

すばるHSCによる物理的宇宙論

(... after 10yrs efforts ...)

高田昌広

(Kavli IPMU)

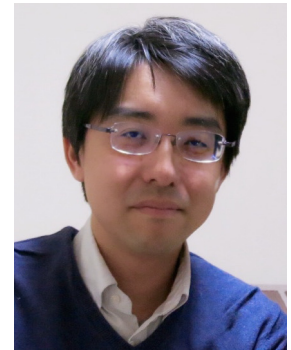
On behalf of HSC
collaboration



宮武広直
(名古屋)



日影千秋
(IPMU)



大栗真宗
(UTokyo/IPMU)

The Large-Scale Structure of the Universe

by

P.J.E. Peebles

*Princeton Series
in Physics*



Jim Peebles

宇宙論を物理学の一つの分野、
実証的科学に押し上げた。
理論を実験（観測）で検証。

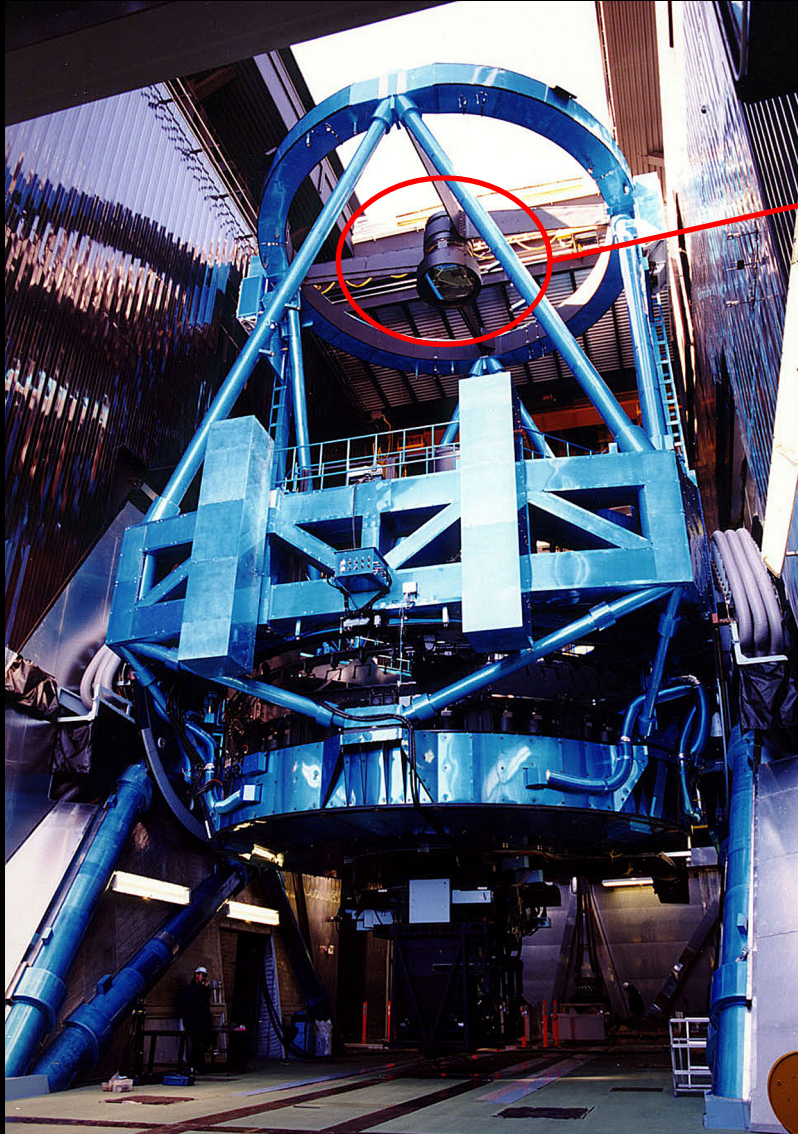
すばるで物理学宇宙論を！

8.2m すばる望遠鏡

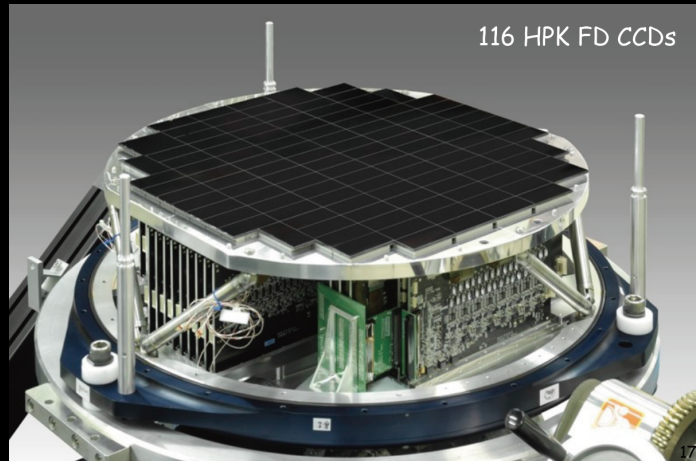


@ summit of Mt. Maunakea (4200m), Big Island, Hawaii

Hyper Suprime-Cam (HSC)



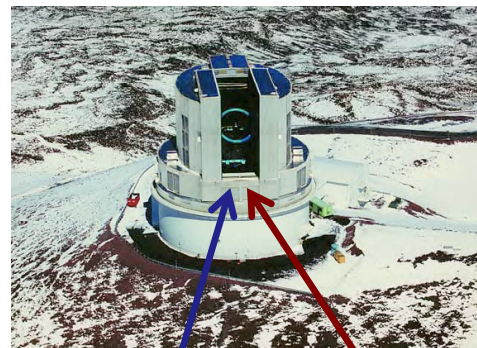
- ・ 世界最大のデジタルカメラ
- ・ 高さ3m
- ・ 重さ3トン
- ・ 104 CCDs
(約10億画素)





SuMIRe = Subaru Measurement of Images and Redshifts

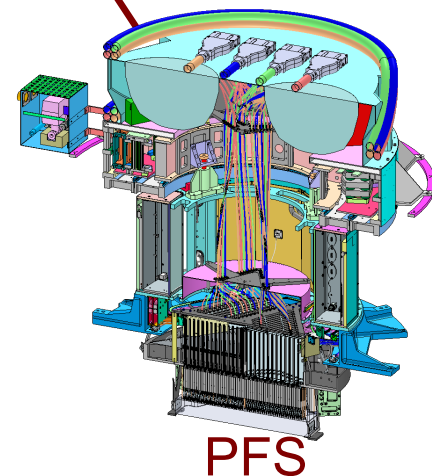
- 超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam: HSC, 2014 -): 直径1.5度の視野
- 超広視野主焦点多天体分光器 Prime Focus Spectrograph: PFS, 建設中): 直径1.3度の視野内で同時に約2400個の天体を同時分光
- すばるHSC&PFSは強力なサーベイ望遠鏡・装置 (宇宙の国勢調査)
- HSCサーベイ (2014-): 約10億個の銀河像のイメージ
- PFSサーベイ(2023-): 約400万個の銀河の分光観測 (距離測定)
- 宇宙膨張が減速から加速期の宇宙の国勢調査 ($\leftrightarrow$ SDSS @ $z < 0.6$)



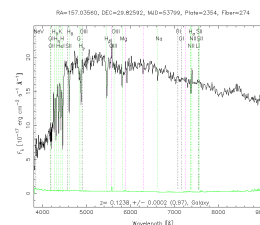
Subaru (NAOJ)



