L}}(\boldsymbol{k})$$

(視線方向ベクトル)^2 ~ 偶数次の多重極の非等方性

赤方偏移空間の密度ゆらぎ(線形)

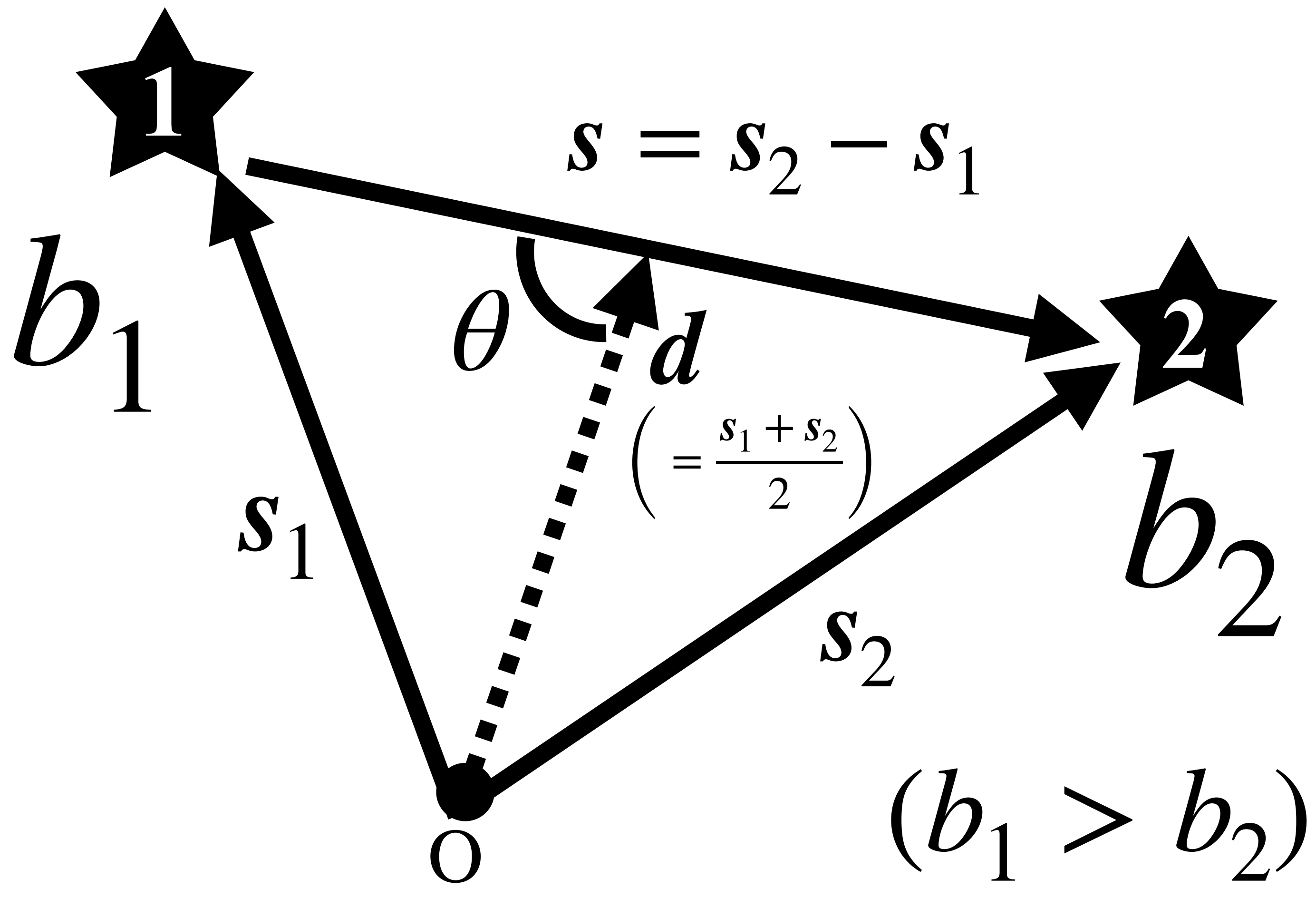
$$\begin{aligned}\delta^{(\mathrm{s})} = b\delta &- \frac{1}{\mathcal{H}}\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{r}}\left(\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\boldsymbol{v}\right) \\ &- \left(\frac{2}{r\mathcal{H}} + \frac{\dot{\mathcal{H}}}{\mathcal{H}^2}\right)\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\boldsymbol{v} + \frac{1}{\mathcal{H}}\left(\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{r}}\Psi + \mathcal{H}\hat{\boldsymbol{r}}\cdot\boldsymbol{v} + \hat{\boldsymbol{r}}\cdot\dot{\boldsymbol{v}}\right) \\ &- 2\Phi + \Psi + \frac{\dot{\Phi}}{\mathcal{H}} + \frac{1}{r}\int_0^r \mathrm{d}r' \left(2 - \frac{r-r'}{r'}\Delta_\Omega\right)(\Phi+\Psi) + \left(\frac{2}{r\mathcal{H}} + \frac{\dot{\mathcal{H}}}{\mathcal{H}^2}\right)\left(\Psi + \int_0^r \mathrm{d}r' \left(\dot{\Psi}+\dot{\Phi}\right)\right)\end{aligned}$$

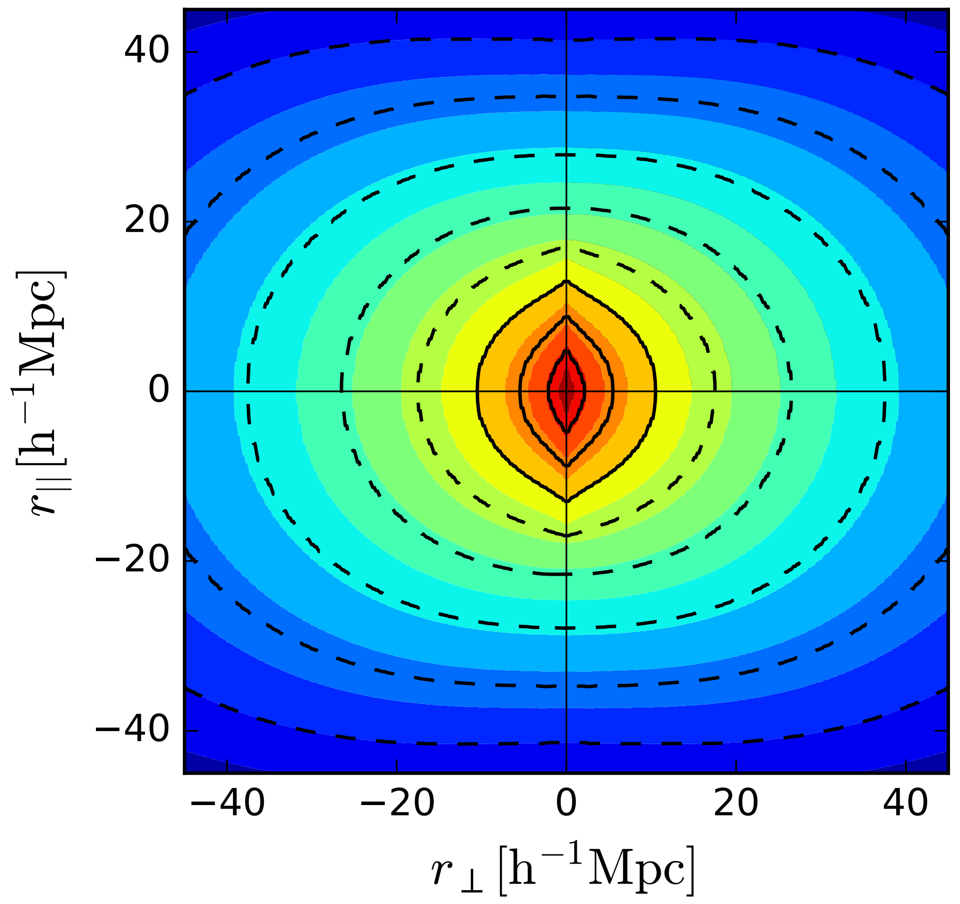


奇数次の多重極の非等方性

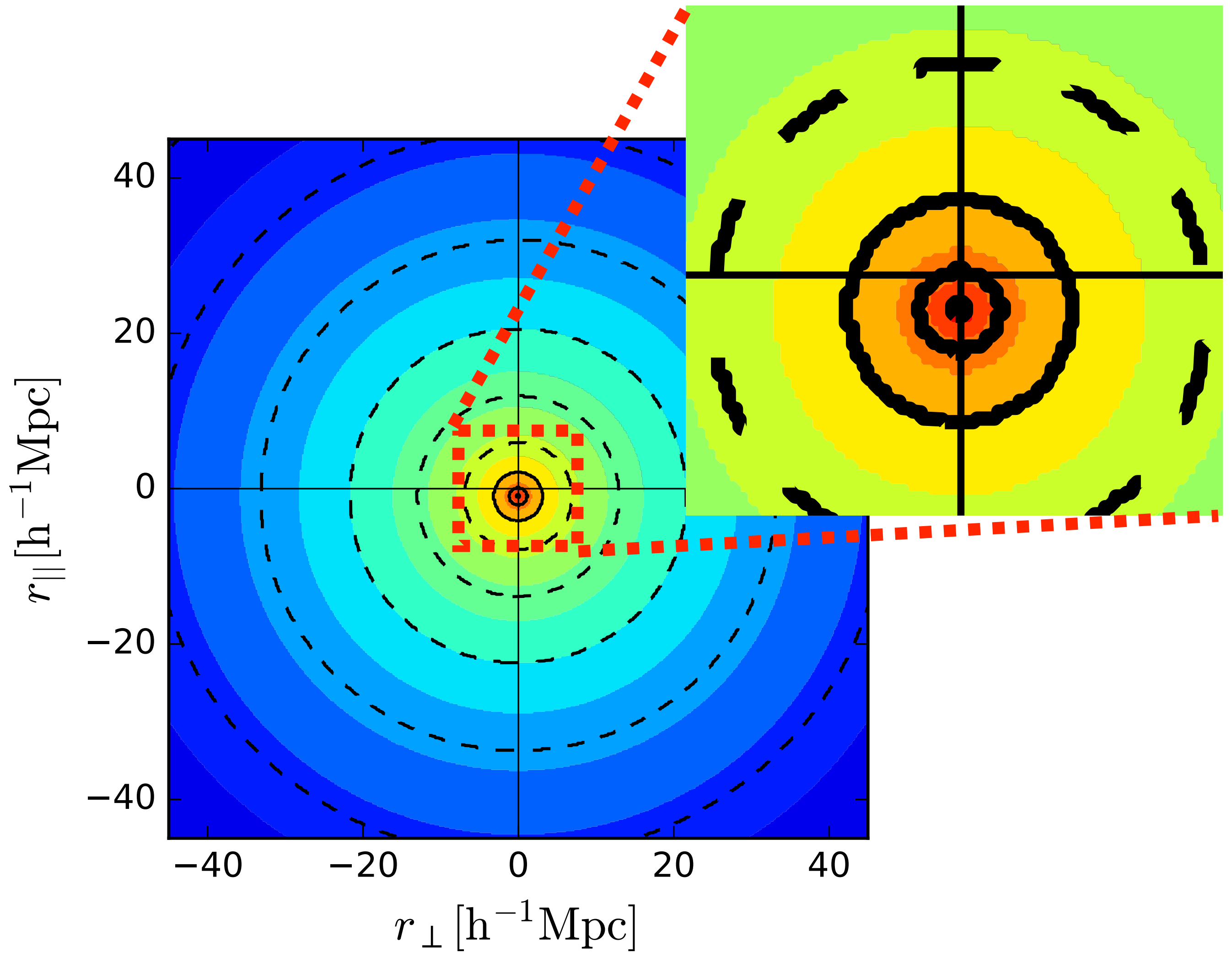
2.4. 双極子的非等方性

$$\xi_1 = \frac{3}{2}\int_{-1}^{1} \left(\xi^{(\mathrm{S})}(\boldsymbol{s}_1, \boldsymbol{s}_2)\ \cos\theta\right) \mathrm{d}\cos\theta$$





ドップラー効果



相対論的効果(重力赤方偏移)

E.Giusarma et al. [1709.07854]

線形理論に基づくと

A.Challinor and A.Lewis [1105.5292], C.Bonvin and R.Durrer [1105.5280], J.Yoo [1409.3223], ...

$\xi_1 \propto (b_1 - b_2)$ 相互相関をとることで初めて非対称な相関関数(双極子的非等方性)が見える

注意: wide-angle効果

ドップラー効果からも遠方観測者近似が破れる状況で、同様に双極子的非等方性が出る

$\boldsymbol{s} = \boldsymbol{r} + \dfrac{1+z}{H(z)}\left(\boldsymbol{v}\cdot\hat{z}\right)\hat{z}$ $\hat{z}$: ~~constant~~ line-of-sight vector $\longrightarrow$ $\xi_1 \propto (b_1 - b_2)$

