すばる HSC と SDSS データの 銀河弱重力レンズとクラスタリングの 大スケール信号を用いた宇宙論統合解析



東京大学/Kavli IPMU 杉山素直(博士2年) 共同研究者:高田昌広,宮武広直,西道啓博,白崎正人,小林洋祐, Rachel Mandelbaum, Surhud More,高橋龍一,大里健, 大栗真宗, Youngsoo Park, and many others in HSC collaboration 2021. Nov. 16, 第10回観測的宇宙論ワークショップ

大規模構造観測と精密宇宙論

• 宇宙の標準模型ACDMは観測とよく合う。しかし...



- - ACDMの破れかもしれない。
 - 検証するにはより精密な宇宙論パラメタの制限が不可欠。



CMBと銀河観測(近傍宇宙)とで宇宙論が不一致する可能性が出てきた。



手前にある物質密度揺らぎによって、背景の銀河の形状が歪められる効果



Abell 2218, Credit: ESA / NASA

重力レンズによる銀河の形状歪み

Biased tracer (銀河など)とは異なり、物質密度揺らぎを直接測ることができる。

 $\gamma \propto \frac{D_A(z_1)D_A(z_1, z_s)}{D_A(z_s)}\delta_m$

<u>銀河弱重力レンズ+銀河クラスタリングの統合解析のメリット</u>

• 大スケールでの関係 $\delta_{g} = b\delta_{m}$ を使うと、

銀河クラスタリング

 $\xi_{\rm gg} = \langle \delta_{\rm g} \delta_{\rm g} \rangle \sim b^2 \langle \delta_{\rm m} \delta_{\rm m} \rangle \sim b^2 \sigma_8^2$

• 銀河弱重力レンズ

 $\xi_{\rm gm} \sim \langle \delta_{\rm g} \gamma \rangle \sim b \langle \delta_{\rm m} \delta_{\rm m} \rangle \sim b \sigma_8^2$

銀河弱重力レンズ and 銀河クラスタリングの統合解析 → 縮退を解き、宇宙論パラメタ σ_8 に制限を与える。



Example



Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC)

<u>高画質</u>: PSF ~ 0.6"

- 銀河の形状を高精度で測定可能
- c.f. SDSS \mathcal{O} PSF ~ 1.0"

<u>広い視野角</u>: FoV ~ 1.5deg

- 満月7個分
- Hubble Space Telescopeの500倍

<u>高い集光力</u>:8.2mの主鏡

• SDSSの11倍



Credit: HSC-SSP, NAOJ





HSC SSP (Subaru Strategic Program)



- ・ 主要な他観測と重複領域を持つ (SDSS/BOSS, ACT, VIKING, GAMA, VVDS, etc...).
- 観測は2014年に始まり2021に完了する見通し
- これまでにデータ (DR1: Aihara et al., 2018, DR2: Aihara et al., 2019, DR3: Aihara et al. 2021).

• Wide Layer (1,400deg², grizy, i_{lim} ~26):弱重力レンズでの宇宙論のための設計(10⁸ galaxies).

HSC Year 1銀河の形状カタログ

- Wide Layer: 6つの領域, 137 deg² (SDSS領域と重複)
- Full-depth, full-color •
- PSF FWHM $\sim 0.6''$
- 10⁷ 個の銀河
- 数密度: $n_g \sim 23$ galaxies/arcmin²

DES : $n_{\rm g} \sim 7$ galaxies/arcmin²

KiDS : $n_{\rm g} \sim 10$ galaxies/arcmin²

• 画像シミュレーションで較正された



銀河弱重力レンズとクラスタリング信号の測定

SDSS III/BOSS 分光銀河サンプル: δ_{g}

- サーベイ面積 ~ 8300deg²
- 3つの赤方偏移bin
 - LOWZ: $z \in [0.15, 0.35]$
 - CMASS1: $z \in [0.43, 0.55]$
 - CMASS2: $z \in [0.55, 0.70]$

・光度で銀河を選択→Volume-limited sample





銀河弱重力レンズ信号: $\Delta \Sigma = \Sigma_{crit} \langle \delta_g \gamma \rangle$

クラスタリング信号: $\xi_{gg}(r) \rightarrow w_p(R)$

銀河弱重力レンズと銀河クラスタリング信号の測定

(本講演) 大スケール解析

- (準)線形領域, $R \gtrsim 10h^{-1}$ Mpc, では $\delta_g \sim b\delta_m$ •
- 理論解釈がしやすい •
- S/Nが低い

小スケール解析(宮武氏の講演)

- 高いS/N gain
- 非線型領域のモデリングが必要



Miyatake et al. (arXiv: 2111.02419)



線形銀河バイアスモデル

 $\delta_{\rm g} = b_1 \delta_{\rm m}$, $(b_1 = {\rm const})$

銀河弱重力レンズ: $\Delta\Sigma(R, z_1) = b_1(z_1) \int_0^\infty \frac{k dk}{2\pi} P_{\rm mm}(k \mid \theta_{\rm cosmo}) J_2(kR)$

銀河クラスタリング: $w_{\rm p}(R, z_{\rm l}) = b_1(z_{\rm l})^2 \int_0^\infty \frac{k \mathrm{d}k}{2\pi} P_{\rm mm}(k \mid \theta_{\rm cosmo}) J_0(kR)$