HSC



PFS



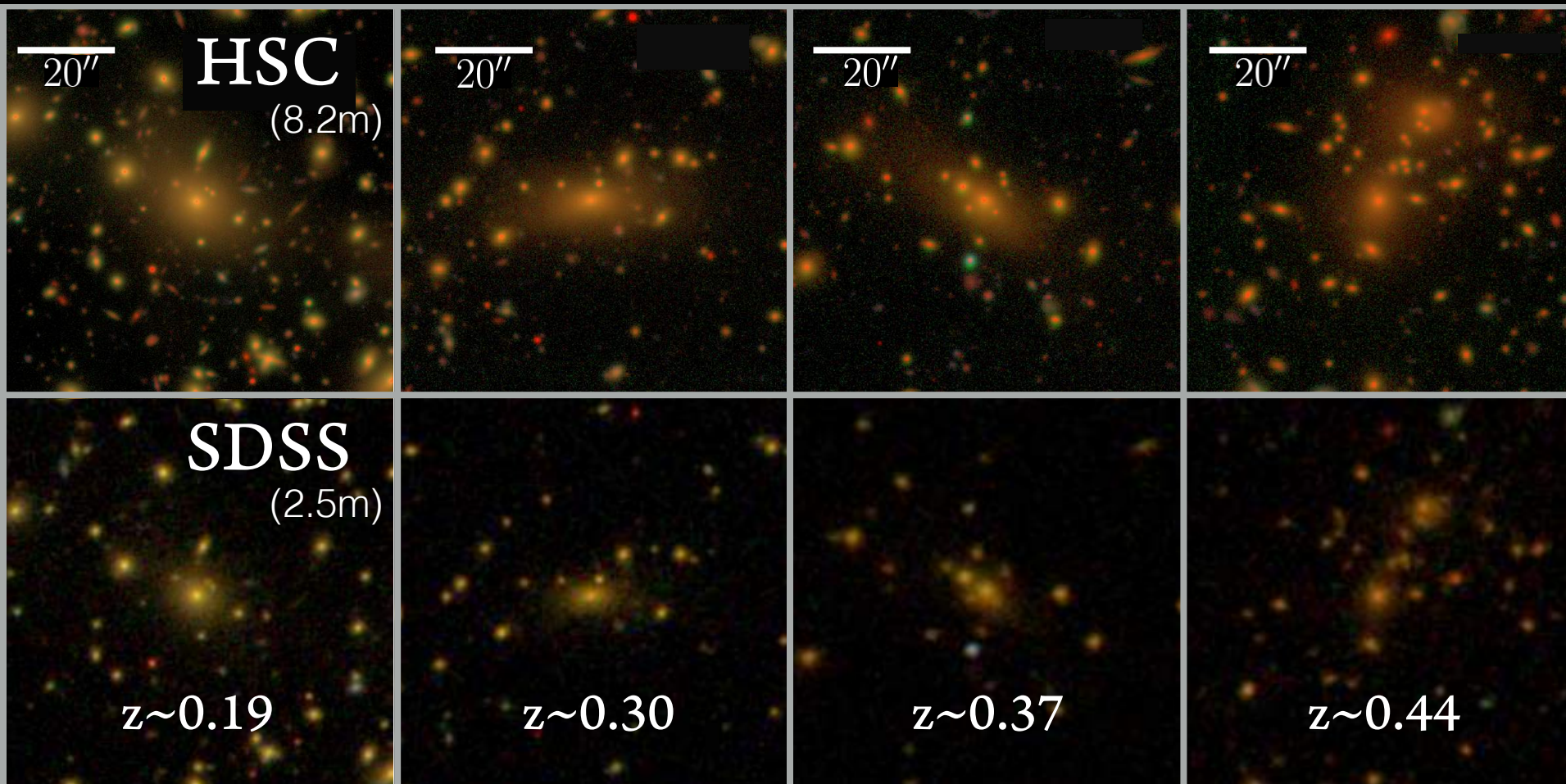
wide

Hyper Suprime-Cam FoV

- Fast
- a cos



~50,000



Huang et al. 2017

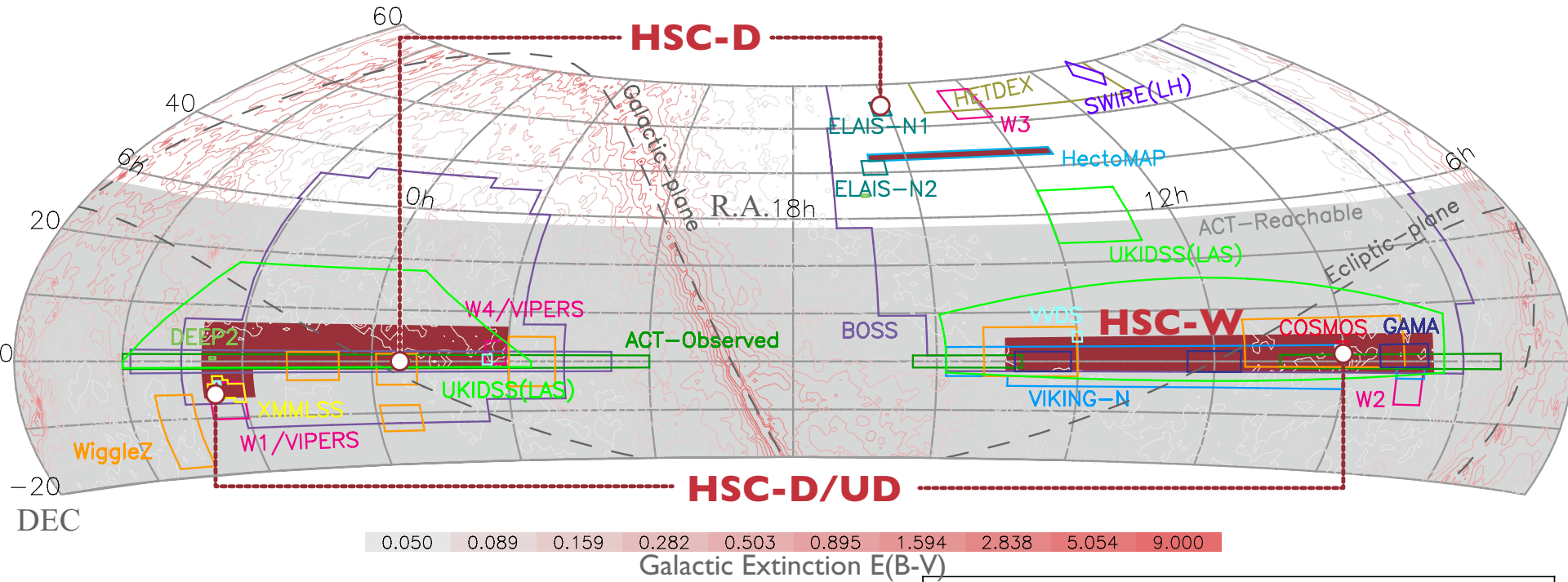
Subaru-330-nights HSC project (2014 -)

すばる史上最大の大型観測プロジェクト

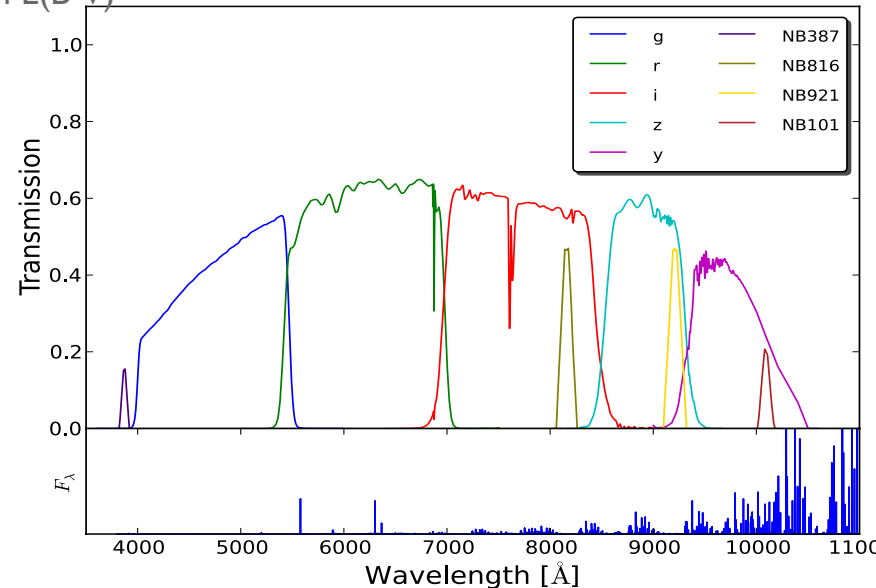


国際共同研究（日本、台湾、プリンストン大学）

HSCサーベイ領域

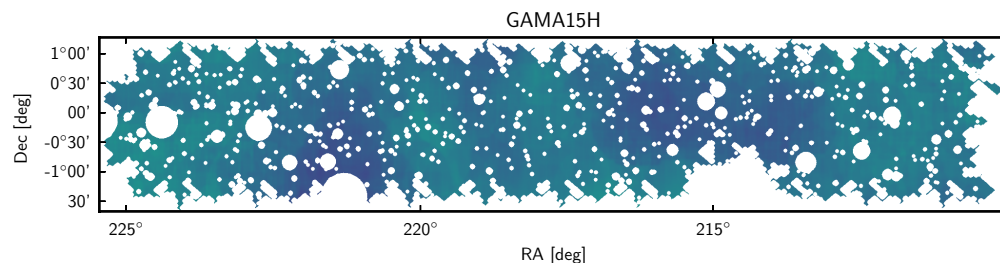
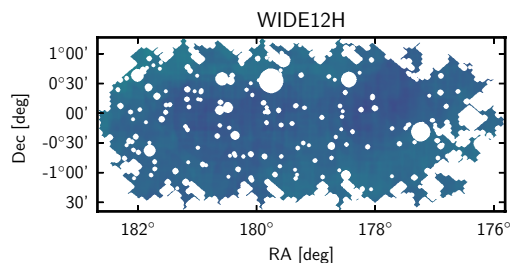
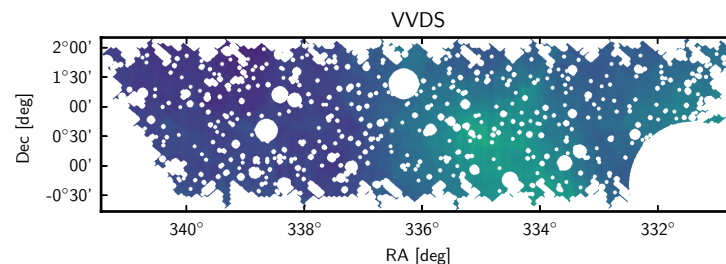
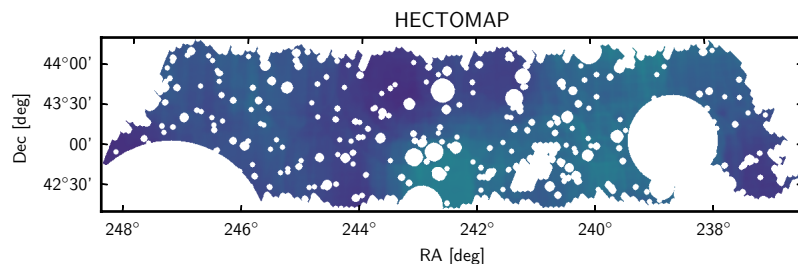


- 2014 – 2022(?)
- Three survey layers
 - Wide ($i \sim 26$, grizy, 1400 deg^2):
全天の5%。各領域を5色でイメージング
 - Deep ($i \sim 27$, grizy+NBs, 28 deg^2)
 - Ultra-D ($i \sim 28$, grizy+NBs, 3.5 deg^2)



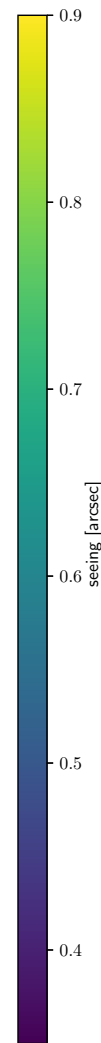
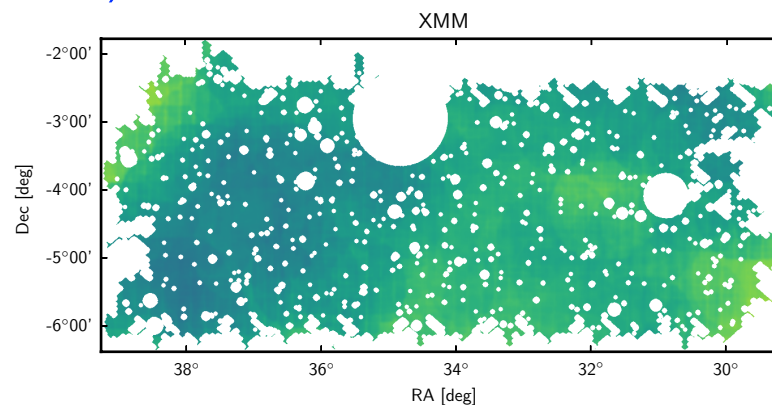
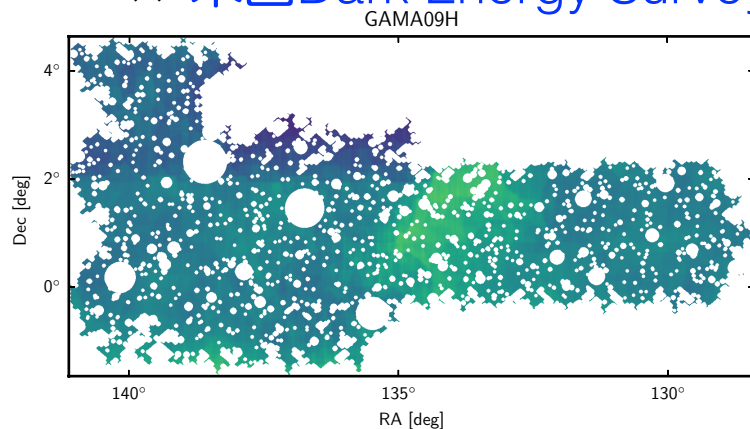
Subaru HSC = superb image quality

HSC-Y1データ。6 fields (~140 sq. deg. in total)



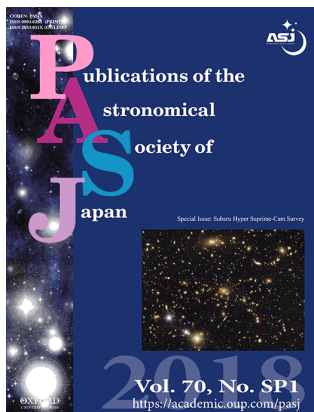
Subaru HSC typically **0.6" seeing** FWHM (spatial resolution)

⇔ 米国Dark Energy Survey (DES): ~0.9"