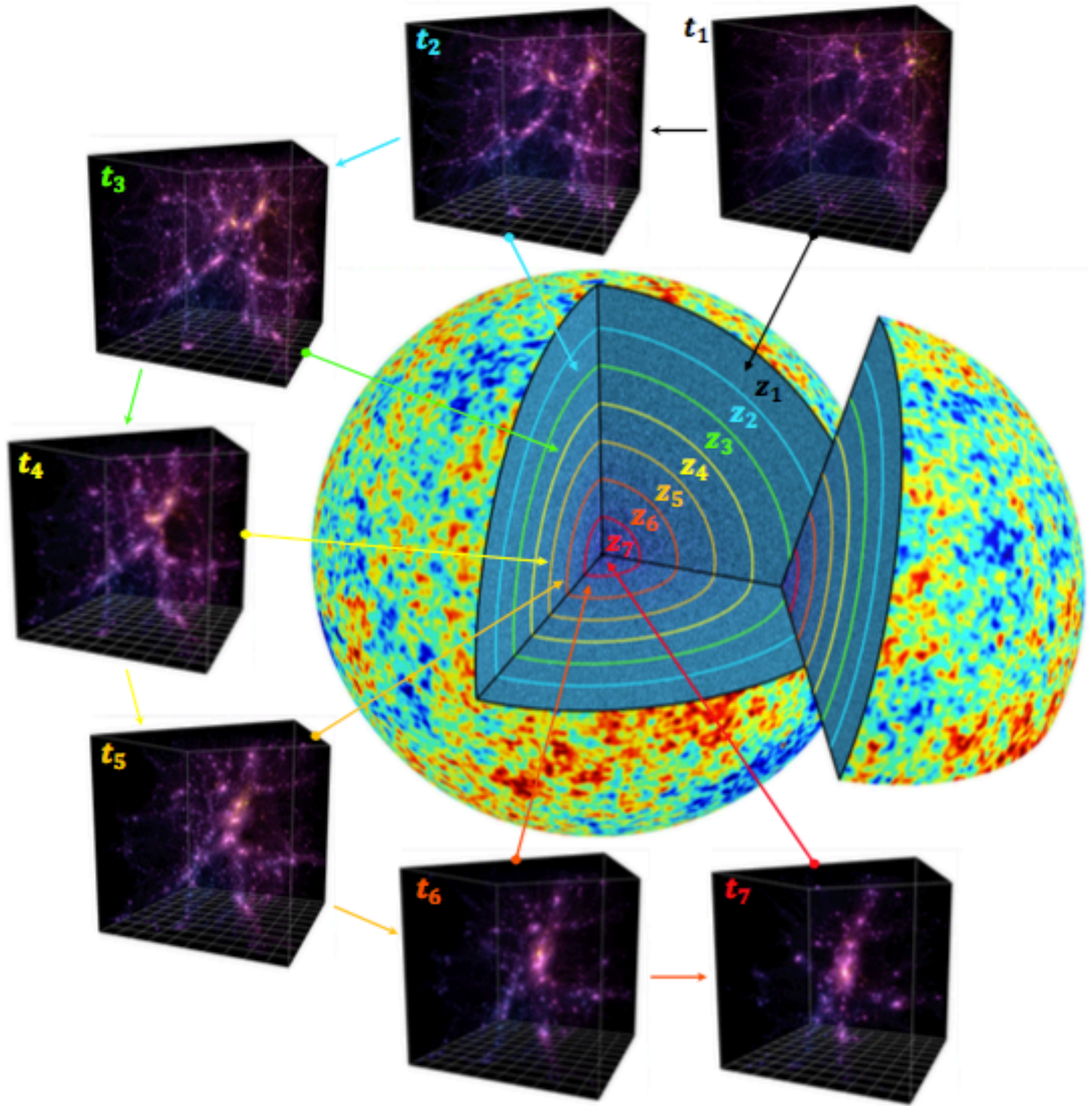
2.5. シミュレーションでの双極子的非等方性の測定

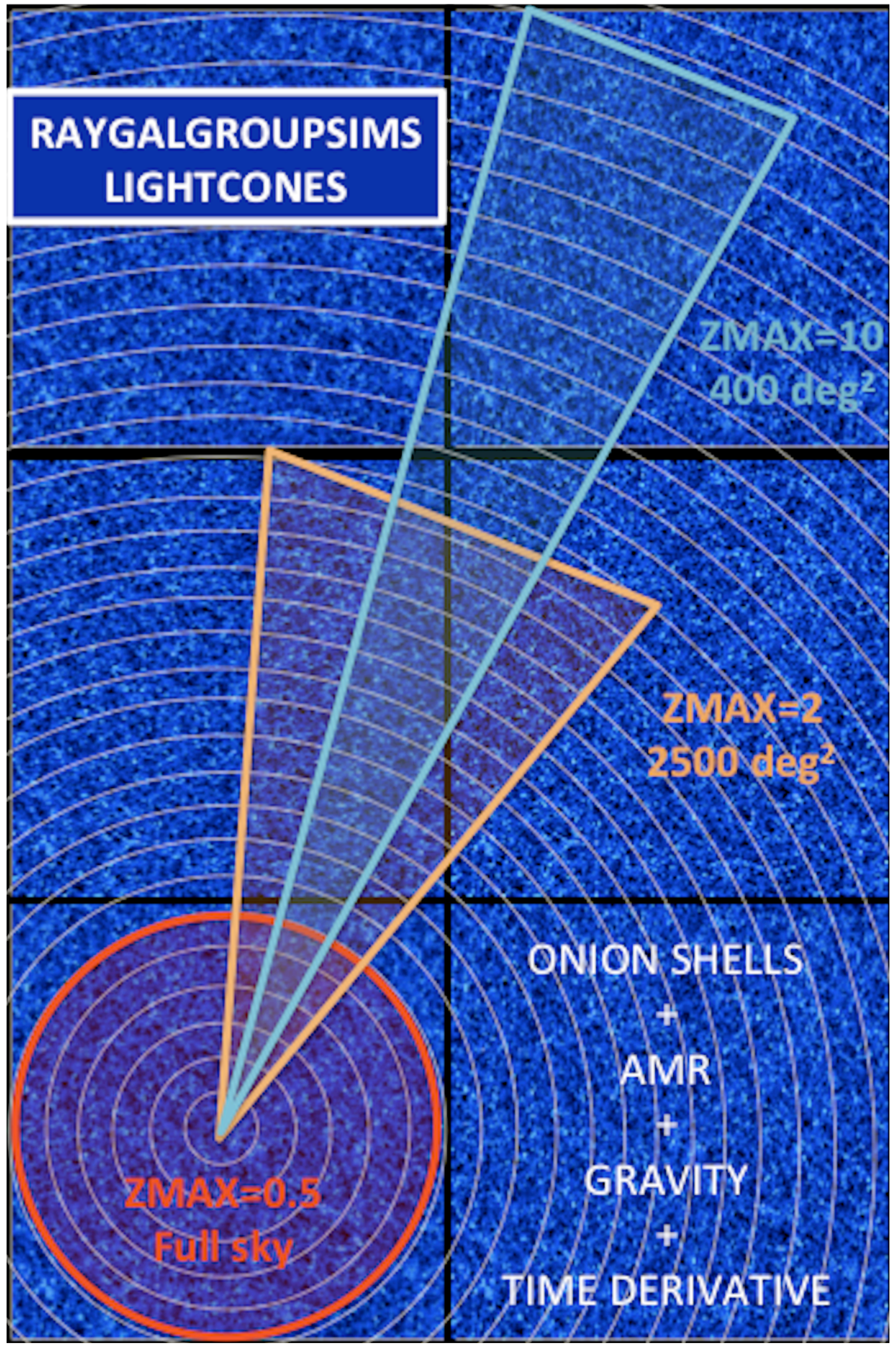
M-A.Breton, Y.Rasera, A.Taruya, O.Lacombe, S.Saga [1803.04294]

- N体シミュレーション (RAMSES, (2.625 h^{-1}Mpc)^3, 4096^3 DM particles)
- light cone上の重力ポテンシャルのデータを保存
- 測地線方程式を解く
- 観測される赤方偏移/位置を得る

$$1+z=\frac{\left(g_{\mu\nu}k^\mu k^\nu\right)_{\rm source}}{\left(g_{\mu\nu}k^\mu k^\nu\right)_{\rm observer}}$$

$$g_{\mu\nu}k^\mu k^\nu=-ak^0\left(1+\phi+\boldsymbol{v}\cdot\hat{\boldsymbol{n}}+\frac{1}{2}v^2\right)$$





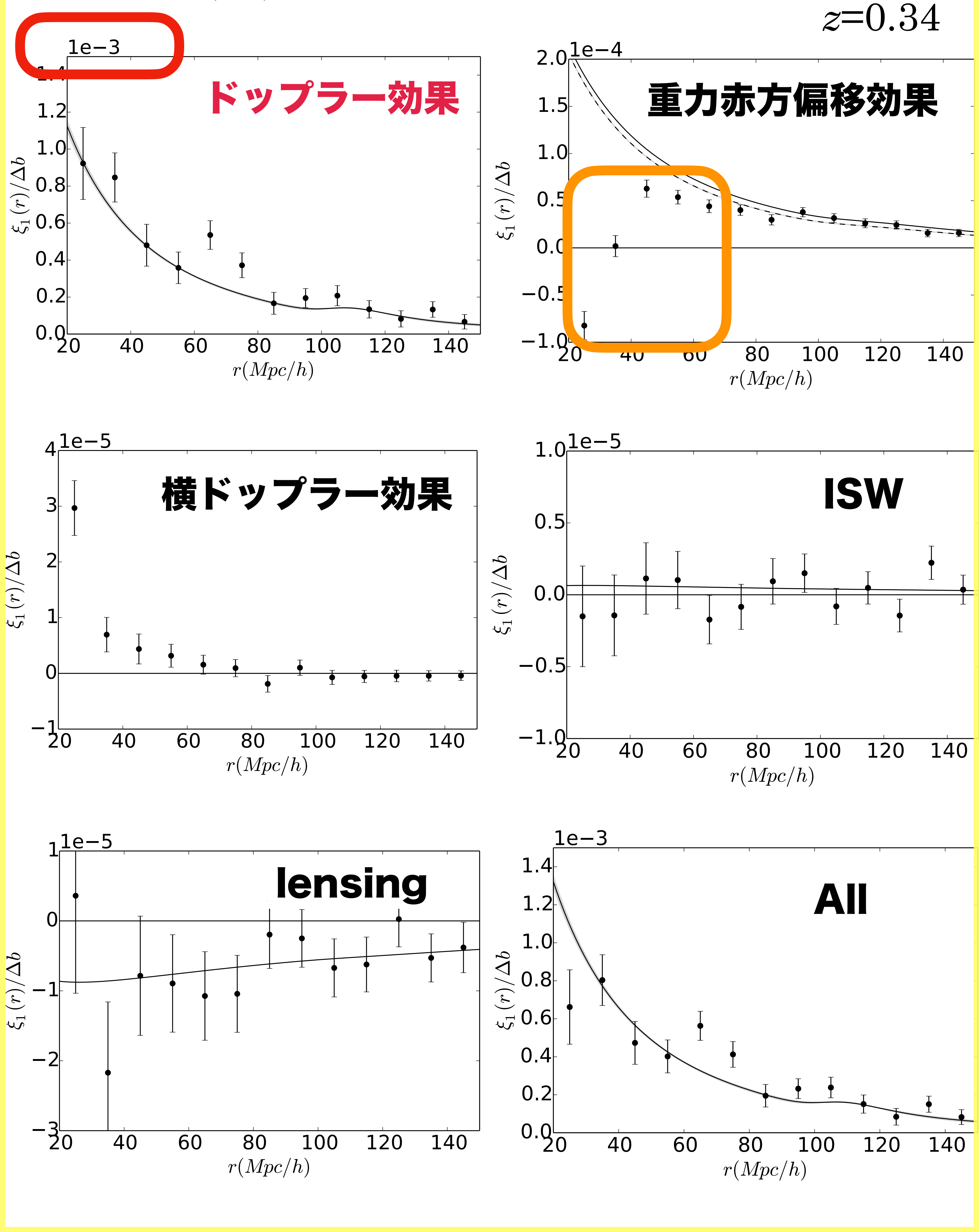
(RayGalGroupSims by M-A.Breton and Y.Rasera)

全ての相対論的効果が入ったlight-coneカタログ
(各効果のオン・オフも選択可能)

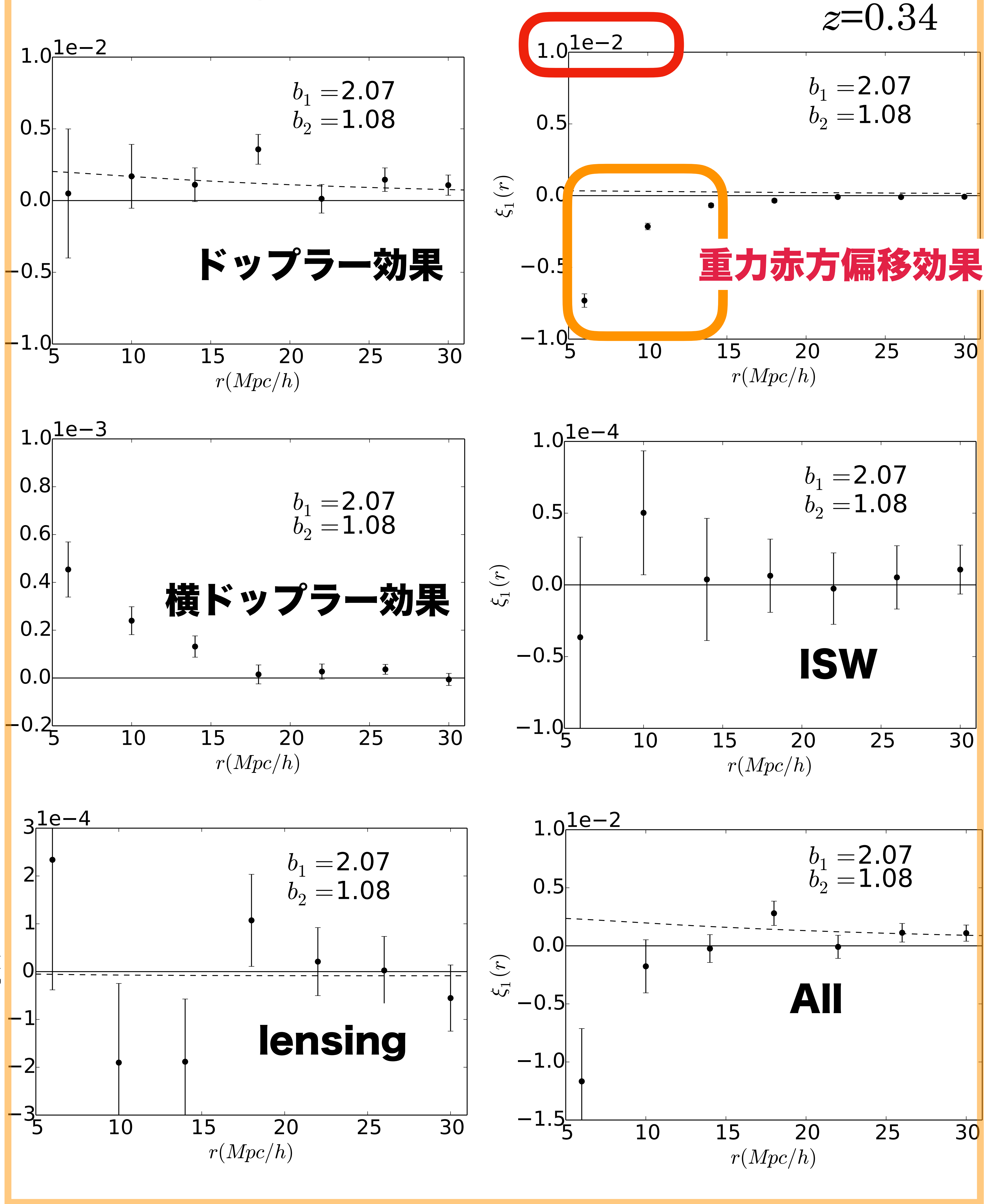
2.6. シミュレーションでの双極子的非等方性の測定

M-A.Breton, Y.Rasera, A.Taruya, O.Lacombe, S.Saga [1803.04294]

