

大規模電波サーベイ による宇宙論



山内大介
神奈川大学

宇宙論的観測手法

➤ 宇宙マイクロ波背景輻射

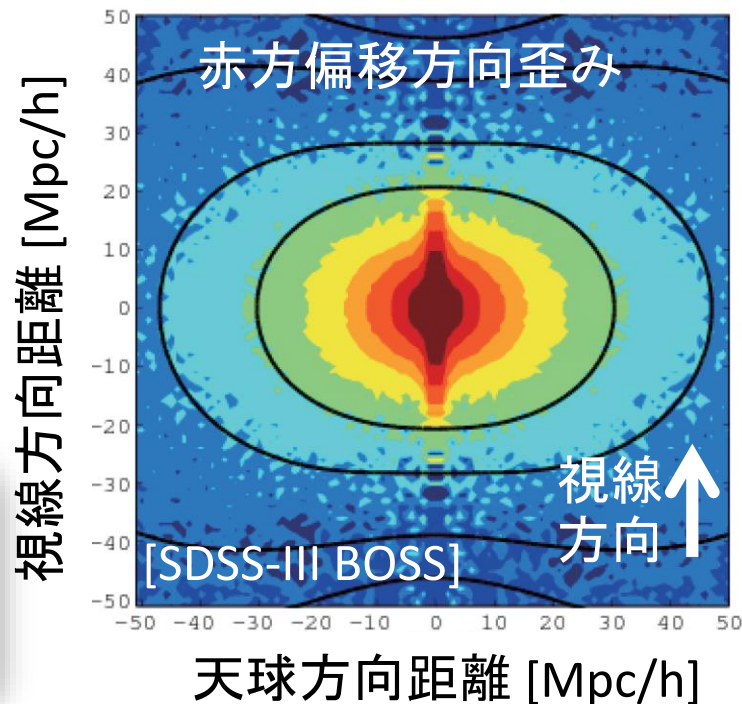
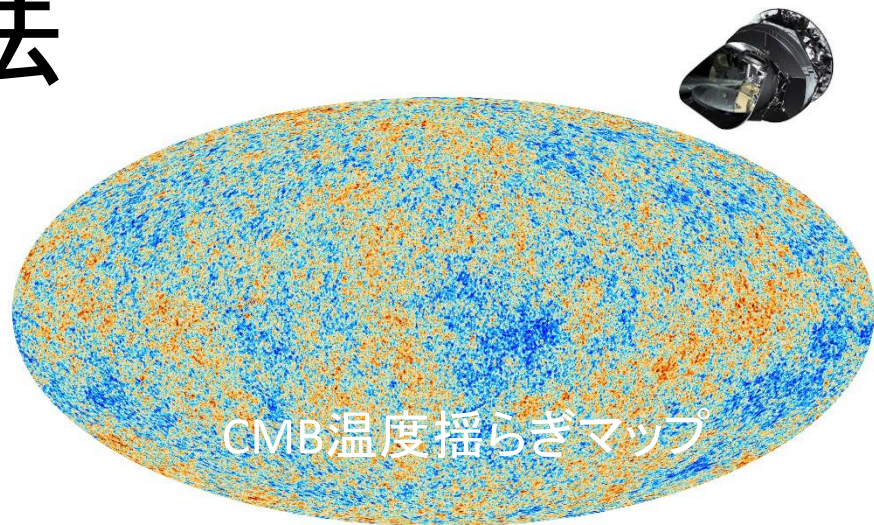
→ (電波)

➤ 宇宙大規模構造

- バリオン音響振動
- 赤方偏移方向歪み
- 重力レンズ効果

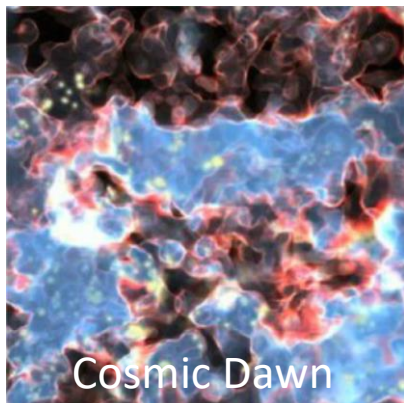
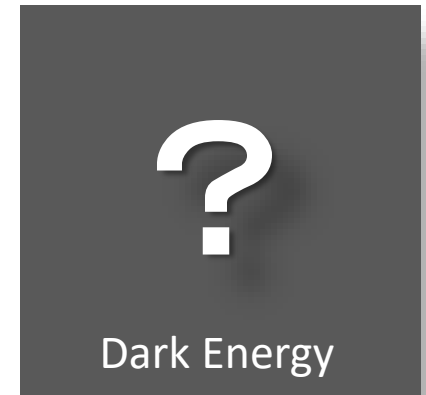
→ 可視・光赤外