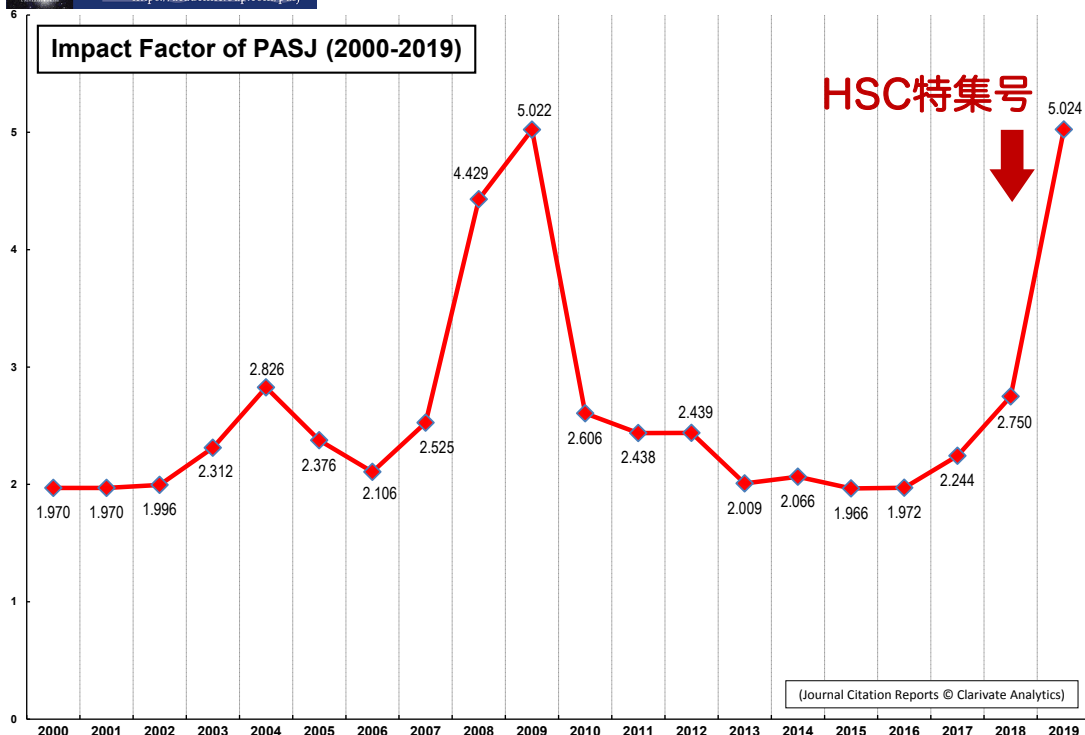
HSC survey = Legacy-valued survey

- 校正済みHSCデータを全世界に公開(国立天文台：田中賢幸さんチーム)：Public Data Release 1 (PDR1) 2017, PDR 2 2019



PASJ 日本天文学会欧文研究報告

すでにHSCの成果が様々な波及効果



COLLECTION

High Impact Articles From PASJ

We are delighted to announce that PASJ's latest Impact Factor has increased to 5.024, up by 82.7% from last year! To celebrate this new Impact Factor we have curated a collection of some of the most highly cited, most read, and most discussed articles from recent years and made them free to read online until June 30th, 2021.

Most Cited Most Read Most Discussed

MOST CITED

The Hyper Suprime-Cam SSP Survey: Overview and survey design

Hiroaki Aihara, Nobuo Arimoto, Robert Armstrong, Stéphane Arnouts, Neta A Bahcall, et al.
Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, Issue SP1, January 2018, S4,
<https://doi.org/10.1093/pasj/psx066>

First data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program

Hiroaki Aihara, Robert Armstrong, Steven Bickerton, James Bosch, Jean Coupon, et al.
in Journals
Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, Issue SP1, January 2018, S8,
<https://doi.org/10.1093/pasj/psx081>

The Hyper Suprime-Cam software pipeline

James Bosch, Robert Armstrong, Steven Bickerton, Hisanori Furusawa, et al.
in Journals
Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, Issue SP1, January 2018, S5,
<https://doi.org/10.1093/pasj/psx080>

Hyper Suprime-Cam: System design and verification of image quality

Satoshi Miyazaki, Yutaka Komiya, Satoshi Kawanomoto, Yoshiyuki Doi, et al.
Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 70, Issue SP1, January 2018, S1,
<https://doi.org/10.1093/pasj/psx063>

MOST DISCUSSED

Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data

Chiaki Hikage, Masamune Oguri, Takashi Hamana, Surhud More, Rachel Mandelbaum, et al.
Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 71, Issue 2, April 2019, 43,
<https://doi.org/10.1093/pasj/psz010>

重力レンズ歪み効果 (shear)



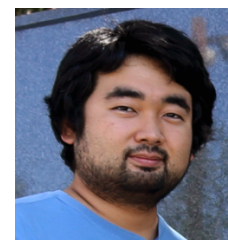
Credit: NHK

HSC銀河形状カタログ

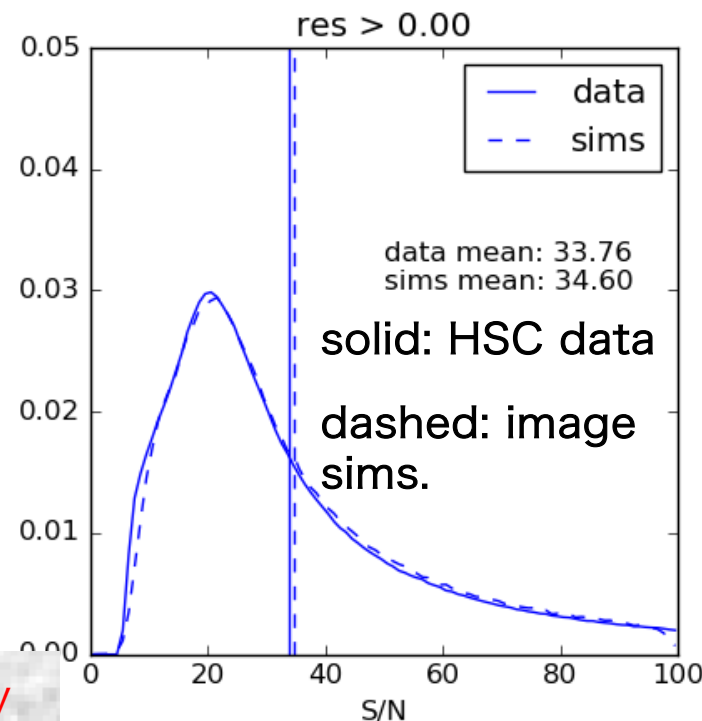
- ・ 銀河の形状を測るための専用、自動、高精度解析パイプラインの開発
- ・ ハッブル宇宙望遠鏡のデータなどを用いた詳細なイメージシミュレーションを用いたテスト、検証
- ・ 約1000万個の銀河の形状カタログ
(~20 gals/sq. arcmin., ~140 sq. deg.
⇔ ~5 gals/sq. arcmin, DES)
- ・ 全ての弱重力レンズ研究の基礎カタログ



R. Mandelbaum
(CMU)



宮武広直
(名古屋)



Input galaxy in
image simulation

real HSC galaxy

simulated galaxy
image with noise

	object_id	parent_id	ira	idec	iflux_kron	iflux_kron_err	iflux_kr...	imag_kron	imag_kron_err	imag_cr
1	73979570428054640	0	213.7985	51.84384	8.504140E-29	4.593317E-31	☐	21.5759	0.005864	21.63
2	73979570428054766	0	213.80921	51.84618	1.596781E-29	6.690010E-31	☐	23.3919	0.045489	23.4
3	73979570428054794	0	213.81307	51.84673	3.588489E-29	6.978075E-31	☐	22.5127	0.021113	22.5
4	73979570428054844	0	213.81702	51.84728	2.587372E-29	7.223377E-31	☐	21.0057	0.034431	23.20
5	73979570428055234	0	213.80922	51.85532	1.222690E-29	4.107814E-31	☐	23.6817	0.036477	23.6
6	73979570428055285	0	213.89554	51.85558	1.244757E-29	3.819837E-31	☐	23.6623	0.033318	23.5
7	73979570428055331	0	213.80149	51.85738	7.723727E-31	2.396201E-30	☐	26.6804	3.36838	24.2
8	73979570428055455	0	213.8055	51.85954	7.489265E-30	6.370268E-31	☐	24.2139	0.092351	24.10
9	73979570428055529	0	213.79617	51.86112	1.142162E-29	6.177813E-31	☐	23.7557	0.058726	24.0
10	73979570428055561	0	213.79818	51.86168	5.524251E-30	3.560247E-31	☐	24.5443	0.069973	24.4
11	73979570428055570	0	213.88059	51.8612	7.356544E-30	3.634025E-31	☐	24.2333	0.053634	24.1
12	73979570428055601	0	213.79551	51.86271	5.253717E-29	5.235109E-31	☐	22.0988	0.010819	22.10
13	73979570428055610	0	213.82333	51.86247	1.097313E-29	3.973071E-31	☐	23.7992	0.039312	23.70
14	73979570428055710	0	213.82804	51.86456	2.656856E-29	5.525464E-31	☐	22.8391	0.02258	22.8
15	73979570428055791	0	213.79094	51.86662	1.471843E-29	9.626954E-31	☐	23.4803	0.071015	23.90
16	73979570428055860	0	213.88954	51.86709	1.084344E-29	7.116006E-31	☐	23.8121	0.071251	24.0
17	73979570428055936	0	213.82123	51.86912	1.042733E-29	5.450464E-31	☐	23.8546	0.056752	23.8
18	73979570428055959	0	213.79837	51.86971	9.101518E-30	5.423166E-31	☐	24.0022	0.064694	24.0
19	73979570428055966	0	213.88424	51.86908	1.167941E-29	6.259547E-31	☐	23.7314	0.05819	23.80
20	73979570428056010	0	213.79016	51.87074	6.363427E-30	4.339140E-31	☐	24.3908	0.074035	24.30
21	73979570428056113	0	213.83133	51.87251	1.160774E-29	4.764544E-31	☐	23.7381	0.044565	23.7
22	73979570428056185	0	213.78598	51.87434	1.052555E-28	8.382704E-31	☐	21.3444	0.008647	21.40
23	73979570428056199	0	213.88646	51.87352	9.360481E-30	4.508771E-31	☐	23.9718	0.052298	23.9
24	73979570428056219	0	213.89283	51.87387	1.408683E-29	6.372821E-31	☐	23.528	0.049118	23.60
25	73979570428056231	0	213.7967	51.87504	1.658527E-30	2.424954E-30	☐	25.8507	1.58747	24.30
26	73979570428056251	0	213.79243	51.87547	9.509173E-30	5.551205E-31	☐	23.9546	0.063382	23.90
27	73979570428056257	0	213.88499	51.8749	-1.862690E-31	1.933658E-30	☐			24.4
28	73979570428056342	0	213.79918	51.87717	1.313530E-29	4.186944E-31	☐	23.6039	0.034608	23.60
29	73979570428056377	0	213.88431	51.8772	1.413942E-29	6.095634E-31	☐	23.5239	0.046807	23.60
30	73979570428056383	0	213.79355	51.87816	2.612706E-29	5.893613E-31	☐	22.8573	0.024491	22.70
31	73979570428056387	0	213.82763	51.87793	5.986320E-30	4.392153E-31	☐	24.4571	0.07966	24.50
32	73979570428056520	0	213.79641	51.88102	1.180581E-29	6.500737E-31	☐	22.7100	0.000000	22.80
33	73979570428056563	0	213.80574	51.8818	1.907350E-28		☐			
34	73979570428056601	0	213.82372	51.88231	1.067101E-28		☐			
35	73979570428056775	0	213.88284	51.88498	1.303106E-29		☐			
36	73979570428056779	0	213.82172	51.88564	1.089255E-29		☐			
37	73979570428056788	0	213.84372	51.88556	8.398296E-30		☐			
38	73979570428056816	0	213.88021	51.88585	6.754212E-30		☐			
39	73979570428056827	0	213.87206	51.8861	1.061777E-29		☐			
40	73979570428056833	0	213.79234	51.88735	5.436434E-29	6.371324E-31	☐	22.0617	0.012724	22.10
41	73979570428056846	0	213.80921	51.88721	1.067762E-28	6.436782E-31	☐	21.3288	0.006545	21.20
42	73979570428056850	0	213.83987	51.88708	4.627139E-29	9.125668E-31	☐	22.2367	0.021413	22.4
43	73979570428056858	0	213.85303	51.88695	1.590651E-29	5.116353E-31	☐	23.3961	0.034923	23.30
44	73979570428056864	0	213.84775	51.88714	9.348670E-30	1.051104E-30	☐	23.9731	0.122073	24.4
45	73979570428057024	0	213.79882	51.89079	6.393567E-30	6.979971E-31	☐	24.3856	0.118532	24.4
46	73979570428057101	0	213.80487	51.89223	1.388592E-29	5.331566E-31	☐	23.5436	0.041687	23.5
47	73979570428057110	0	213.80551	51.89564	8.425016E-30	1.005005E-30	☐	24.0047	0.100000	24.10