大スケールのふるまい

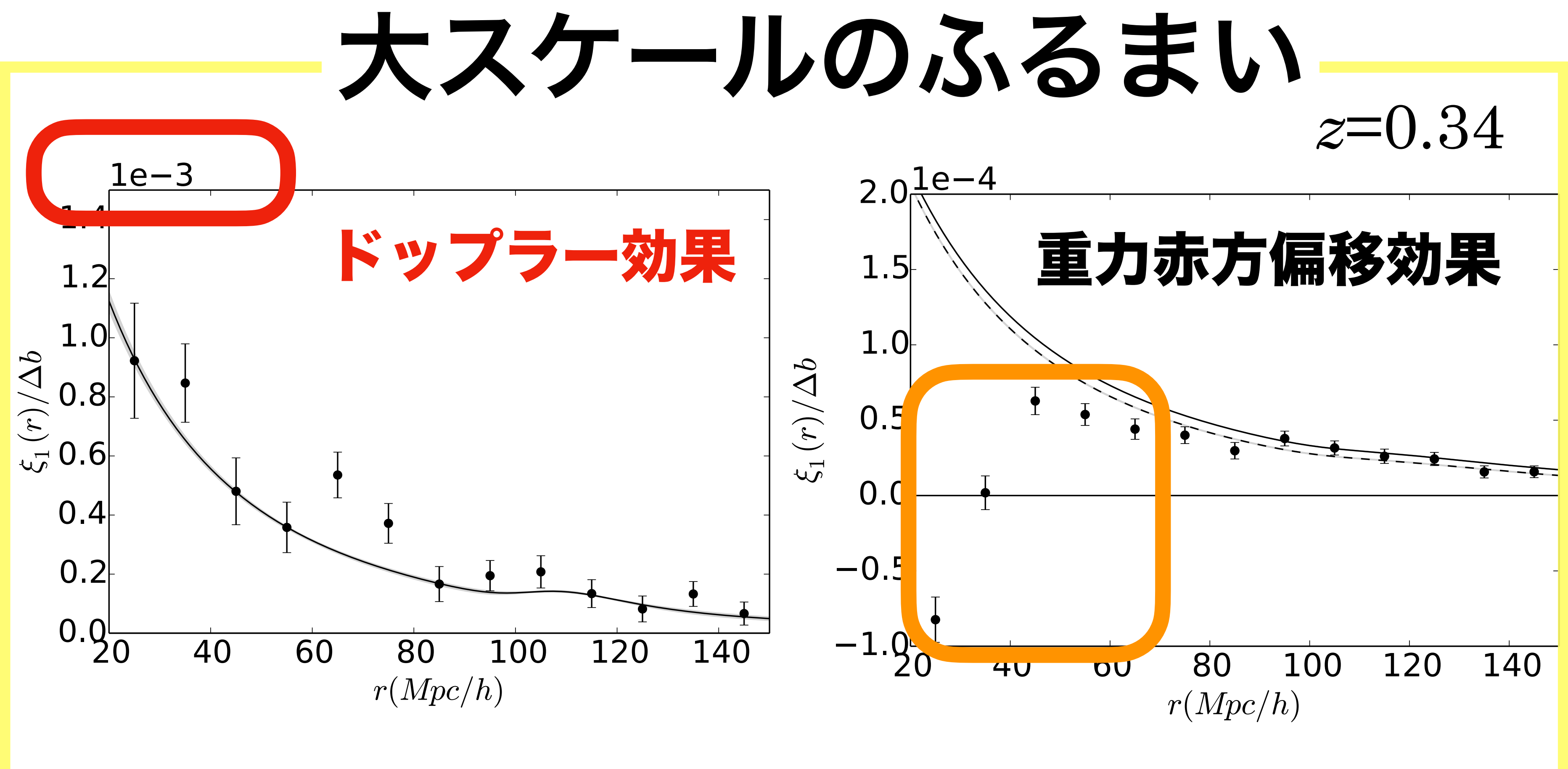


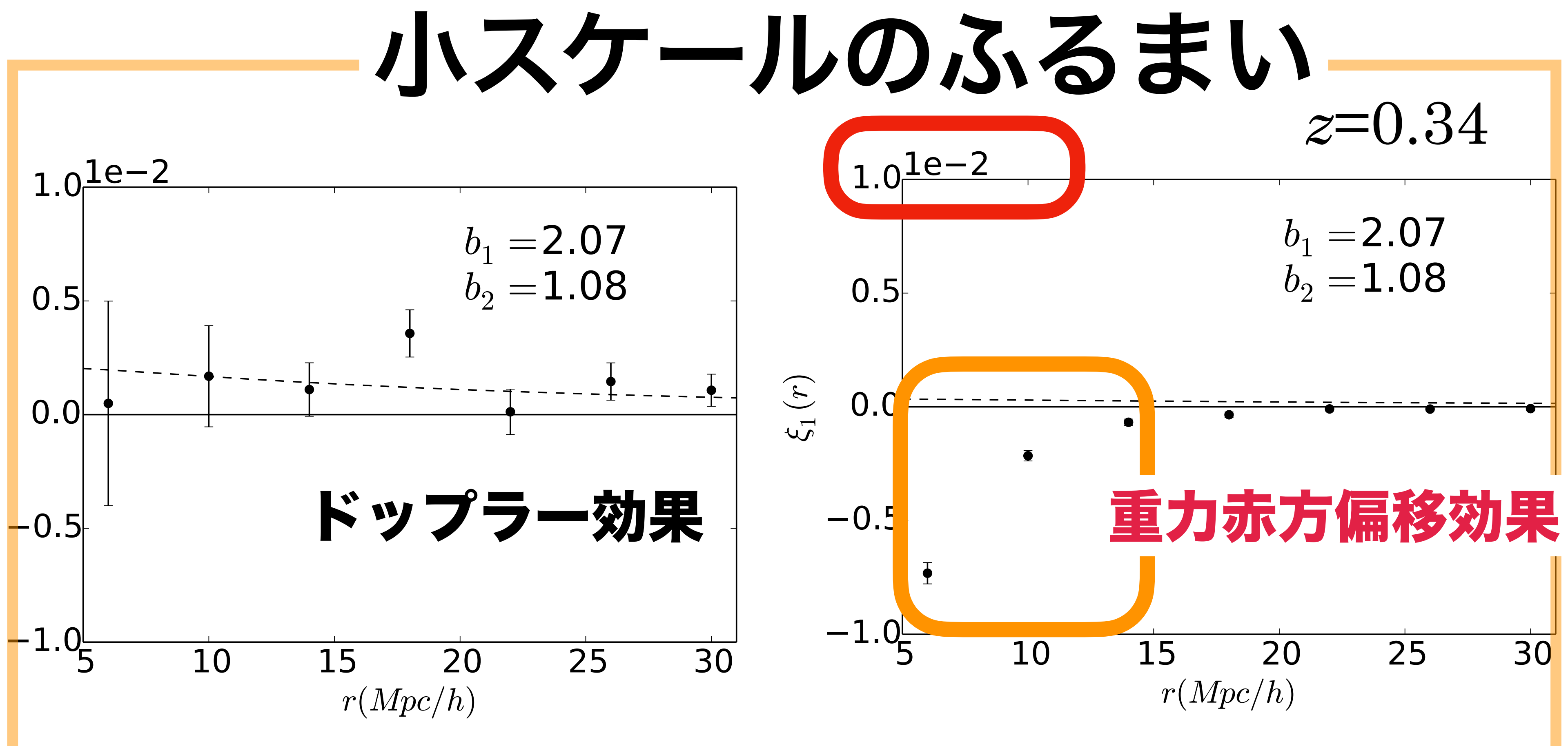
小スケールのふるまい



2.6. シミュレーションでの双極子的非等方性の測定

M-A.Breton, Y.Rasera, A.Taruya, O.Lacombe, S.Saga [1803.04294]