電波域の宇宙論：
可視域宇宙論と相補的！

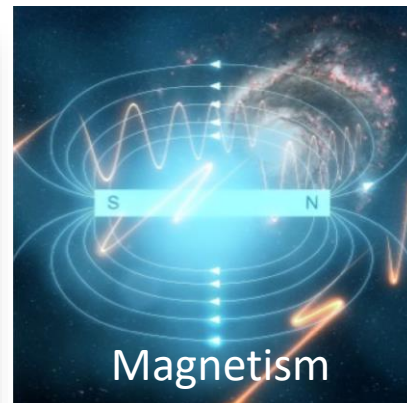


大規模電波観測によって目指す 科学目標

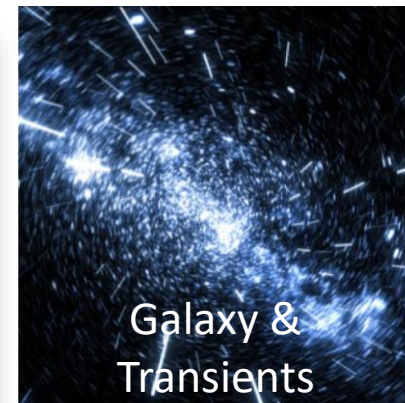
- ◆ **基礎物理** : 重力, 暗黒エネルギー,
原始宇宙, 宇宙磁場, +...
- ◆ **宇宙物理** : 宇宙の夜明け, 最初の銀河,
銀河進化, +...
- ◆ **未知** : 突発天体 + ...



Cosmic Dawn



Magnetism



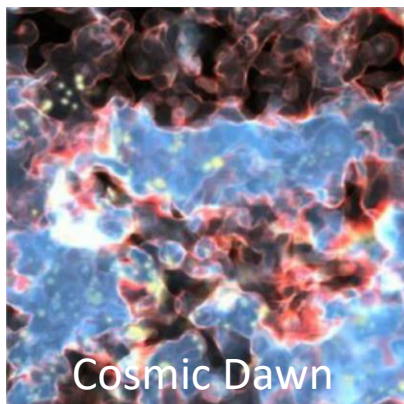
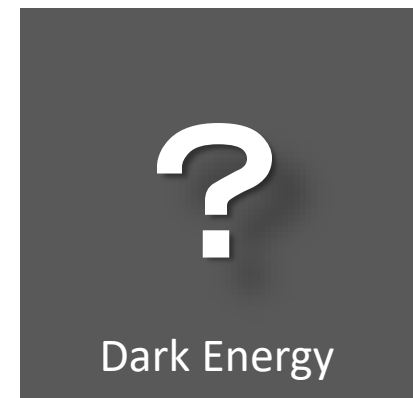
Galaxy &
Transients



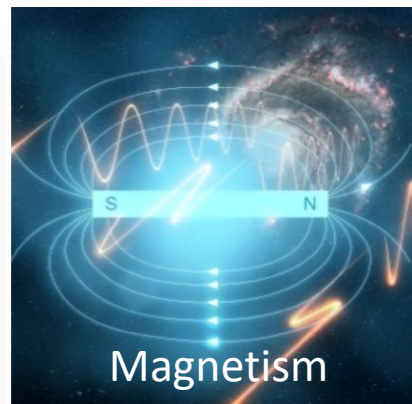
Gravity

大規模電波観測によって目指す 科学目標

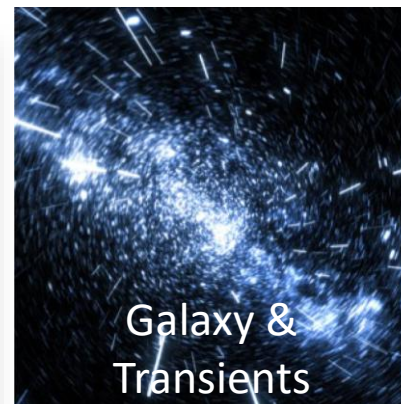
- ◆ 基礎物理 : **重力, 暗黒エネルギー, 原始宇宙, 宇宙磁場, +...**
- ◆ 宇宙物理 : 宇宙の夜明け, 最初の銀河, 銀河進化, +...
- ◆ 未知 : 突発天体 + ...