for us, galaxies = numbers

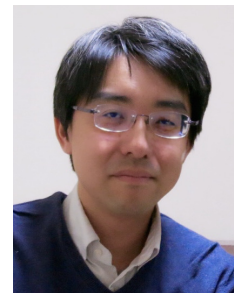
全ての物理量に誤差

(例えば、銀河の位置決定精度

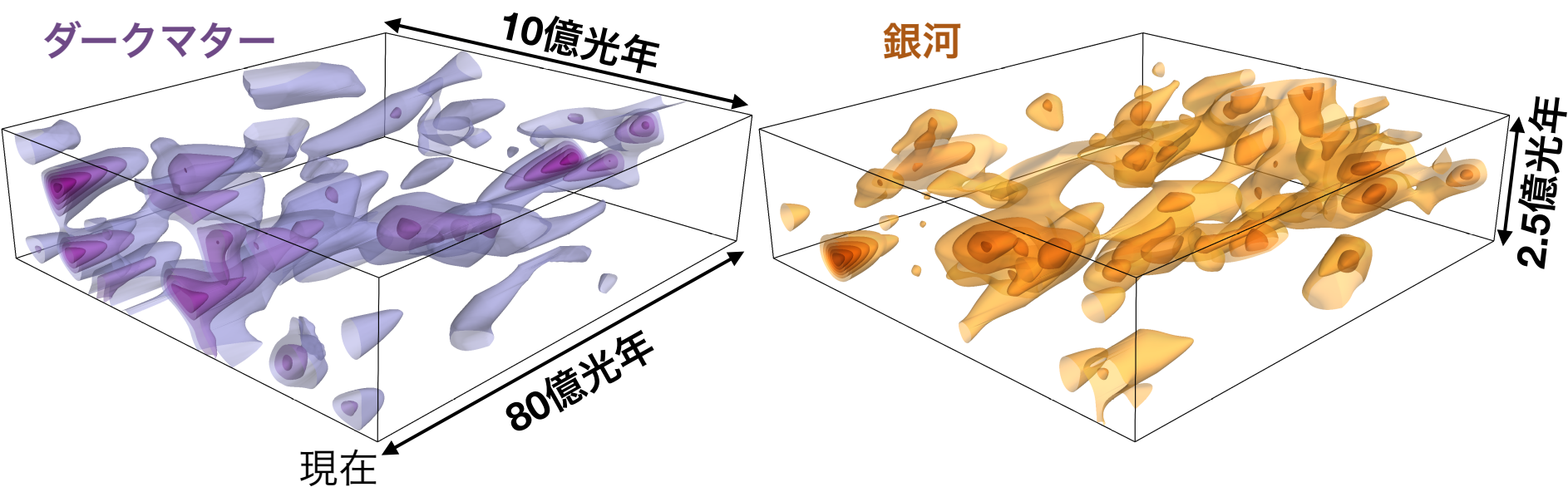
~100mas@i~24, 1度角の1

世界最大のダークマターの3次元地図

Oguri et al. PASJ 2018



大栗真宗
(東京大/IPMU)



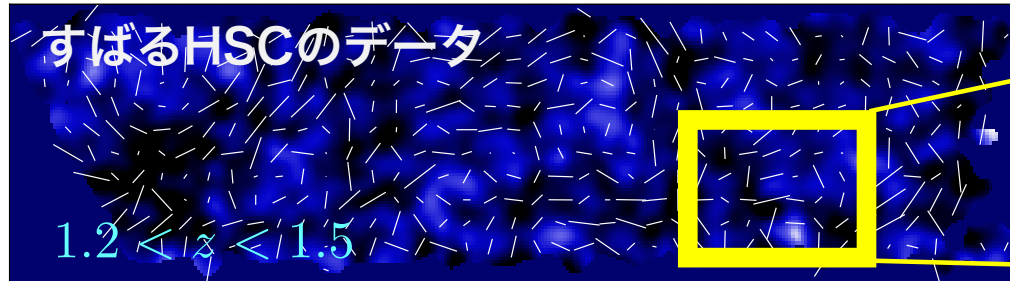
銀河がダークマターが密集するところに形成しているシナリオ(CDMモデル、Peeblesが提唱した理論)を**すばるデータから確認**

ある一つの領域 (VVDS field)

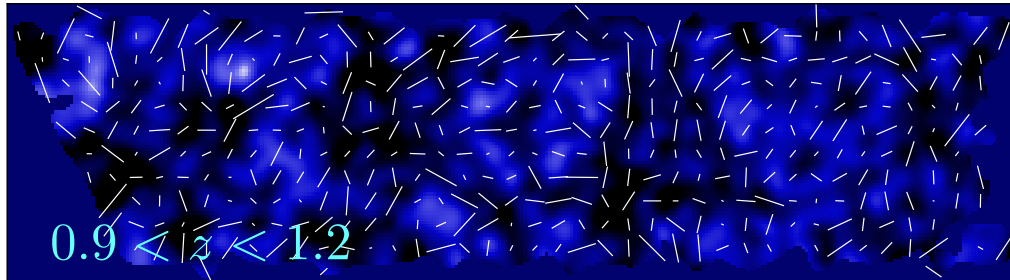
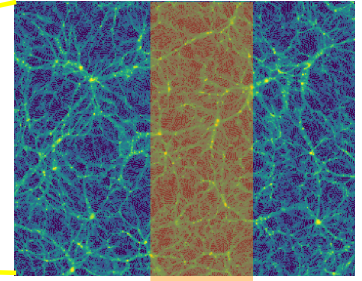
重力レンズトモグラフィ

~1000万個の銀河の形状+測光的赤偏移（個々の銀河までの距離）

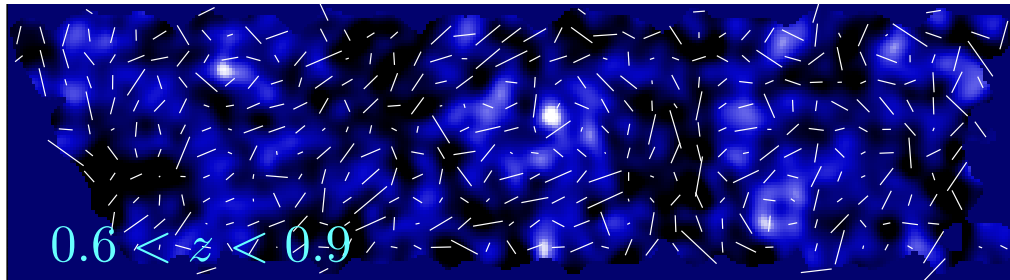
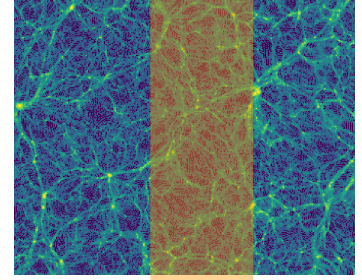
CDMモデルの
シミュレーション



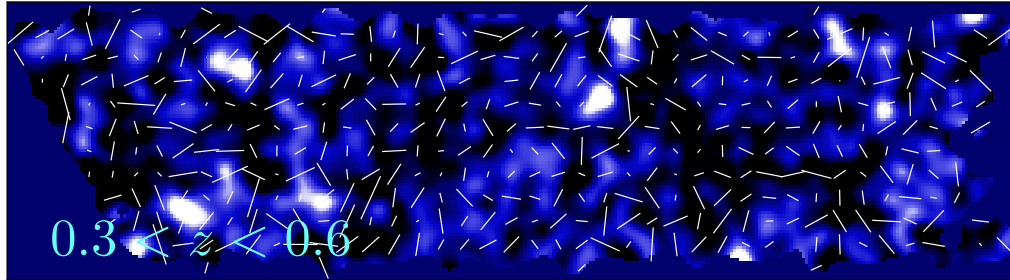
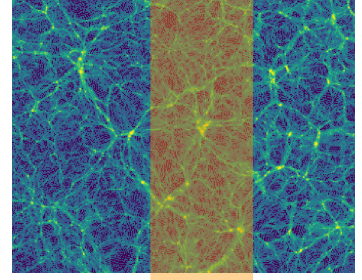
約60億年前



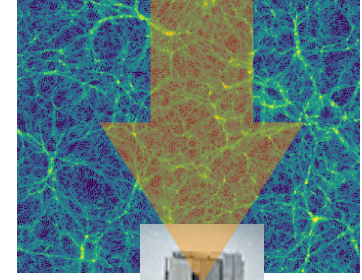
約50億年前



約40億年前

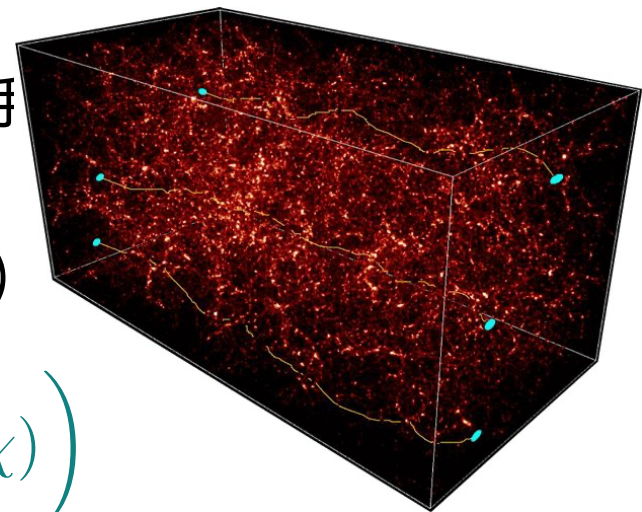


約30億年前



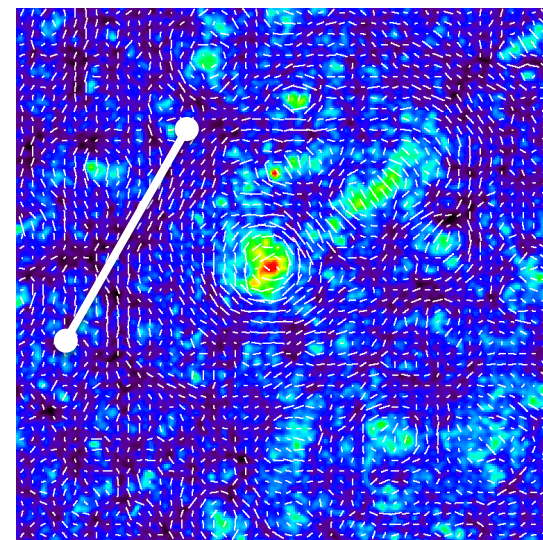
重力レンズトモグラフィ

- 実際には統計解析が必要。パワースペクトル手法（2点相関関数法のフーリエ版。cf. CMB）
- Λ CDMの理論予言(Takahashi et al. 2012)



$$C_\ell = \int d\chi W_{\text{GL}}(\chi)^2 \chi^{-2} P_{\text{m}}^{\text{NL}} \left(k = \frac{\ell}{\chi}; z(\chi) \right)$$