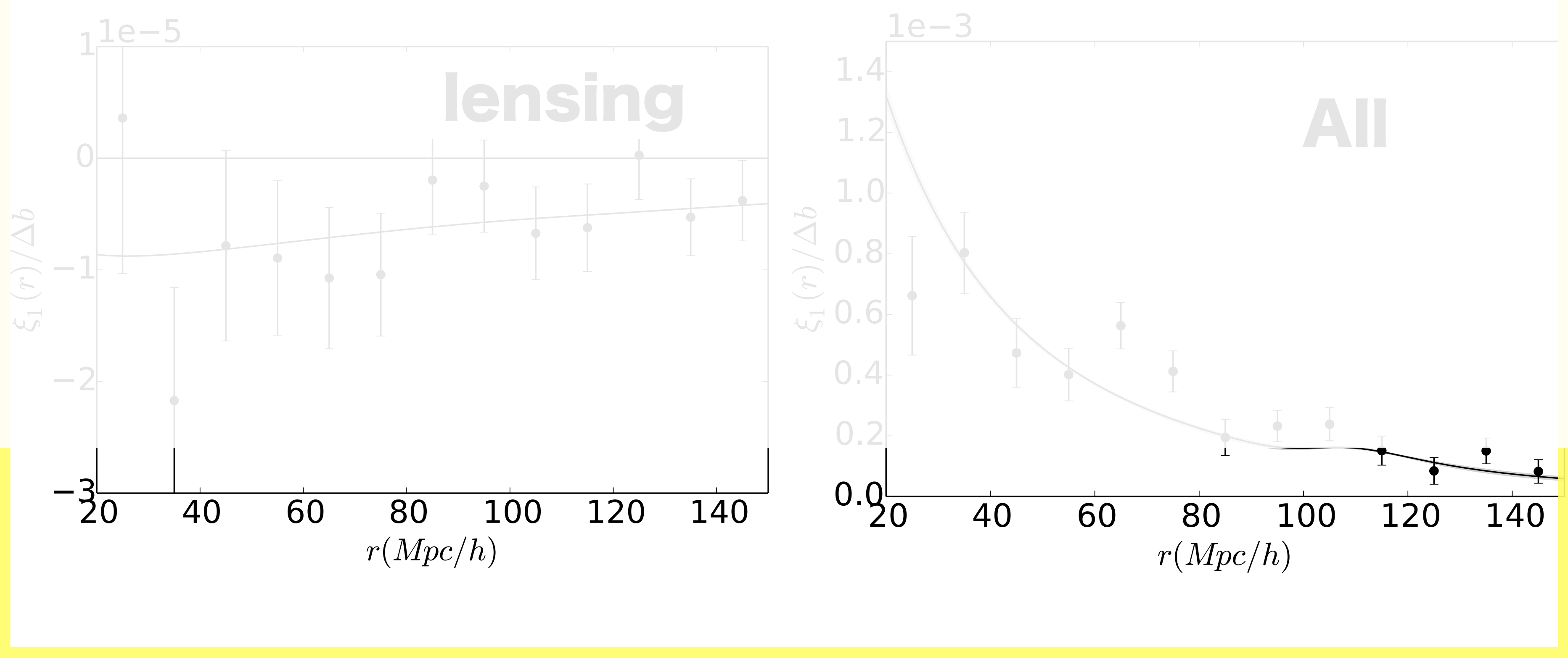


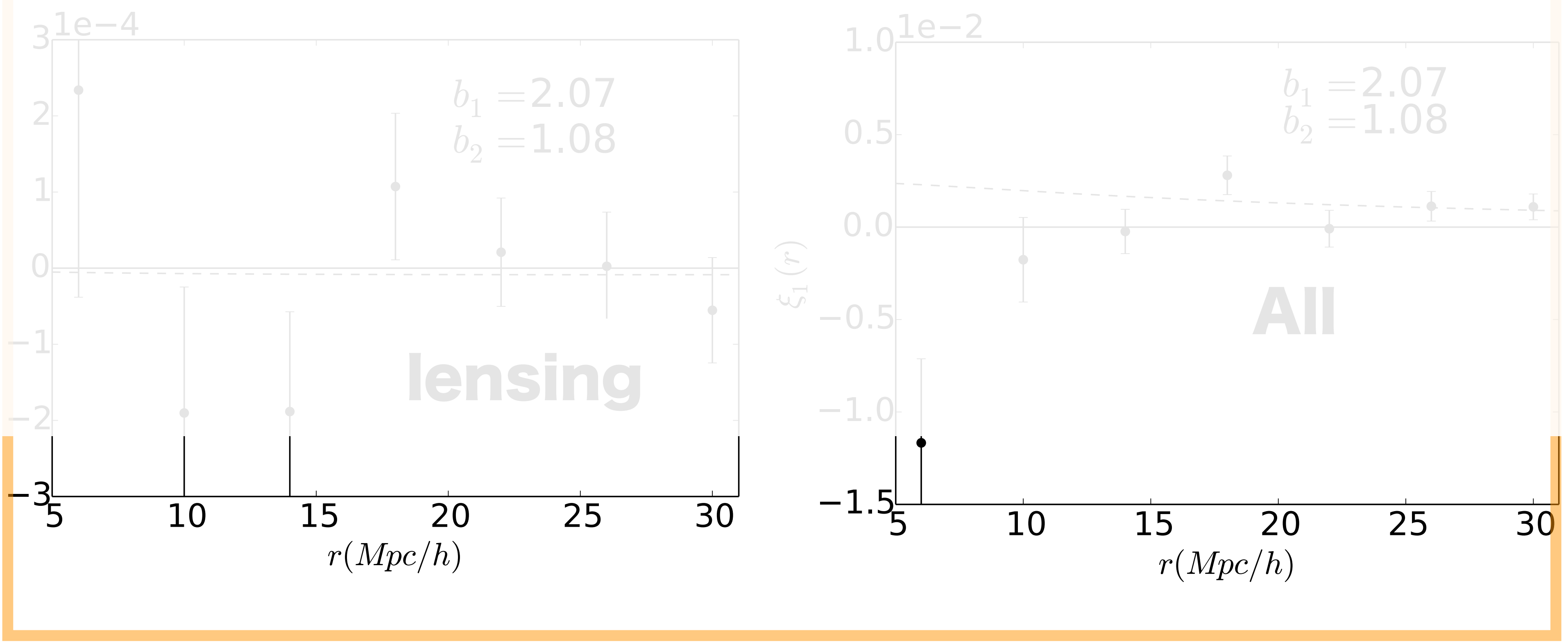
大スケールのポイント

- ドップラー効果(wide-angle効果)が支配的
- 重力赤方偏移効果の寄与に線形理論からの大きなズレ

小スケールのポイント

- 重力赤方偏移効果が支配的
- 線形理論からは完全に逸脱、負の双極子シグナル

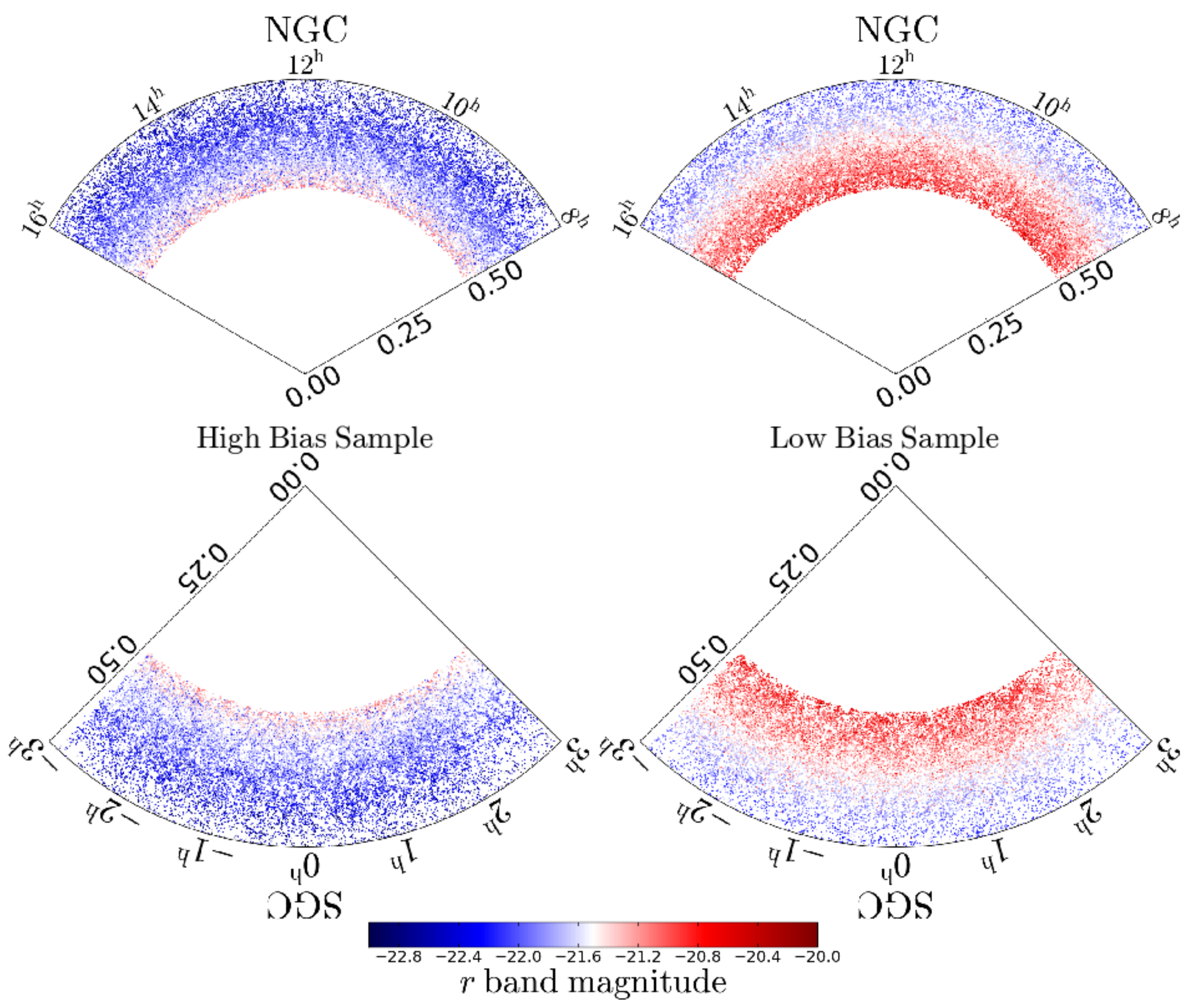




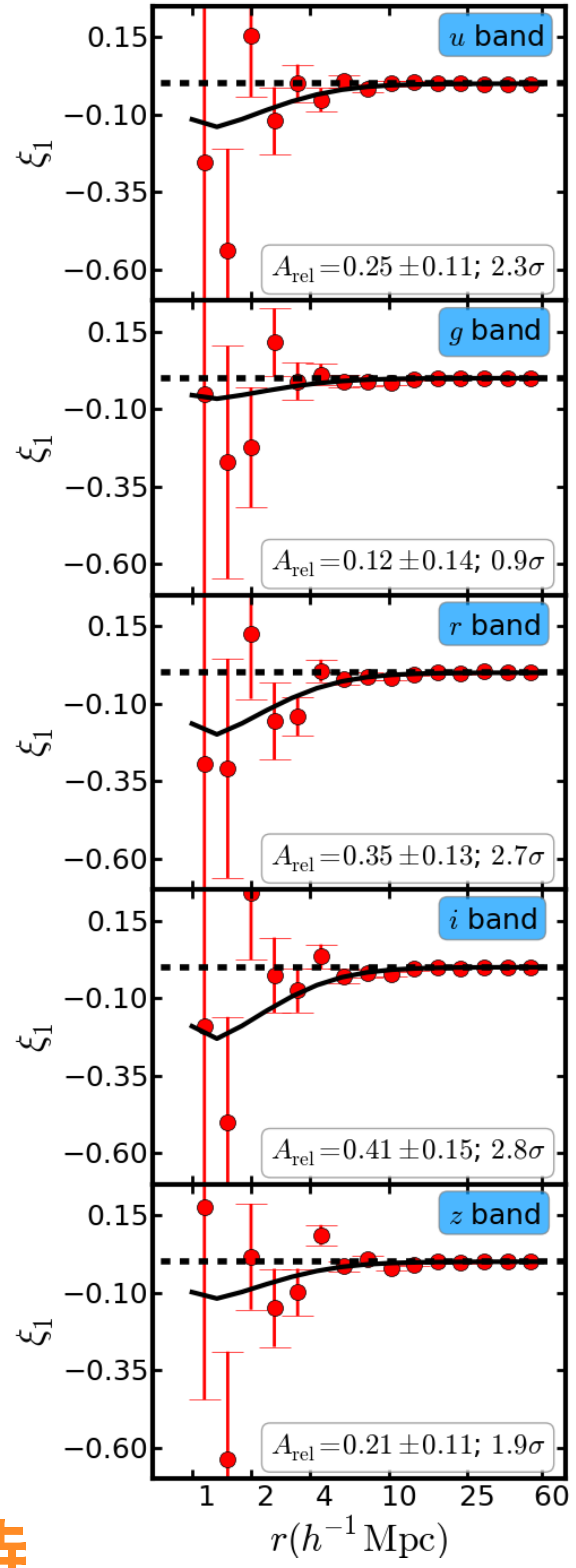
2.7. 双極子的非等方性の検出

S. Alam et al. [1709.07855]

2.8σで検出？ SDSS DR12 CMASS galaxy sample

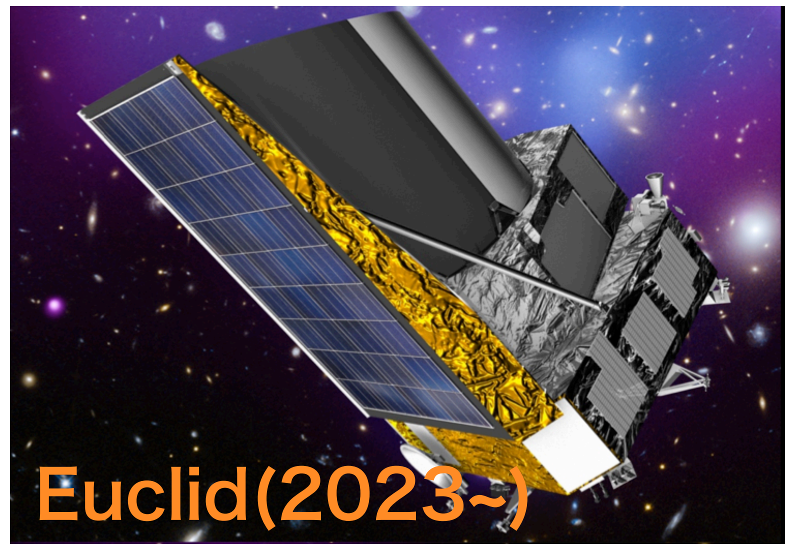


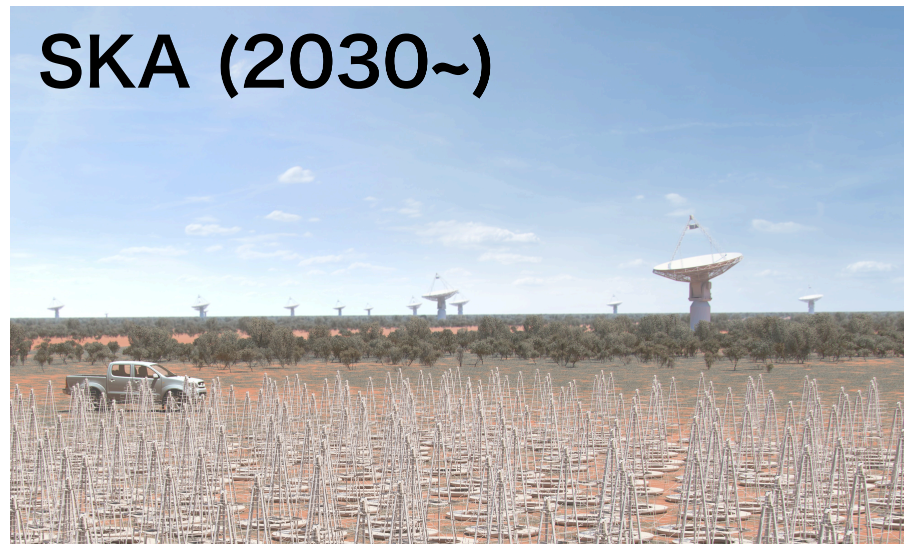
- 765,433 LRGs
- 0.44 < z < 0.70
- 銀河の絶対等級を利用して複数のサンプルに分離 - 相互相関



重力の新しいプローブ

Deep & Wide future surveys





将来観測にも期待

目次

1. 導入: 銀河赤方偏移サーベイ,RSD
2. 導入: RSDへの観測的な相対論効果
3. **モデルと検出可能性**
4. まとめ

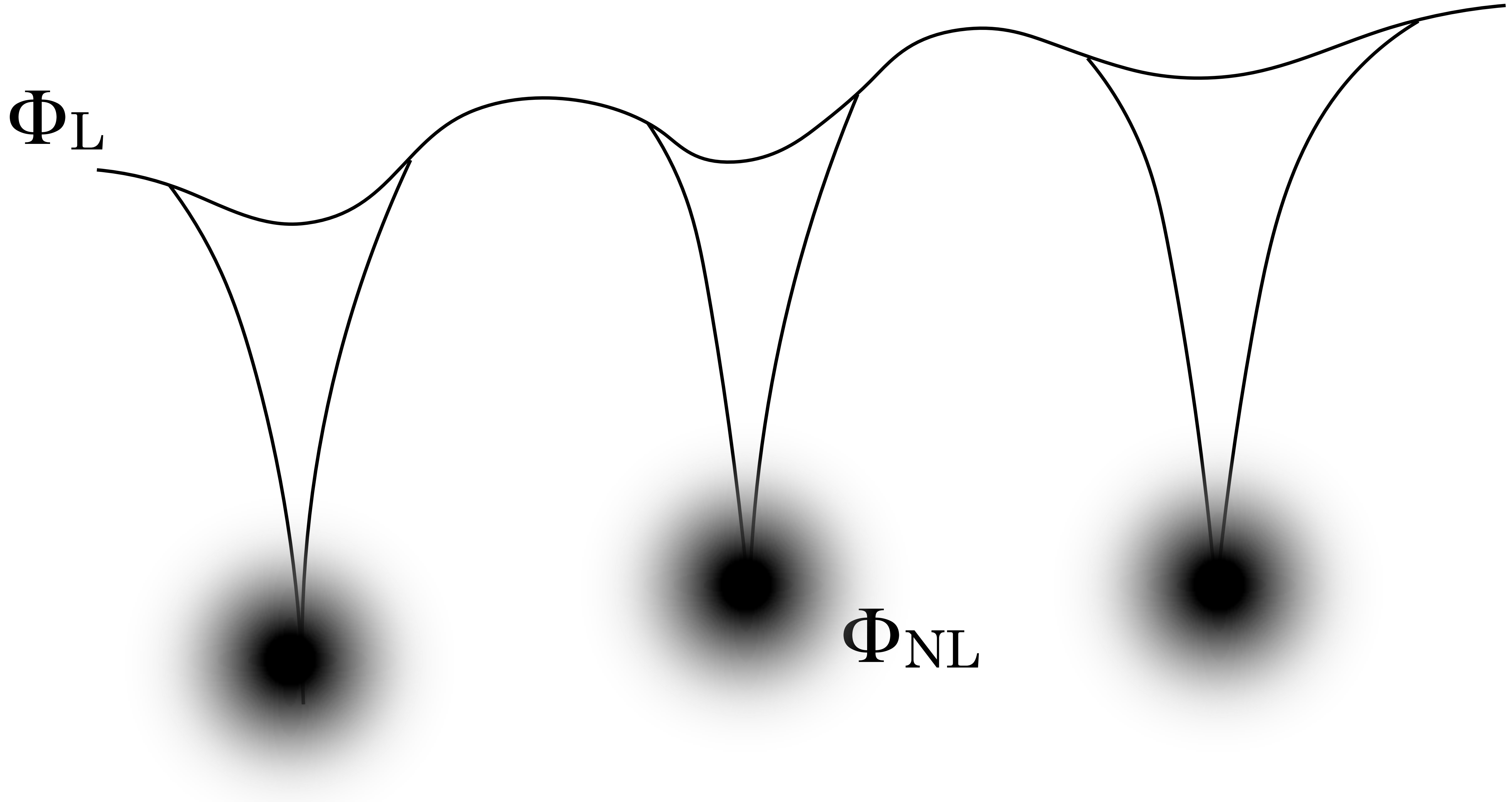
3.1. モデル

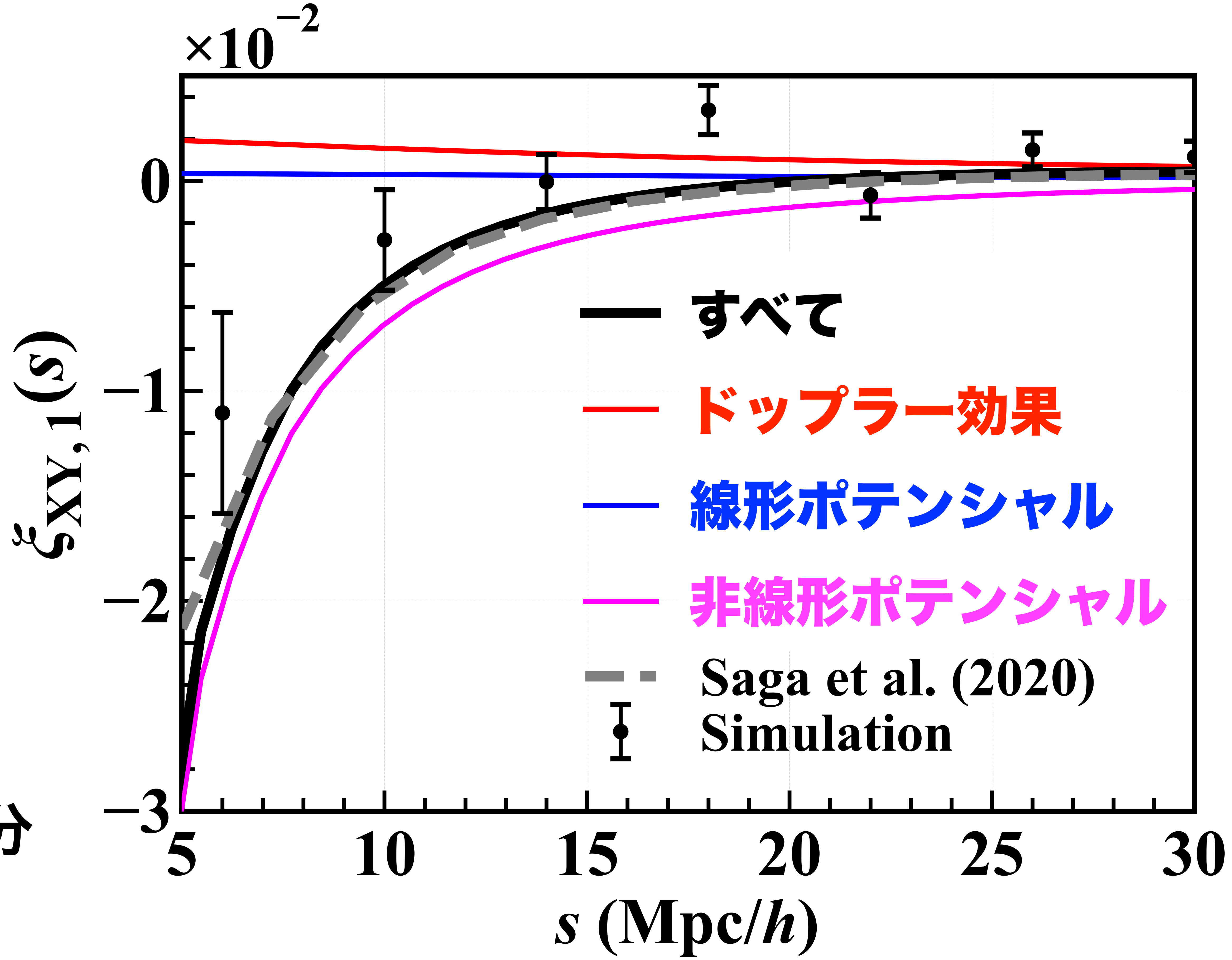
S.Saga, A.Taruya, M-A.Breton, Y.Rasera [2004.03772]

$$s = r + \frac{1+z}{H}(v\cdot\hat{r})\hat{r} + \frac{1+z}{H}\left(-\Phi + \frac{1}{2}v^2 - \int_t^{t_0}\left(\dot{\Phi}+\dot{\Psi}\right)dt'\right)\hat{r} - \int_0^{\chi}(\Psi+\Psi)d\chi'\,\hat{r} - \int_0^{\chi}(\chi-\chi')\nabla_{\perp}(\Phi+\Psi)d\chi'$$