Note:線形銀河バイアスモデルの特徴

簡単、パラメタが少ない。

#param = 5(宇宙論) + <u>1 × 3(銀河)</u> + 5(nuisance) = 13

- 線形銀河バイアスが大スケールでは良いモデル ←銀河の<u>大スケールのクラスタリングの性質は、重力</u>で決まっている。
- しかし、小スケールでは、線形銀河バイアスでは十分ではなくなる。 → 適切なスケールカットの選択が必要。

モデル:銀河バイアスモデル



宇宙論パラメタ推定を間違えうる要因

- 解析に使うスケール
- 線形銀河バイアスモデルの妥当性
- 銀河物理不定性(モデルがこれらの不定 性を吸収できるか否か)

モデルfittingを実際のデータに適用する前に、 宇宙論を正しく推定できるかどうかを 模擬データを用いて検証する必要がある



$$\mathscr{L}(d \mid \theta) \propto \exp\left[-\frac{1}{2}(m(\theta) - d) \cdot \operatorname{Cov}^{-1} \cdot (m(\theta) - d)\right]$$







宇宙論チャレンジ:模擬信号を用いたテスト



模擬(モック)信号を用いて、線形銀河バイアスモデル が正しい宇宙論パラメタを復元できるか検証した。

• 簡単な線形バイアスモデルでも復元できる。



Sugiyama+(2020), Phys. Rev. D 102, 083520



銀河弱重力レンズはR > 12Mpc/h, クラスタリングは

R > 8 Mpc/hのスケールを使うことで、正しい宇宙論を復元。

銀河物理の不定性を入れてもその効果は大スケールまでは染み 出さない。

→線形銀河バイアスが変化することでこれらの不定性を吸収で きる<u>正しい宇宙論パラメタを復元</u>できる。

宇宙論チャレンジ:模擬信号を用いたテスト

<u>小スケール側のカットオフスケール依存性</u>



銀河物理の不定性に対するテスト



Sugiyama+(2020), Phys. Rev. D 102, 083520





ブラインド解析

ブラインド解析:確証バイアスを避けるための解析

<u>カタログレベル ブラインド</u>

- 3つの銀河形状カタログを用意
- 一つだけ本物、他二つはfake
- しかし解析者はどれが本物か知らない。
- 3つのカタログをunblindまでに全て解析する。

<u>解析レベル ブラインド</u>

- 推定されたパラメタの中心値は見ない。常に中心値からのズレのみ見る。
- 他観測(Planckなど)との比較を行わない。

アンブラインド

- 解析者が全ての系統誤差のテストを行い結果に満足できたらアンブラインドする。 = 中心値を見る、本当のカタログidをopenにする。
- アンブラインド後は結果を変えない(再解析を行わない)。







Baseline 解析の結果



宇宙論パラメタを ~ 10%の統計精度で制限

HSC Year 1の弱重力レンズ、クラスタリング統合解析の結果

<u>系統誤差のテスト</u>

Sugiyama+(2021), in prep.



有意な系統エラーは見つからなかった。

他観測との比較



Sugiyama+(2021), in prep.

<u>ΛCDM</u>

- •本研究の結果は他観測の結果と2*o*以内で無矛盾だった。
- 同じデータベクトル(ただし小さいスケールまで使用)を用いたMiyatake et al. (2021) (次の講演)の結果とも consistent だった。
- 大スケールの解析なのでS/Nが低く、制限は他と比べると弱い。
- HSC fullではsurvey areaが10倍 → 3倍程度制限は良くなる。次の解析で、HSC Y3かつCosmic shearを合わせると S_8 を5%で制限できる見通し。

HSC Year 30 Fisher Forecast 現在進行中









Sugiyama+(2021), in prep.

WCDM

- 暗黒エネルギーの状態方程式, w,は、CMBデータと組み合わせたと き、成長率から制限することができる。
- HSC Y1 $\vec{r} p \vec{v} \cdot (w < -1) \epsilon$ and $ACDM(w = -1) \epsilon$ 2σ level で consistent だった。







<u>弱重力レンズ+クラスタリングの統合解析</u>

- 銀河バイアスを取り除き、宇宙論パラメタ(σ_8)を強く制限。
- 弱重力レンズはSubaru HSCの主要な科学目標の一つである。

<u>Subaru HSC の初年度データを使った弱重力レンズ宇宙論</u>

• <u>測定</u>

- 銀河弱重力レンズとクラスタリングの信号を測定した。
- <u>モデル検証</u>

 - S/N低いがconservativeな制限を与える。
- <u>実データ解析</u>
 - ブラインド解析→確証バイアスfree

 - 他観測とconsistent、<u>ACDM</u>ともconsistentであった。

<u>HSC Year 3 (~ 450deg²)の解析</u>



•HSC Year 1の銀河形状カタログとSDSS III/BOSSの分光観測カタログから、

線形銀河バイアスモデルの結果は、銀河バイアスの不定性の影響を受けにくい。

• HSC Y1 + BOSSのデータから、<u>10%程度の統計精度</u>で宇宙論パラメタを決めた。

•弱重力レンズ,クラスタリング,Cosmic shearの 3×2 pt解析で S_8 を5%で制限できる見込み。