- 全質量（主にダークマター）に感度がある
 - 宇宙論的距離にも感度がある
- ターゲットにするレンズ効果の信号は小さい。考えられる系統誤差を考慮、またmarginalizeする必要がある。測光的赤方偏移、銀河形状、銀河形状間の固有の相関、理論モデル…
- 如何に信頼性、客観性を担保するかがチャレンジ ⇒ ブラインド解析



Pseudo-power spectrum estimator
(Hikage, MT, Hamana, Spergel 11)

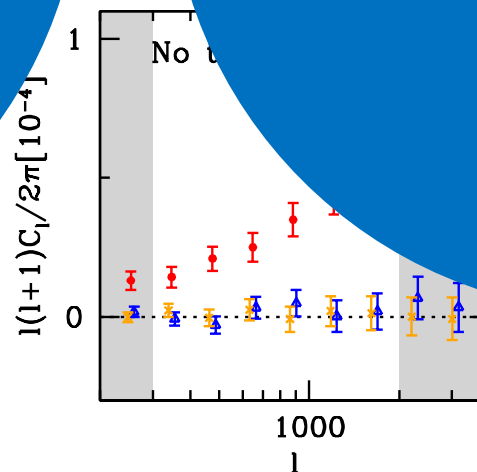
$$\tilde{E}_{\ell m} \pm i\tilde{B}_{\ell m} = \int d^2\mathbf{n} w(\mathbf{n}) [\gamma_1(\mathbf{n}) \pm i\gamma_2(\mathbf{n})] Y_{\ell m}(\mathbf{n})$$

$$\hat{C}_l^{EE} = \mathbf{M}_{ll'}^{-1} [C_{l'}^{EE} - N_{l'}]$$

137 sq. deg.

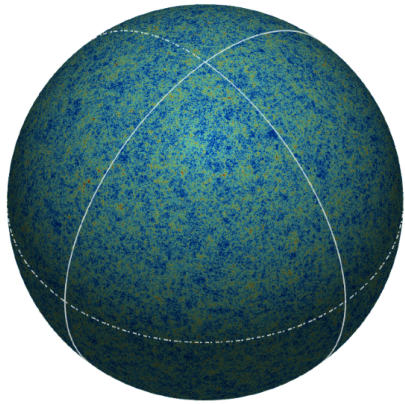
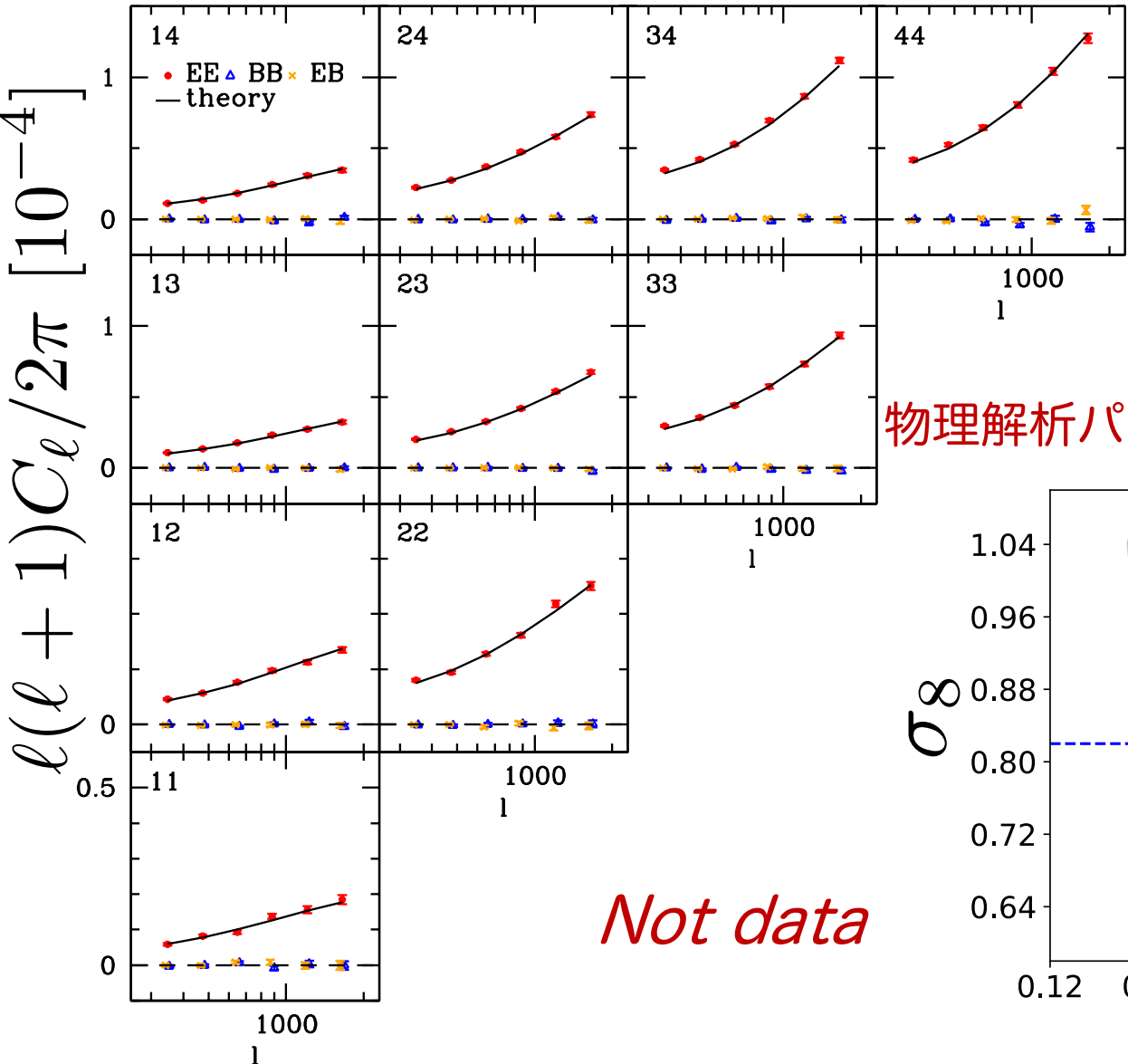
Before lensed

After lensed
(only **0.3%** axis ratio
in ellipticity)



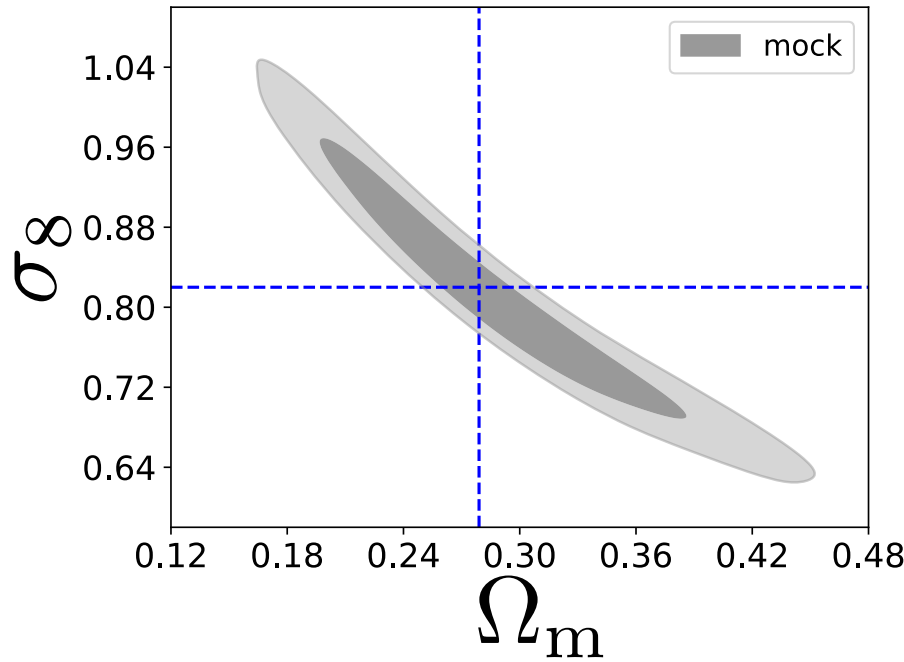
Hikage, Oguri+ 18

HSC mocksを用い検証



$$C_{\ell}^{\text{theory}} \leftrightarrow C_{\ell}^{\text{sim}}$$

物理解析パイプラインのテスト・検証

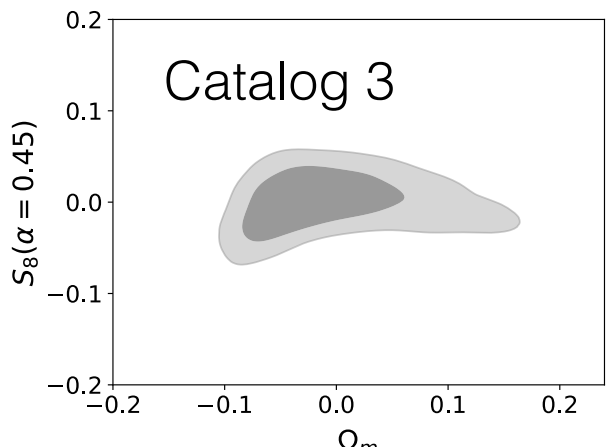
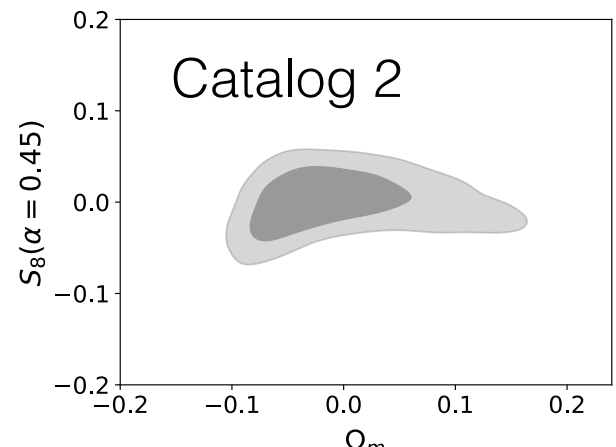
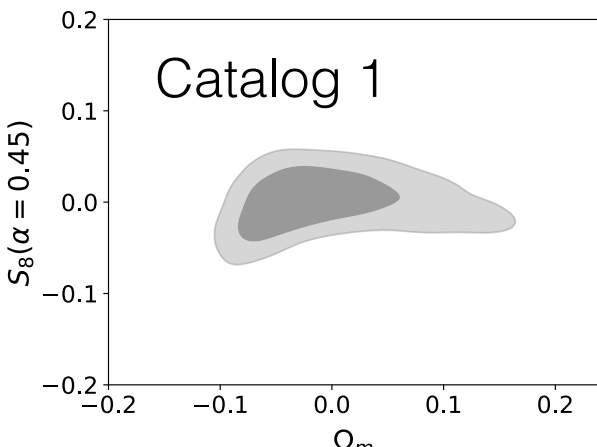
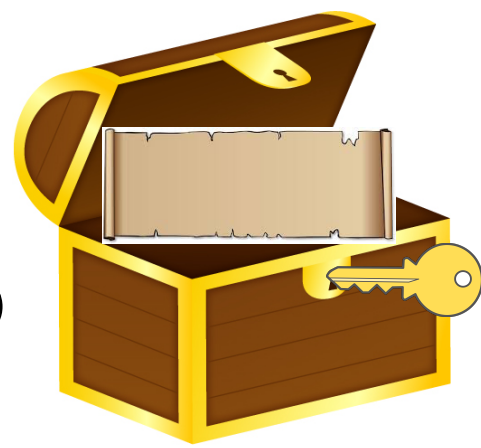


Not data

ブラインド解析

- 「**検証バイアス**」を避けるため
- 3つの銀河形状カタログを用意**：1つは本物、2つは各々の銀河の形状を変更（研究者はどれが本物かわからない; GnuPG key使用）
- 推定後のパラメータの値は見ない**
- 他の宇宙論結果と比較しない**（例えばCMB Planckの宇宙論パラメータと比較しない）
- Unblind後は結果を変えない**と約束（事前に論文を準備）
- 一年以上テスト、テスト、テスト、...