重力ポテンシャルのモデル化

$$\underset{\text{線形ポテンシャル}}{\Phi = \Phi_{\rm L}} + \underset{\text{非線形重力ポテンシャル}}{\Phi_{\rm NL}}$$





$\Phi_{\rm NL}$ はNFW profileを利用して見積もる

※ 以前のモデル(Saga et al. (2020))は7次元積分
今回→1次元積分しか含まない近似モデル

3.2. ハローモデルに基づいたSN調査

S.Saga, A.Taruya, Y.Rasera, M-A.Breton (2109.06012)

SNを計算するために必要な主要なパラメータ

- バイアス $b_{\rm X}$, $b_{\rm Y}$ (バイアス→ハロー質量→非線形ポテンシャル $\Phi_{\rm NL,X}$, $\Phi_{\rm NL,Y}$)
- 数密度 $n_{\rm X}$, $n_{\rm Y}$
- 赤方偏移 z, 観測体積または赤方偏移幅 Δz

$$\left(\frac{\rm S}{\rm N}\right)^2 \equiv \sum_{s,s'=s_{\rm min}}^{s_{\rm max}} \xi_1(s)\,{\rm COV}^{-1}(s,s')\,\xi_1(s')$$

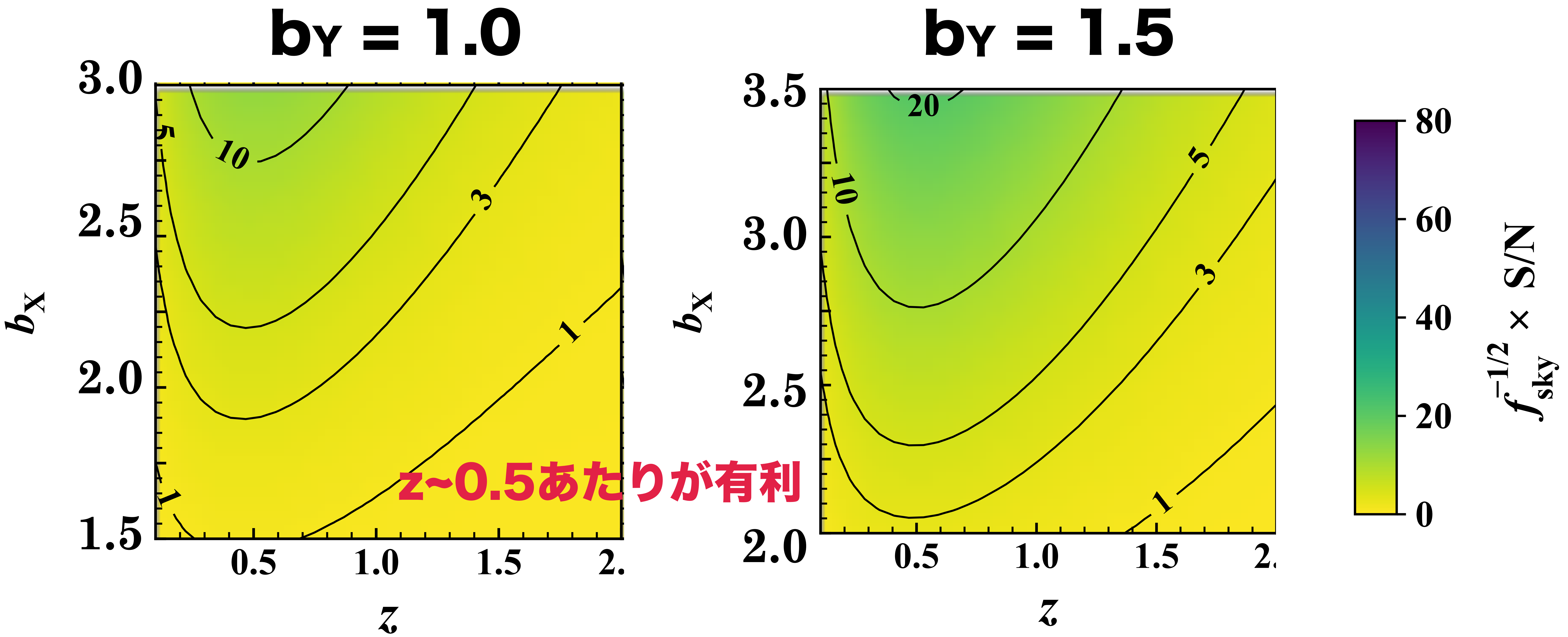
デモンストレーション

※ 縦軸は Δb = bX-bY が同じ範囲をプロット (0.5 ≦Δb≦ 2.0)

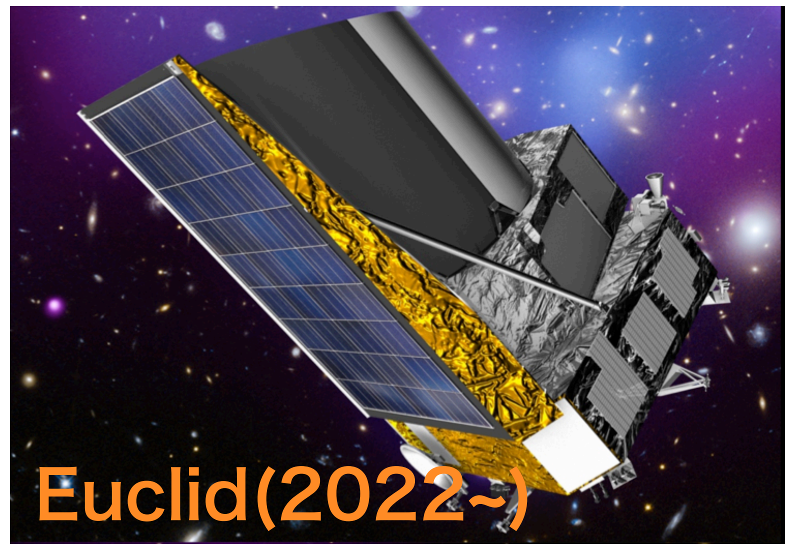
$$n_{\rm X} = 3\times10^{-5}\,({\rm Mpc}/h)^3$$

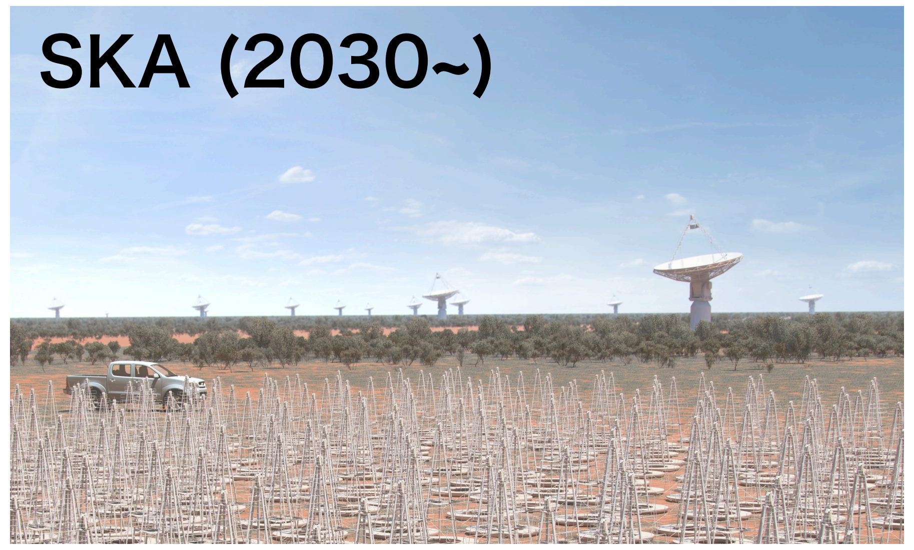
$$n_{\rm Y} = 1\times10^{-3}\,({\rm Mpc}/h)^3$$

$$\Delta z = 0.1$$



3.3. 銀河サーベイでの検出可能性





双極子的非等方性は相互相関をとることが必要

方法1

ひとつのサーベイで得られる1種類のサンプルを分割しなければいけない

(簡単のため理想的に)質量M_{min}以上のハローの分布に従うと思って、

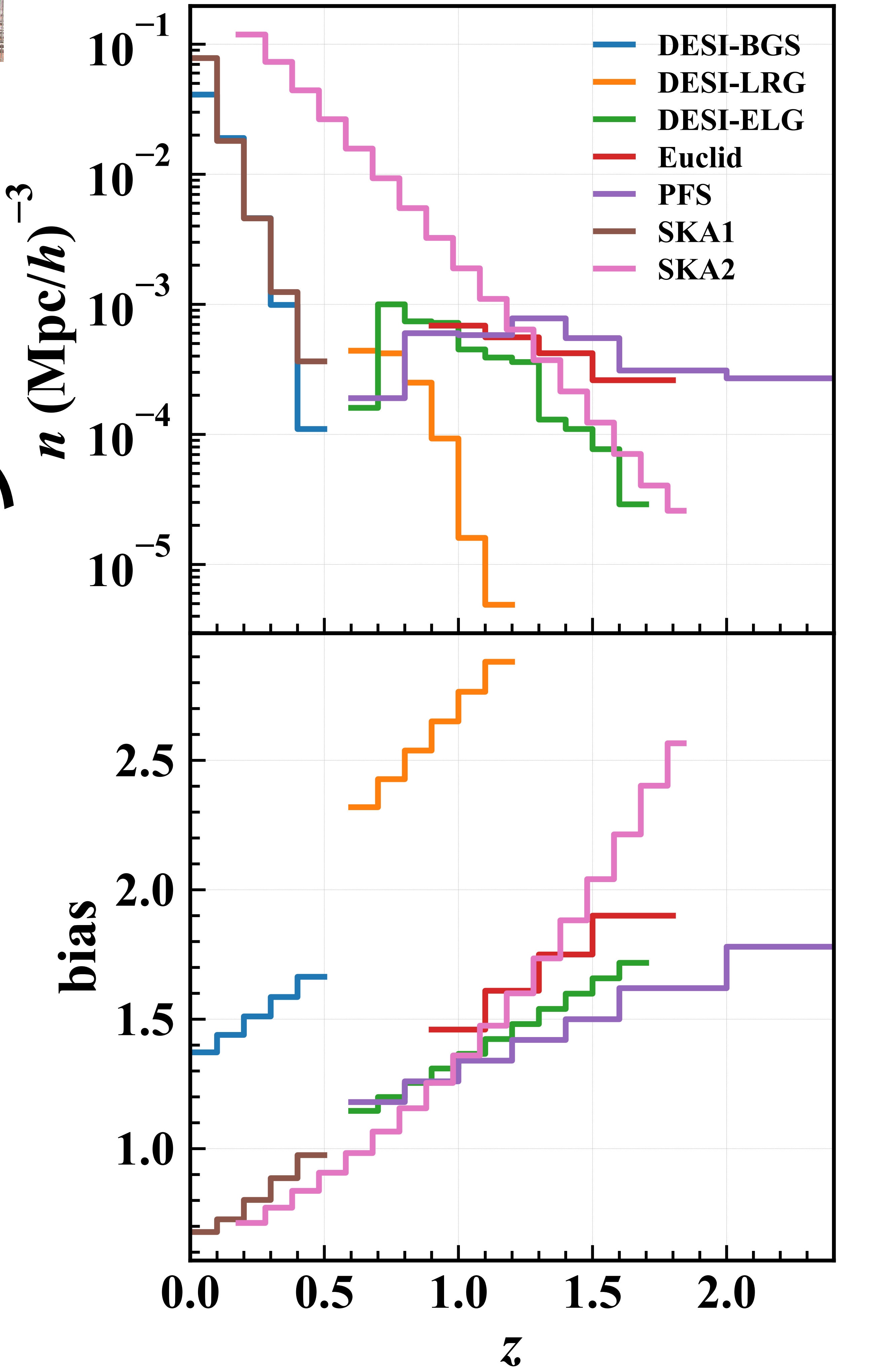
小さいバイアスのサンプル [M_{min}, M*]

大きいバイアスのサンプル [M*, ∞]