すばるのデータでは初めて？

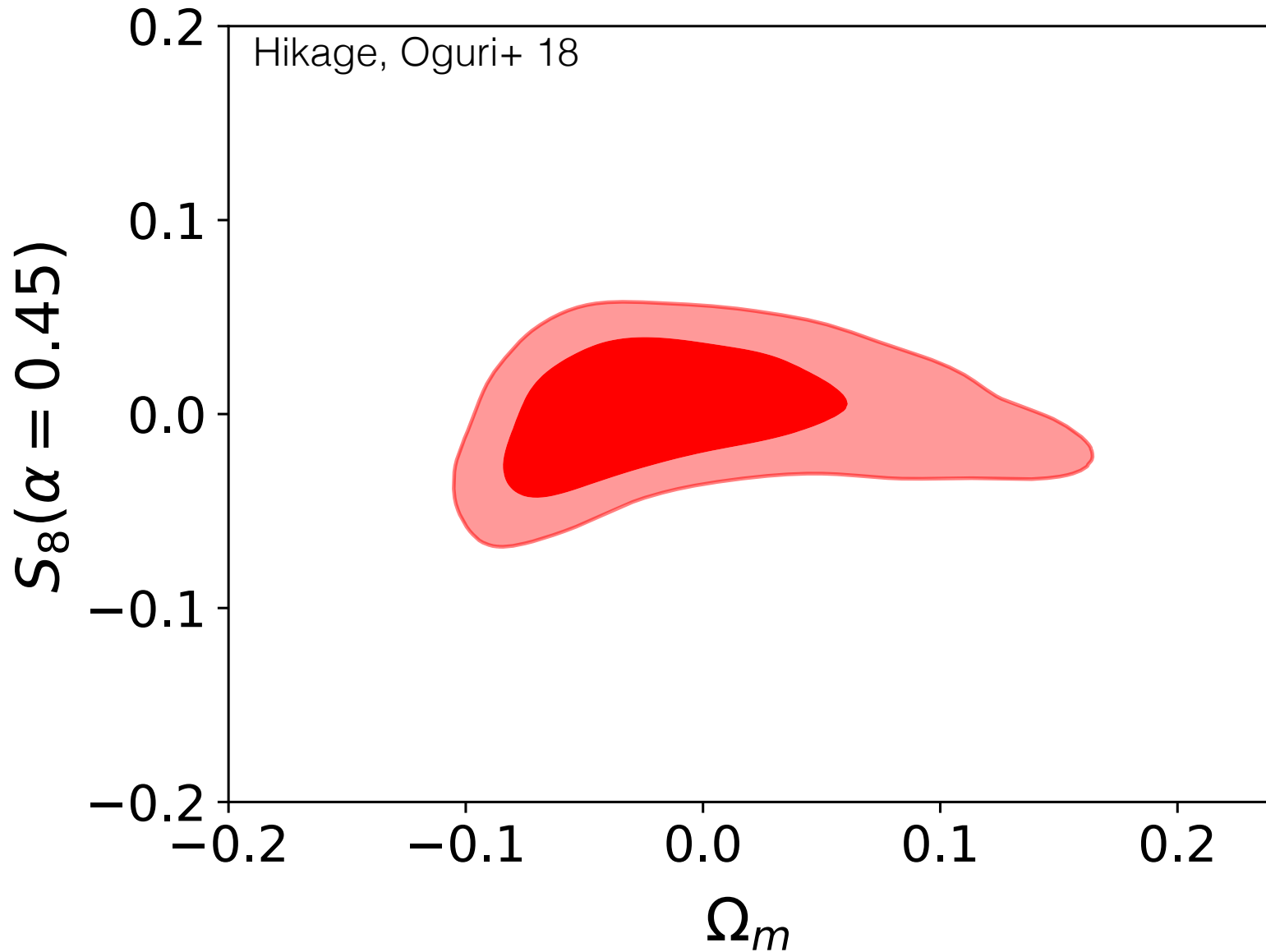


2018年6月28日に定期HSC
重力レンズWGのテレコンで
unblind (鍵を開けた)