に質量で分割できると想定。M*の決め方の不定性は残る。

方法2

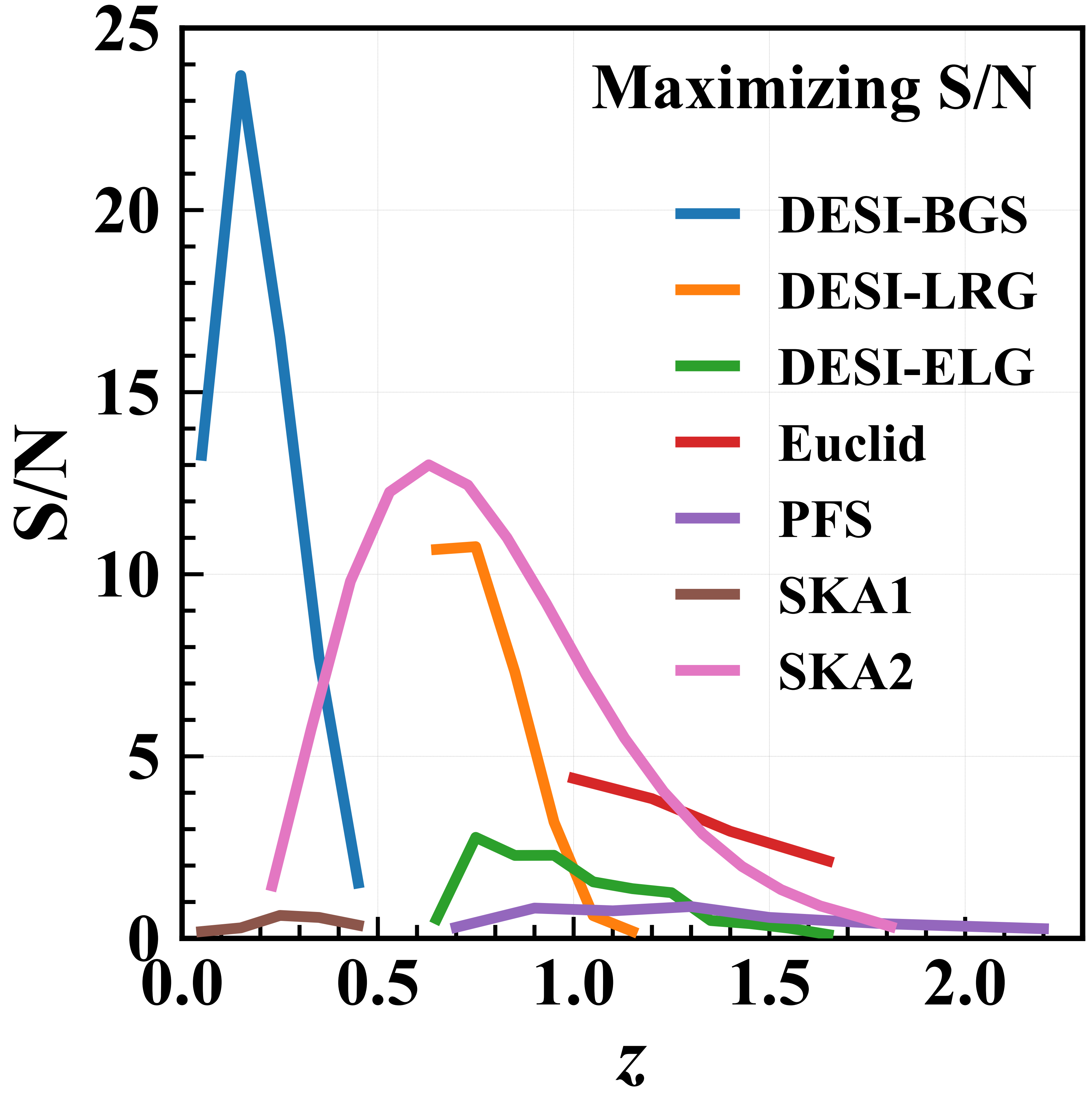
異なるサーベイで得られる複数種のサンプルを組み合わせる



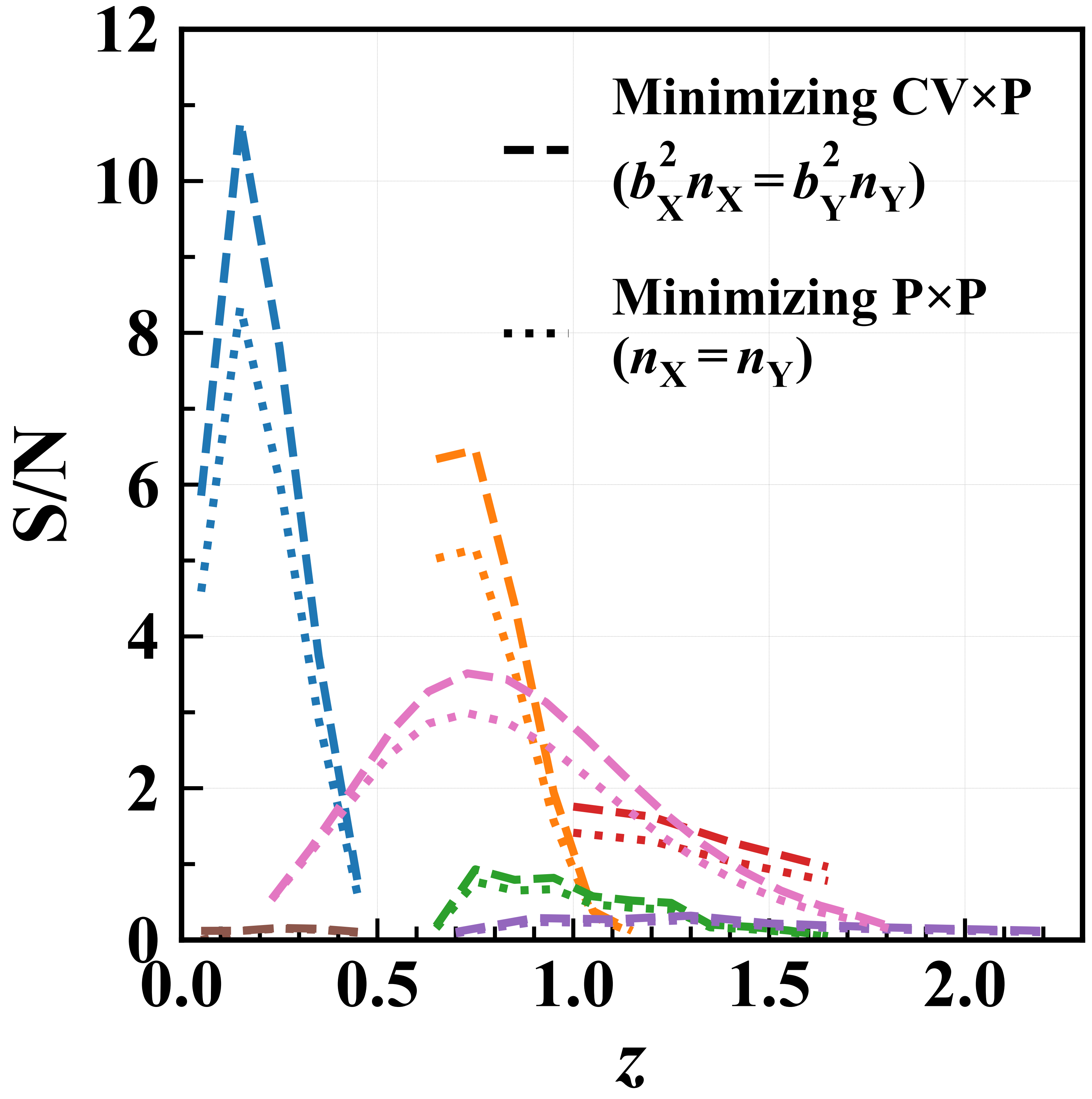
3.4. 方法1

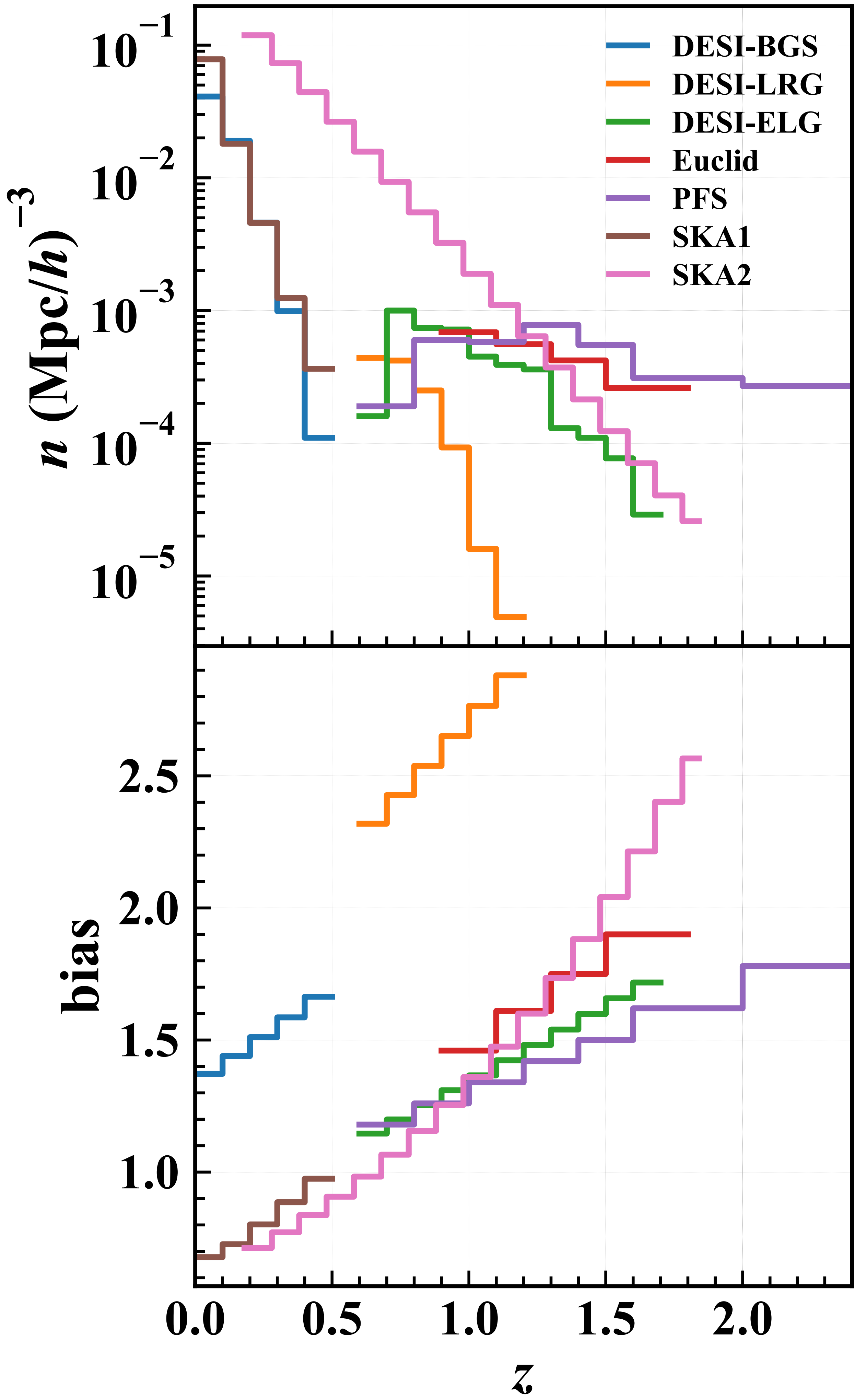
S.Saga, A.Taruya, Y.Rasera, M-A.Breton (2109.06012)

M*を連続的に動かして(数値的に)得られた最大のSN



他の条件を課した場合



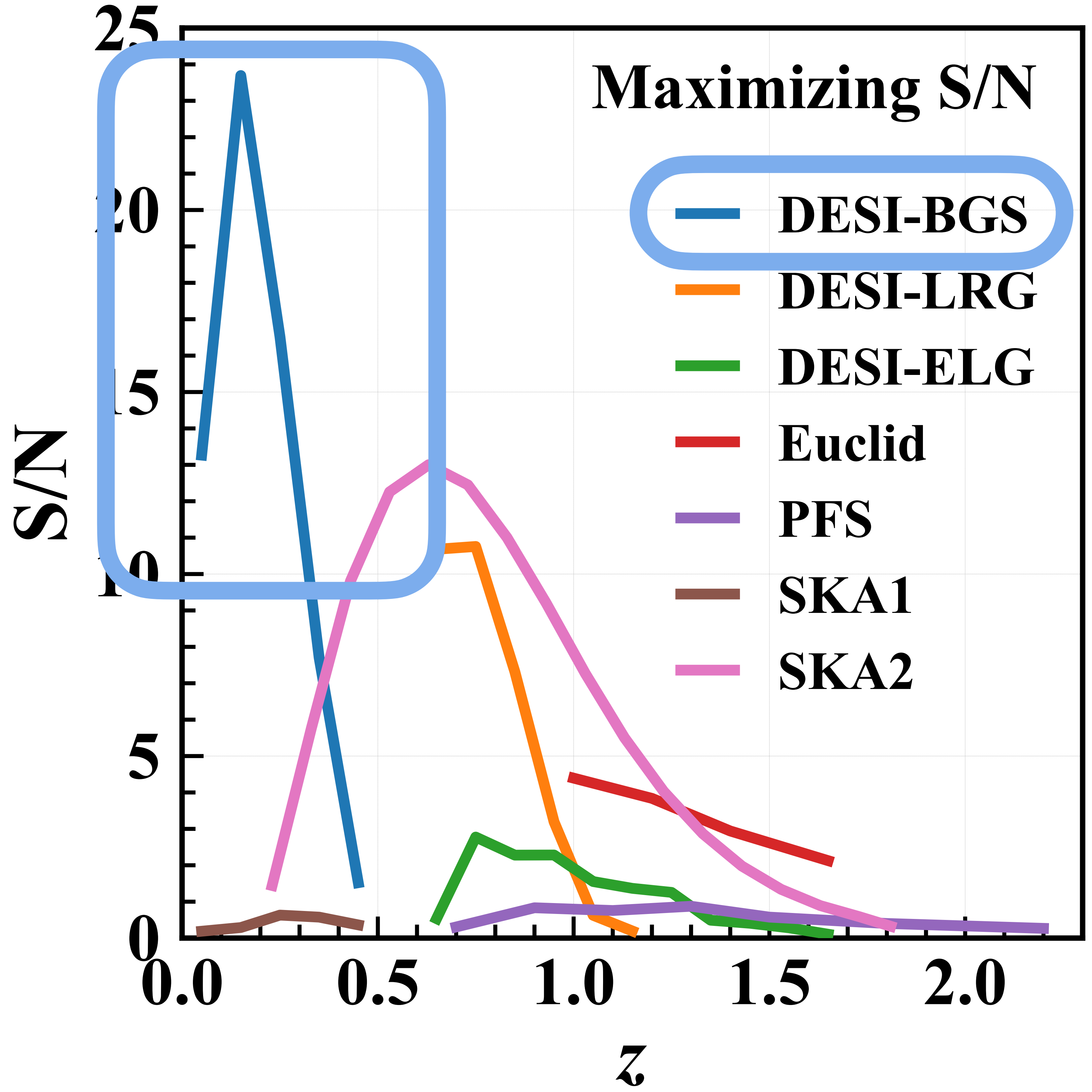


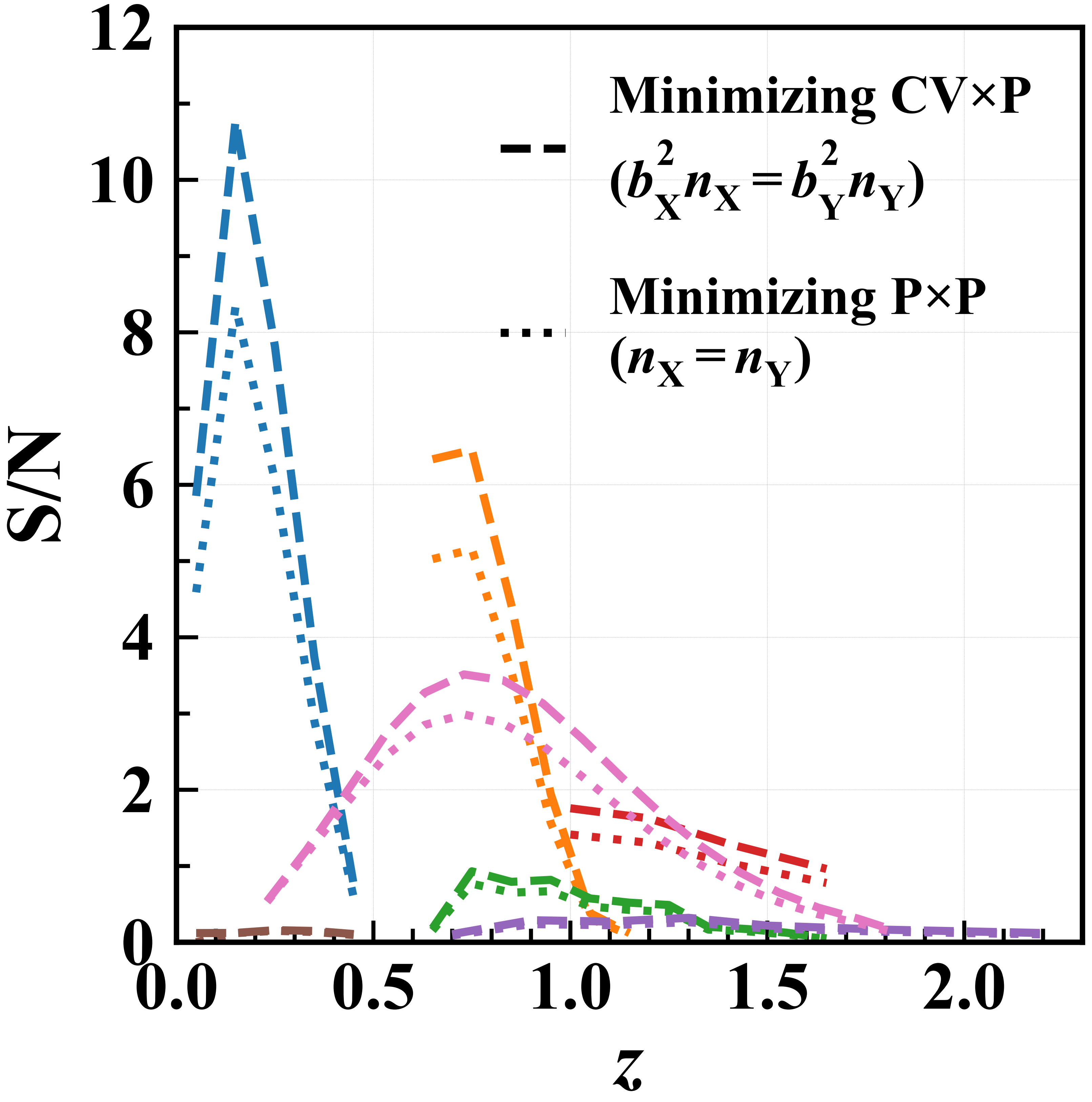
3.4. 方法1

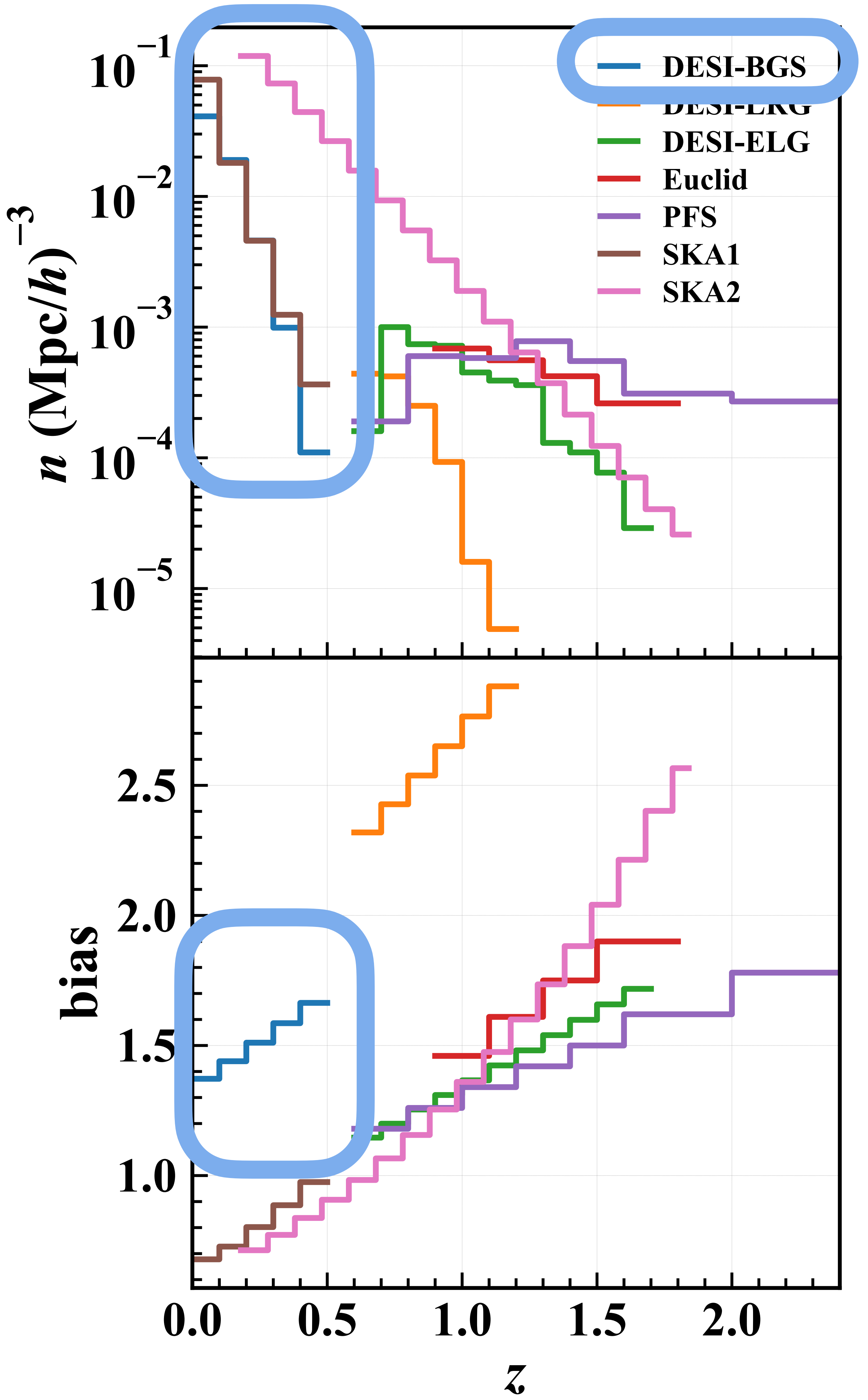
S.Saga, A.Taruya, Y.Rasera, M-A.Breton (2109.06012)

DESI-BGSについて

M*を連続的
(数値的に)得られた最大のSN







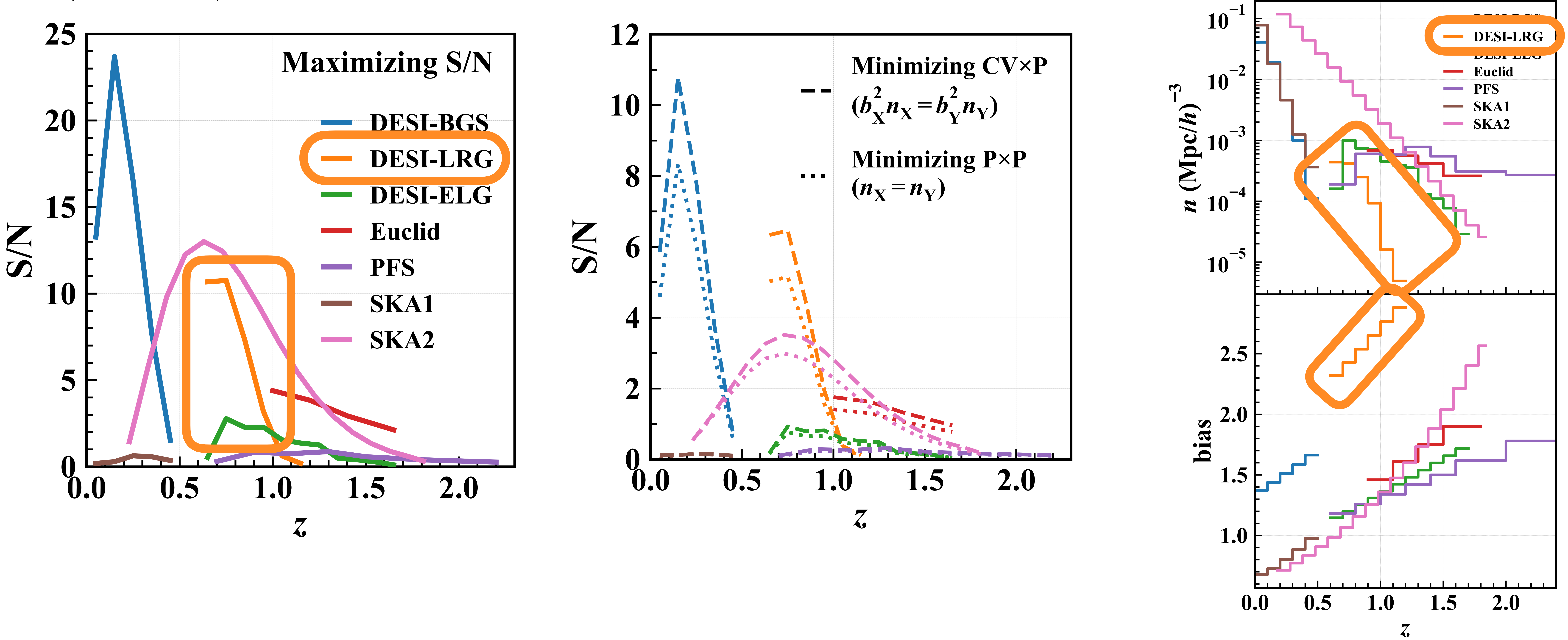
3.4. 方法1

S.Saga, A.Taruya, Y.Rasera, M-A.Breton (2109.06012)