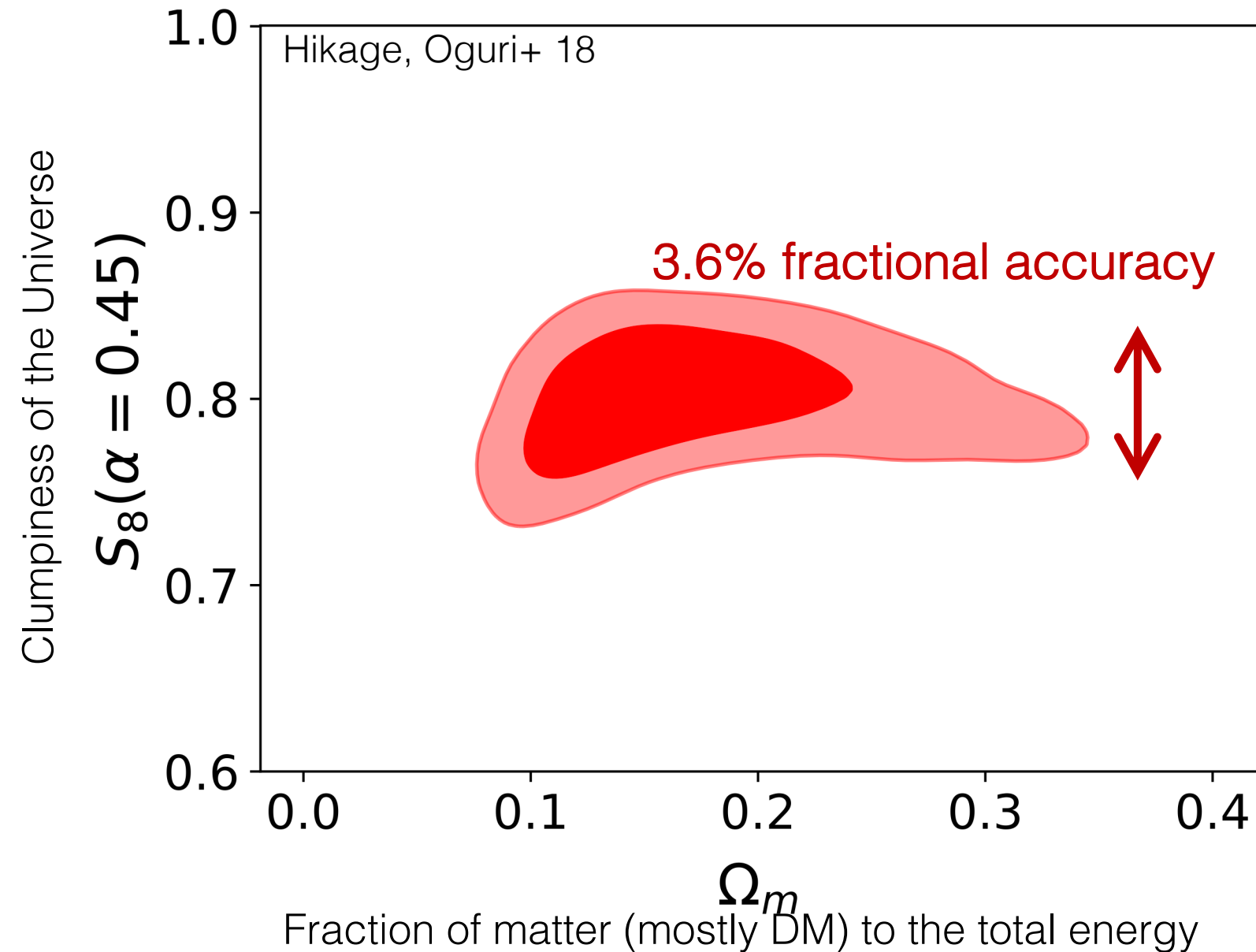


Jim Bosch
(Princeton). He
hadn't joined any
cosmology
analysis

Before unblinding on 26 June

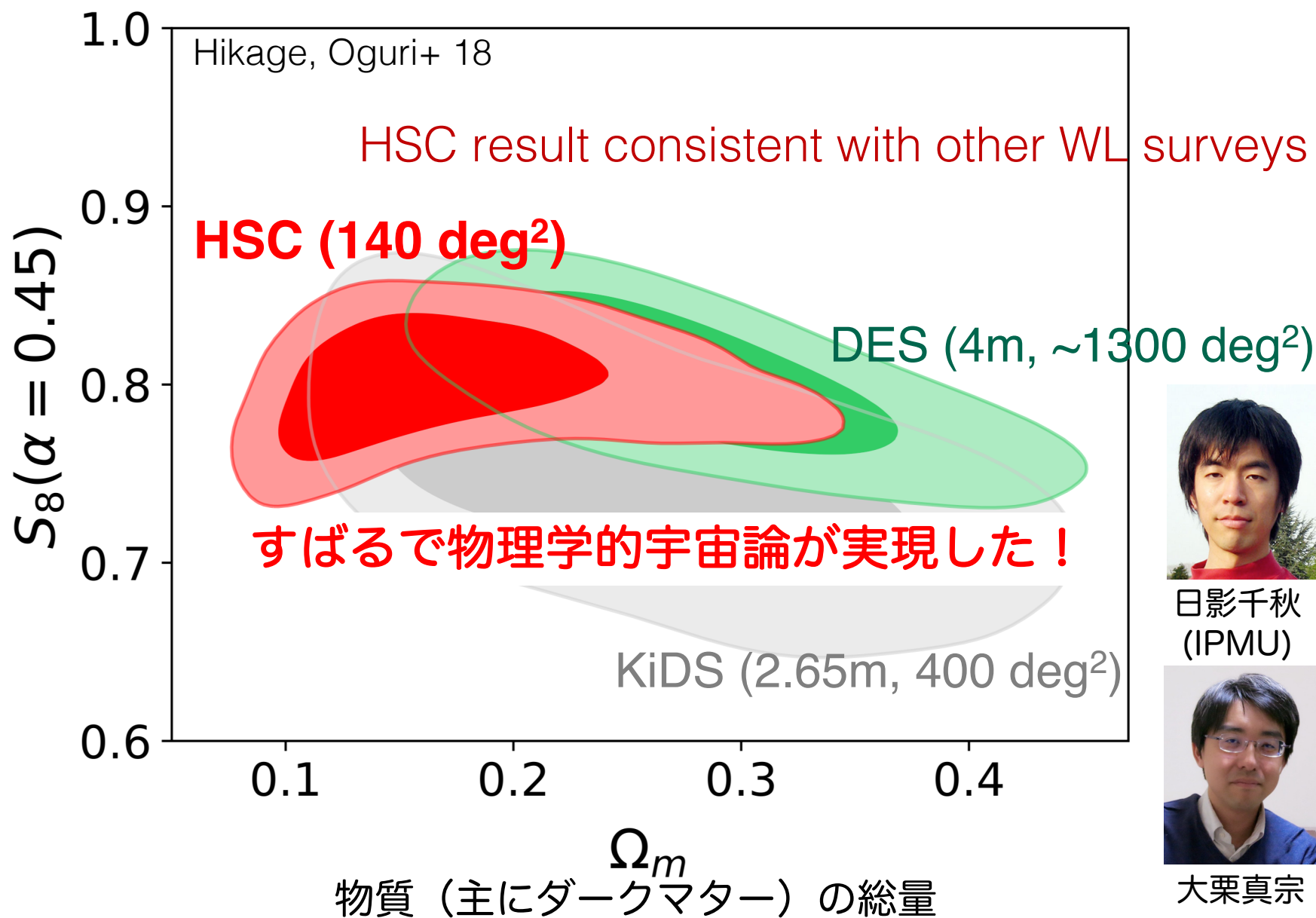


After unblinding on 26 June

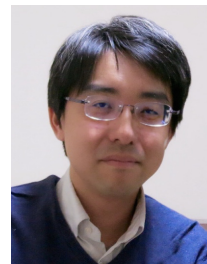


After unblinding on 26 June

現宇宙の物質分布の凸凹の程度

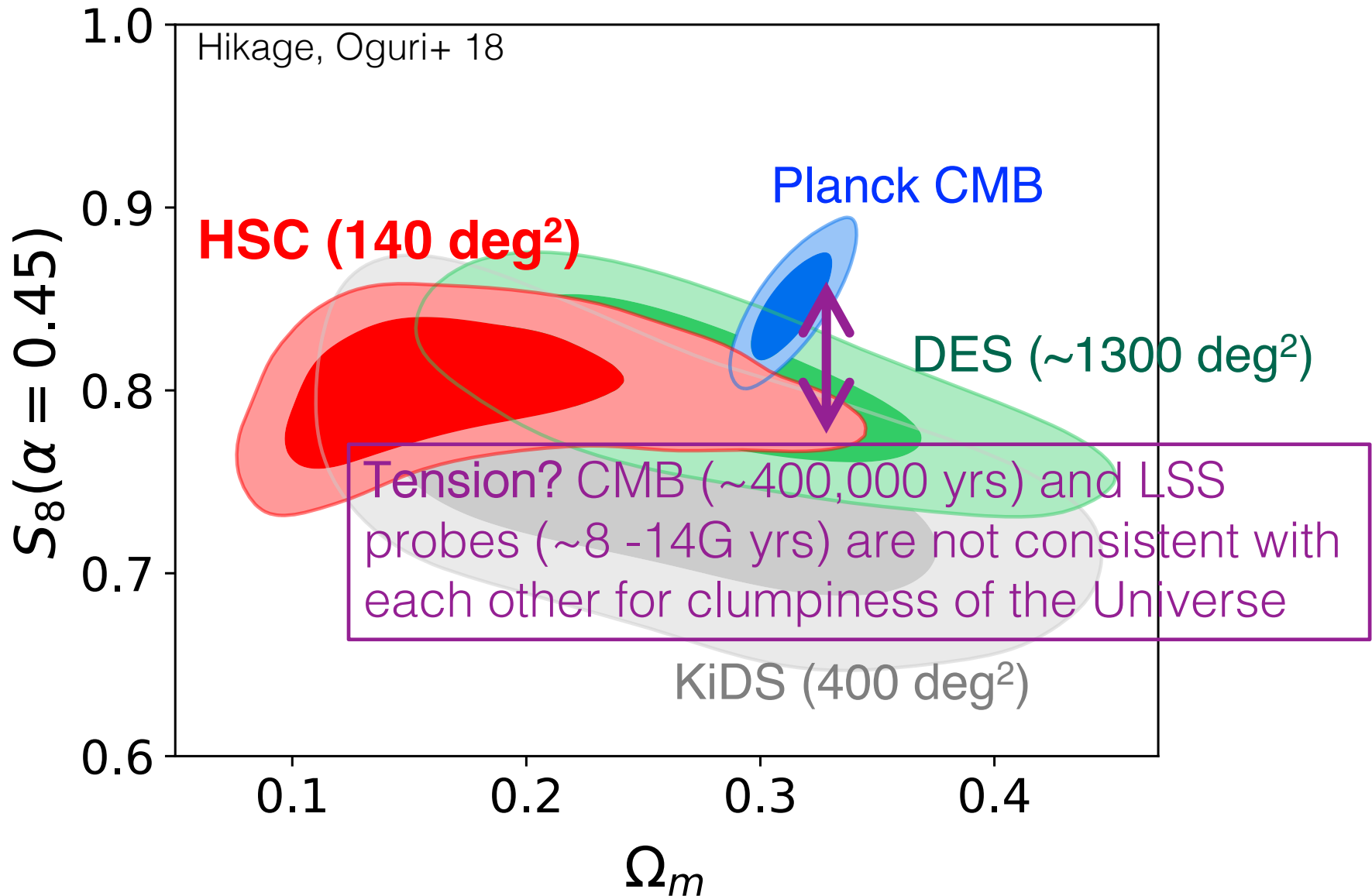


日影千秋
(IPMU)