DESI-LRGについて

M*を連続的

(数値的に)得られた最大のSN

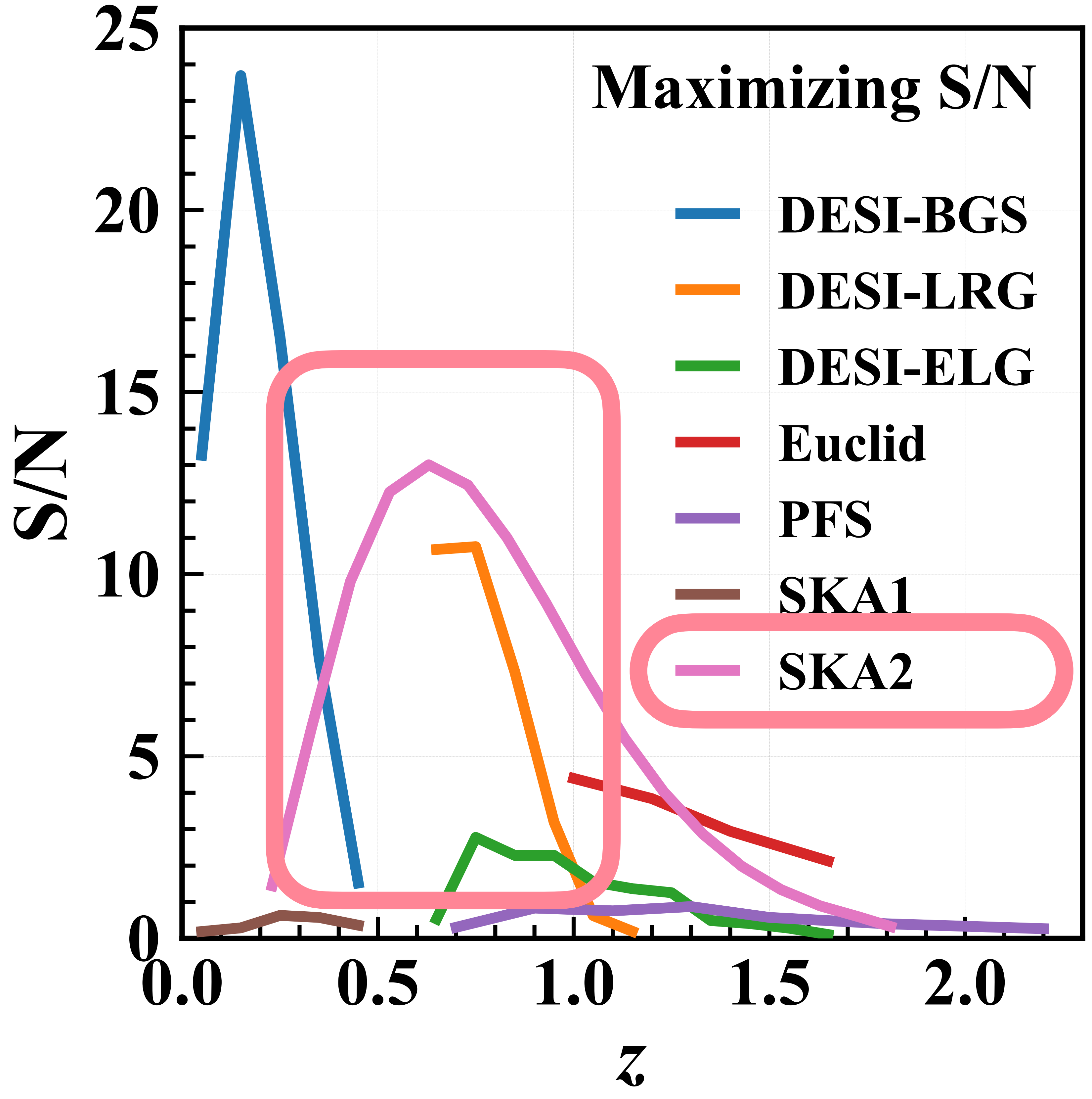


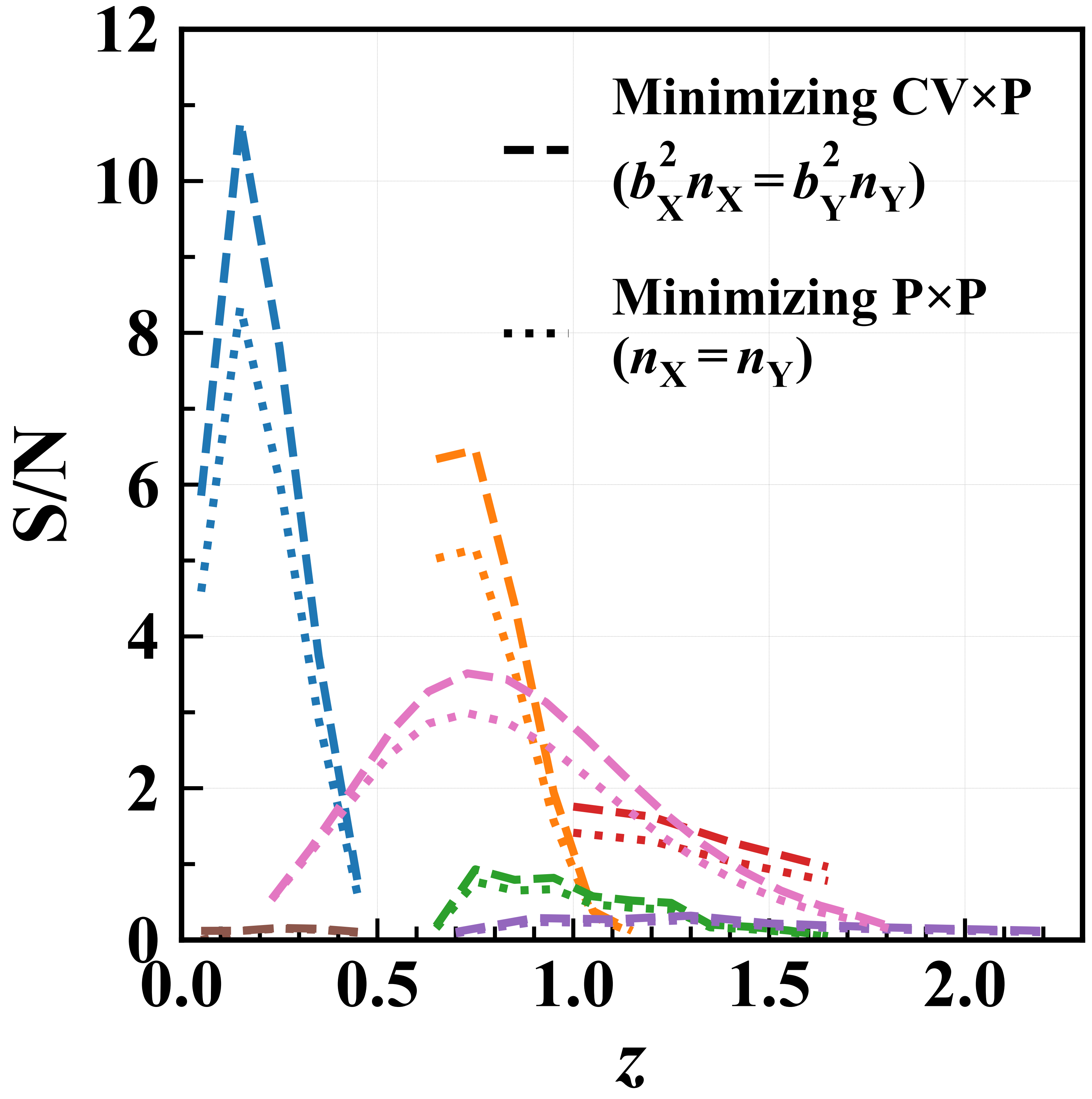
3.4. 方法1

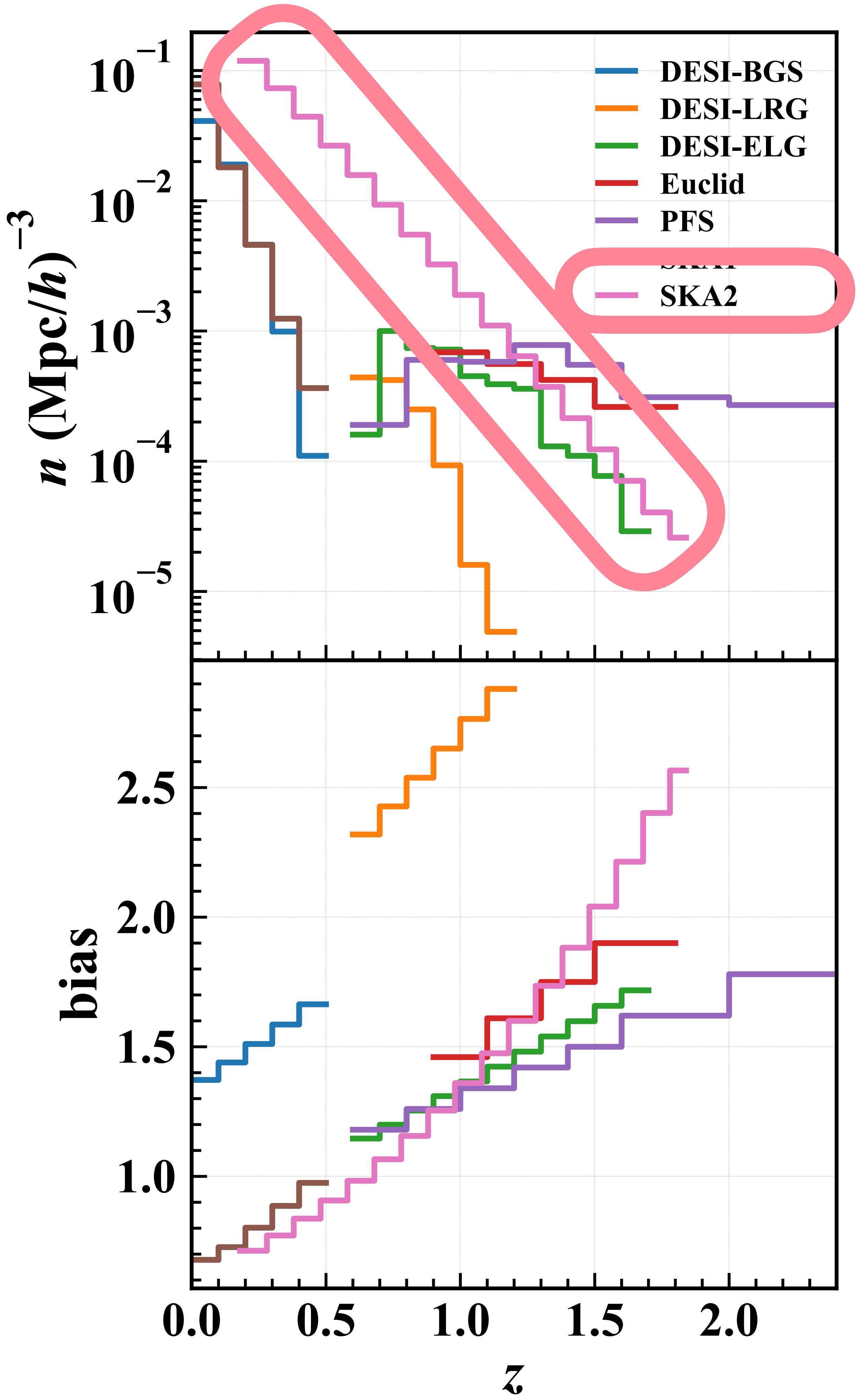
S.Saga, A.Taruya, Y.Rasera, M-A.Breton (2109.06012)

SKA2について

M*を連続的
(数値的に)得られた最大のSN

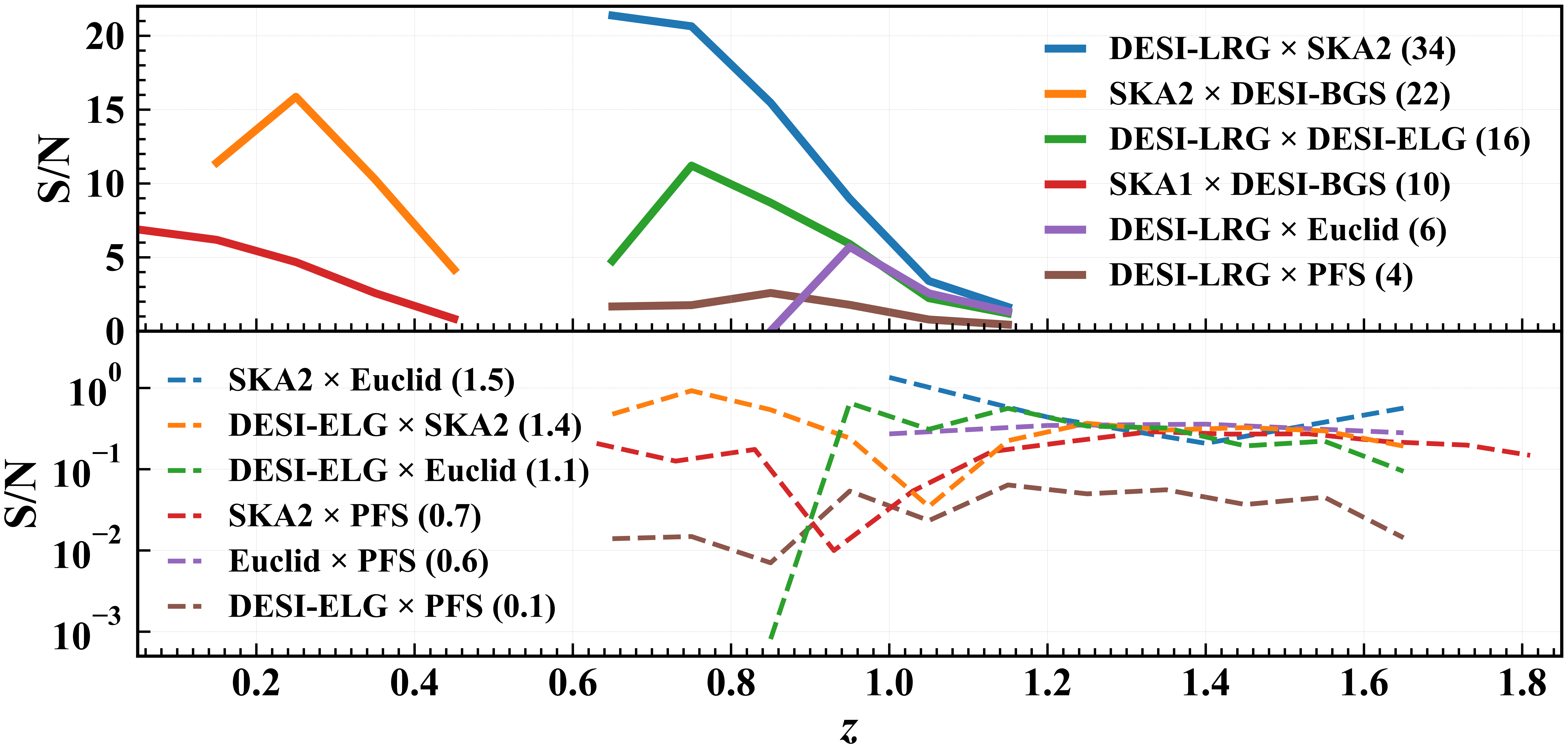


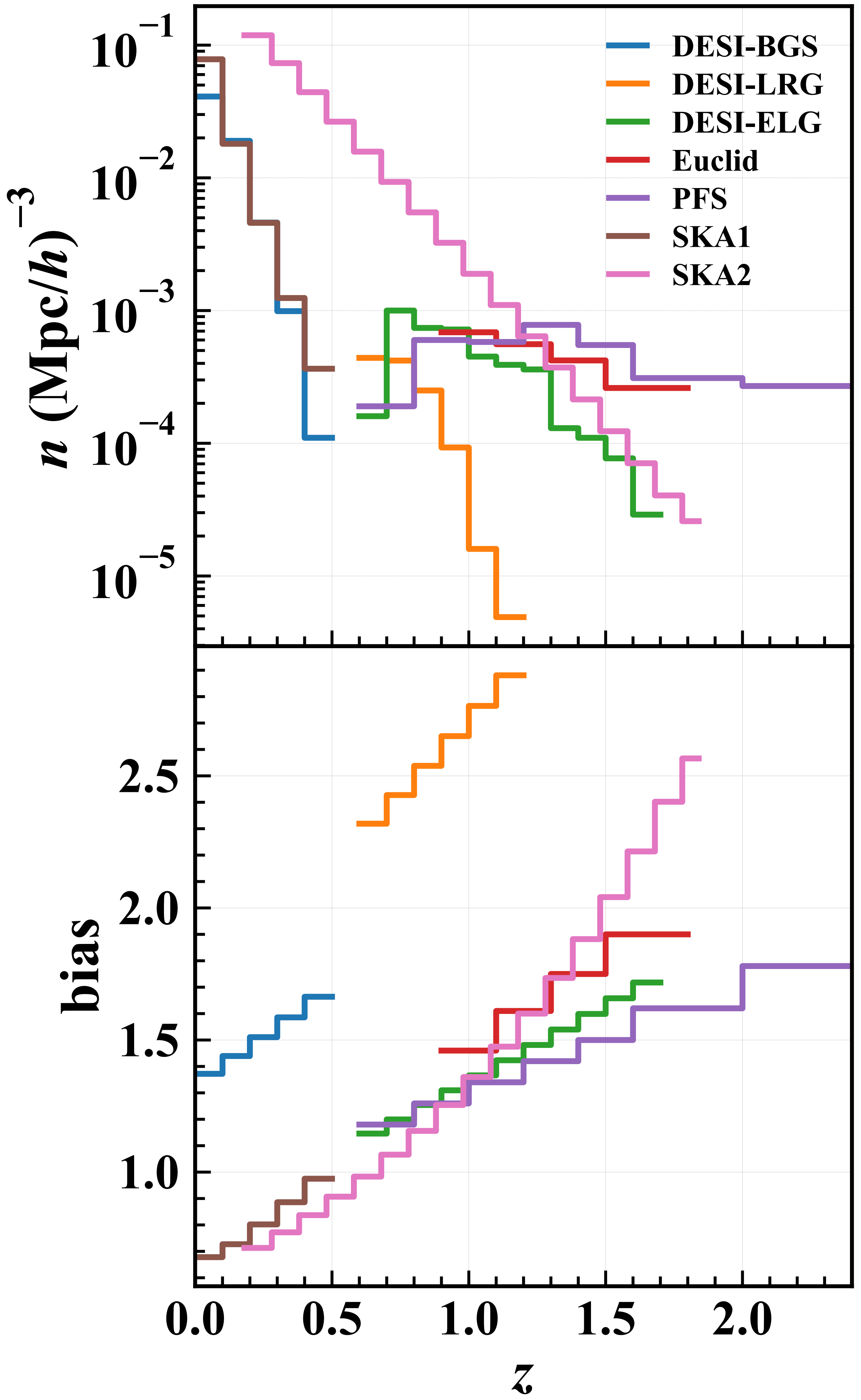




3.5. 方法2

S.Saga, A.Taruya, Y.Rasera, M-A.Breton (2109.06012)





※観測体積が完全にオーバーラップしている場合

目次

4. まとめ

本発表では

宇宙の大規模構造における観測的な特殊・一般相対論の効果・検出可能性を調べた

シミュレーション&解析的モデル

ハローの重力ポテンシャルによる重力赤方偏移効果が、小スケールの双極子的非等方性を支配

検出可能性

多くの将来観測で高S/N=10~20が期待。特にDESI-LRG(大きなバイアス=シグナル大)やSKA2(大きい数密度=ノイズ小)など。

将来

S.Saga et al. in prep.

重力ポテンシャルを測定するプローブとしての応用(eg 宇宙論的Pound–Rebka実験)

ハロー銀河関係のより精密なモデル化

設定をより最適化(サンプルを2つ以上に分割, 他の観測量との組み合わせ, など)することによるSNの改善可能性