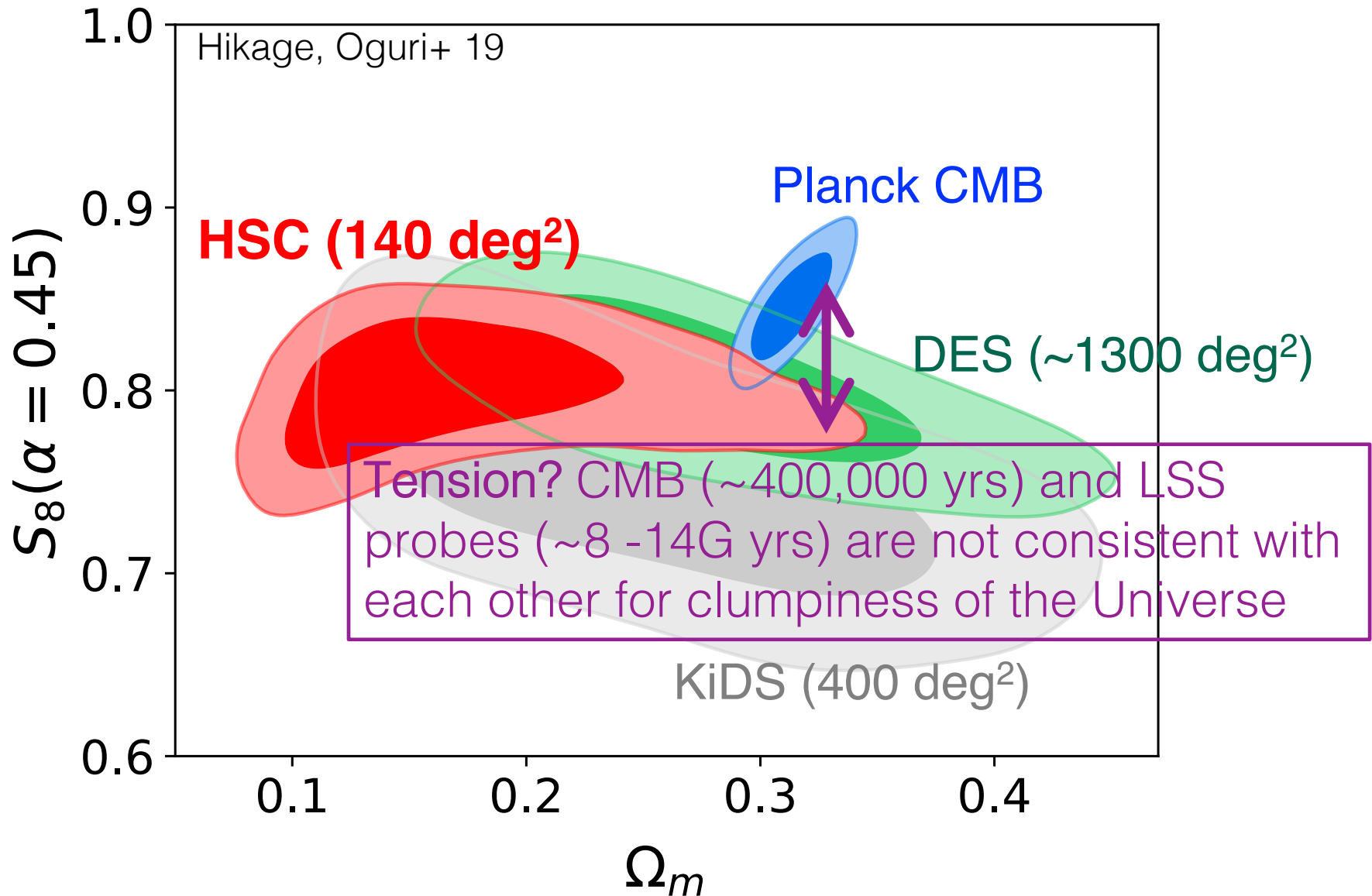


大栗真宗

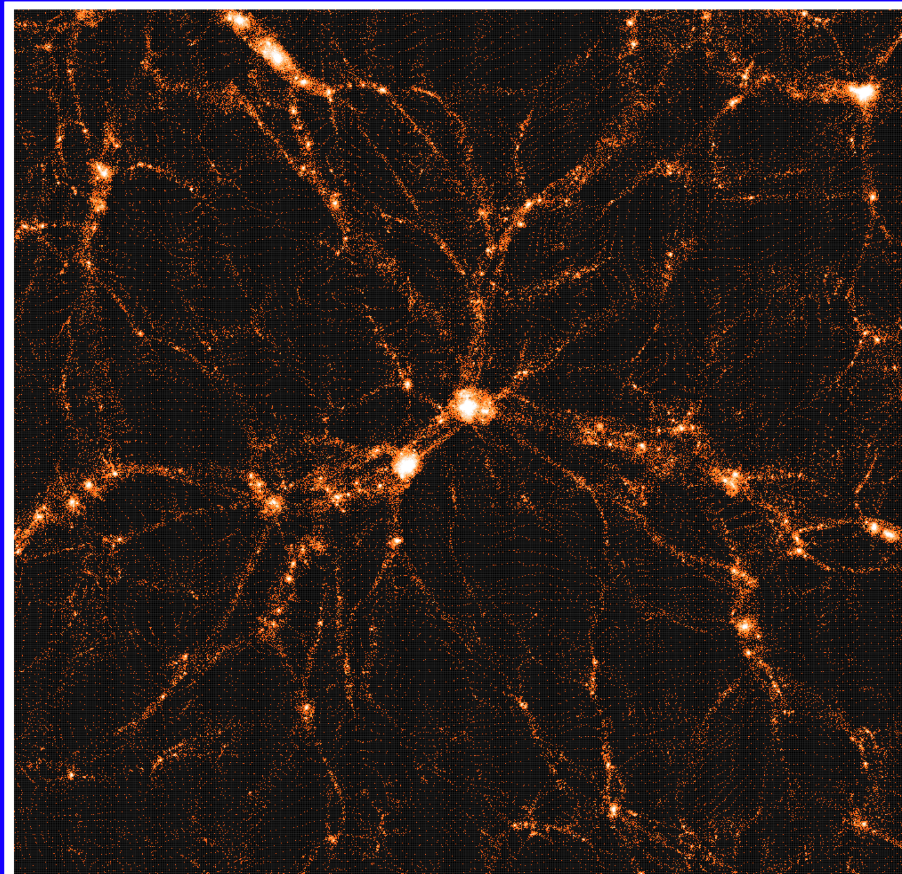
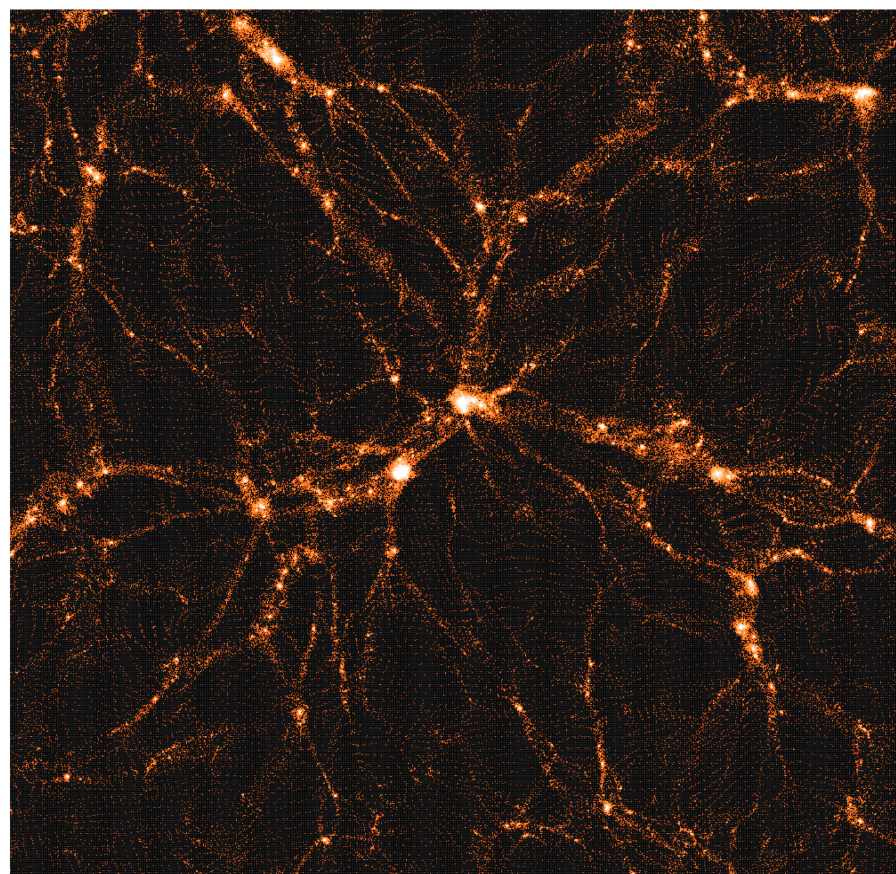
After unblinding on 26 June



HSC-Y1 cosmic shear cosmology



HSC preferred universe Planck preferred universe



CDMモデルに基づく現宇宙の大規模構造のシミュレーション

structure formation: dark matter vs. dark energy

$$a=0.1$$

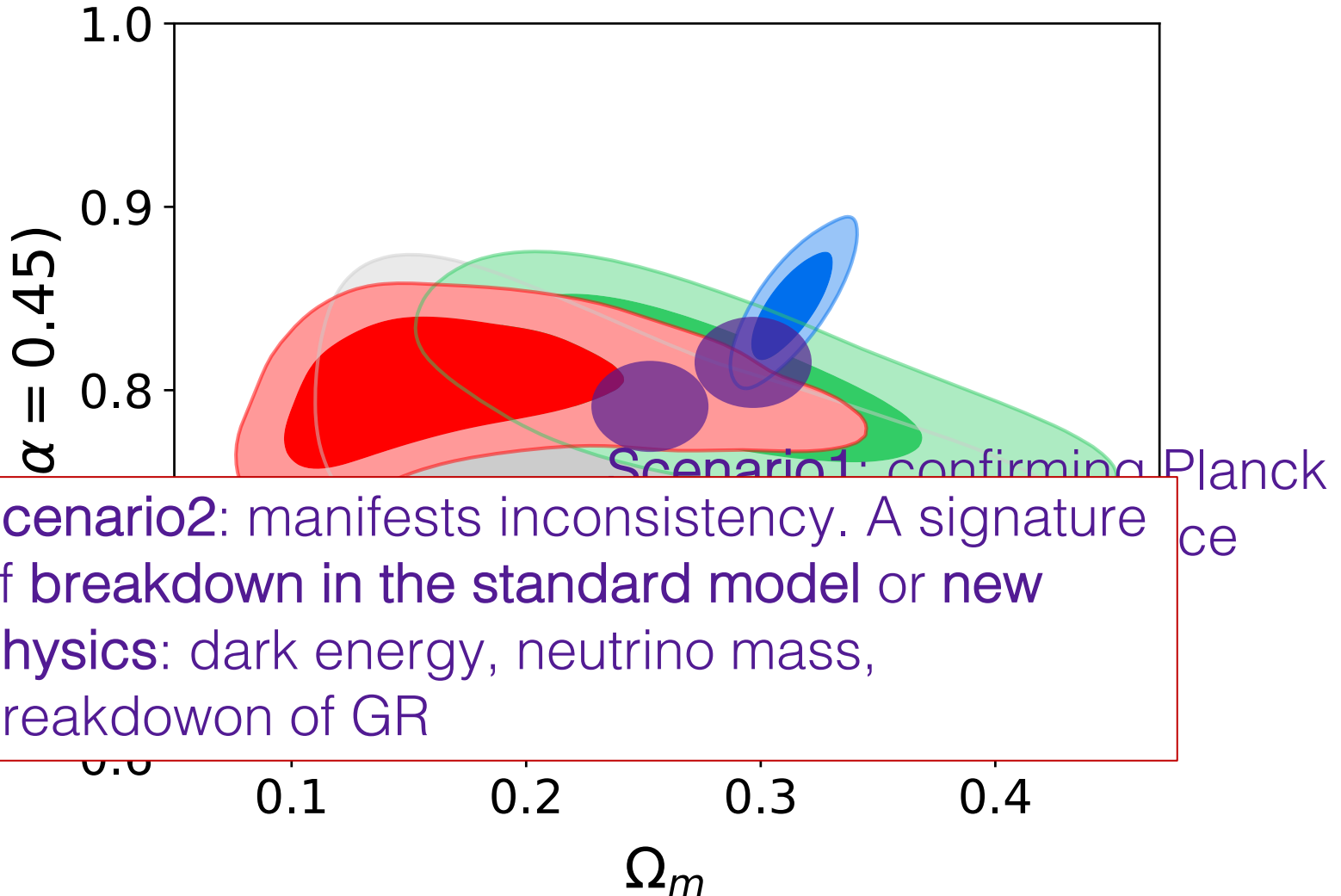
$$t=0.6 \text{ Gyr}$$

DE $\approx$ 2300 DM @ $t=50 \text{ Gyr}$

Credit: B. Diemer (Harvard)

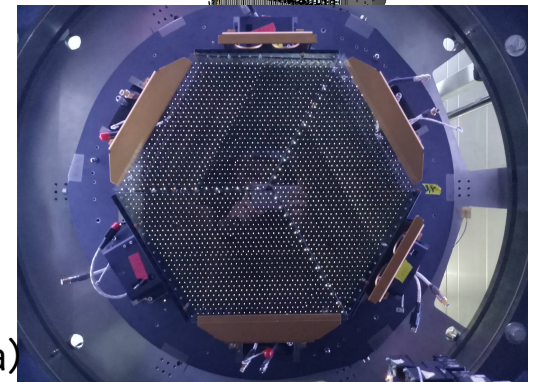
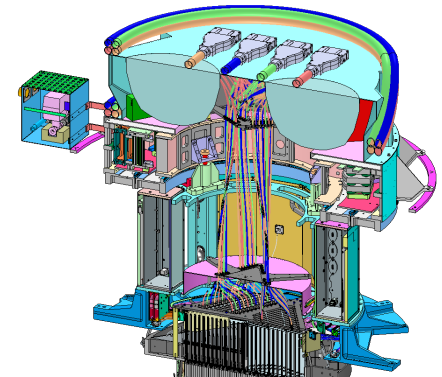
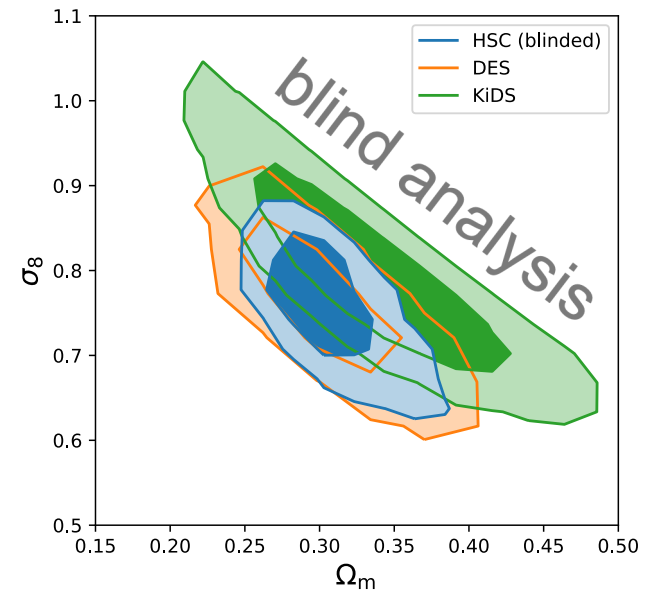
今後の展望

- 今回の結果 Hikage et al (2018) は HSC-Year1 data の結果。
計画している全データの **約10%のデータ**



今後の展望2

- SDSS分光銀河とHSC重力レンズを組み合わせた宇宙論（Oguri & Takada 2011の実現）。測光的赤方偏移の系統誤差に対してローバストな手法
- Dark Emulator (Nishimichi et al. 2018)とHSC宇宙論観測量を比較（MCMC物理解析）＝高分解能シミュレーションによるHSC mocksと観測量の比較と同等
- 手法の論文を執筆中（Miyatake, Kobayashi, Takada+ in prep.）
- 現在ブラインド解析中
- 2023以降：HSC（イメージング）＋PFS(分光) を用いた宇宙論



2394本のロボットファイバー (cobra)

まとめ

- Λ CDM=宇宙構造形成の標準模型（Peeblesが多くの先駆的な多くの仕事）
- Λ CDMモデルの徹底的な検証。宇宙膨張を用いたテスト。宇宙の構造形成（ゆらぎ）の観測量を用いたテスト（今回はこの話に焦点）
- すばるHSC (+PFS)は宇宙論に最も強力な装置（2020年代後半：ESA Euclid衛星、米国LSST、NASA Roman Space Telescope）
- 多くの若手研究者の活躍により、すばるHSCデータを用いた物理的宇宙論（実証科学）の実現（ブラインド解析）
- S8 tension: Λ CDMの綻び？今後のHSCデータで確実に検証可能。