Cosmic Dawn



Magnetism

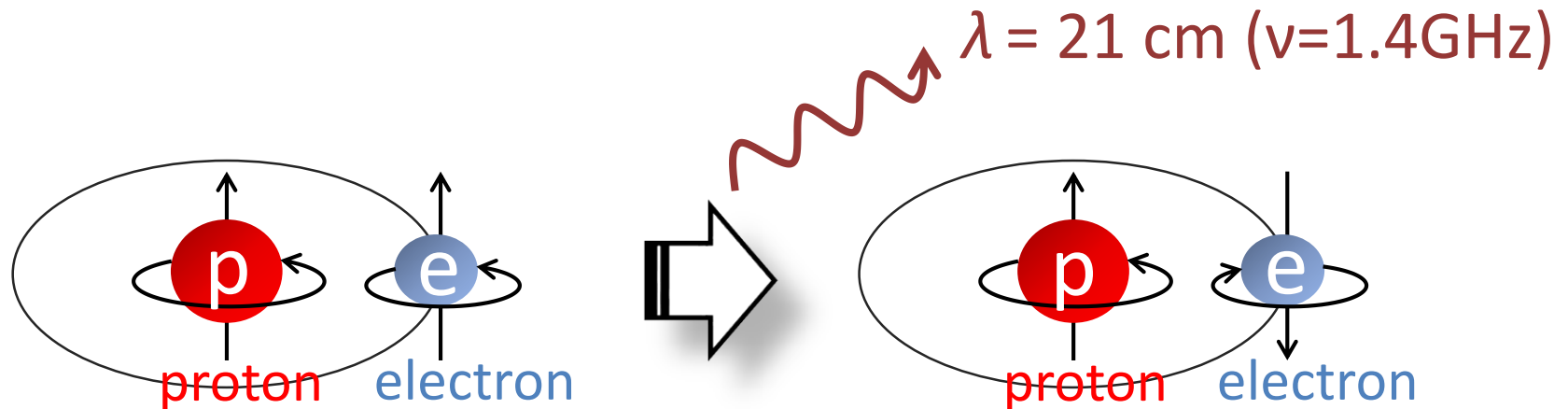


Galaxy &
Transients

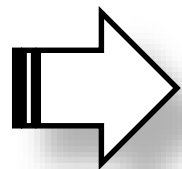


Gravity

中性水素21cm線



- 中性水素(HI)の超微細構造線
- 波長: 21cm
- 中性水素は主に銀河内に存在



HI21cm線は、宇宙の3次元構造の
(バイアスされた)トレーサーとして使える！

➤ HI [21cm線]サーベイ

✓ HI銀河赤方偏移サーベイ

- 21cm線のラインから赤方偏移を推定することで3次元地図構成。

✓ HI強度マッピングサーベイ [*after* CD/EoR]

- 個々の銀河の特定をせず、低い分解能で銀河からの後者を連続的に掃天。[Chang+(2010)]
- 比較的低い感度レベルで達成可能。大きな観測体積を掃天。

✓ HI強度マッピングサーベイ [*before* CD/EoR]

- 再電離期・夜明けのIGM内の中性水素分布の構造がターゲット。再電離期以前の物質の揺らぎをトモグラフィー可能。

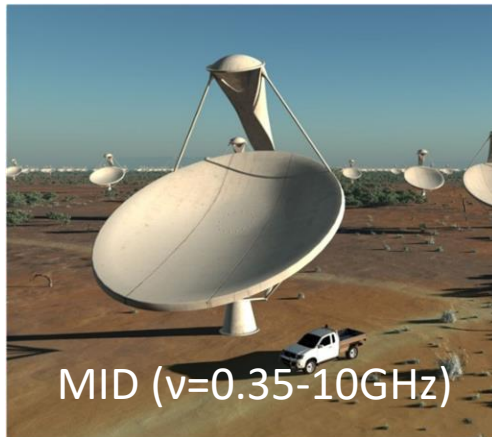
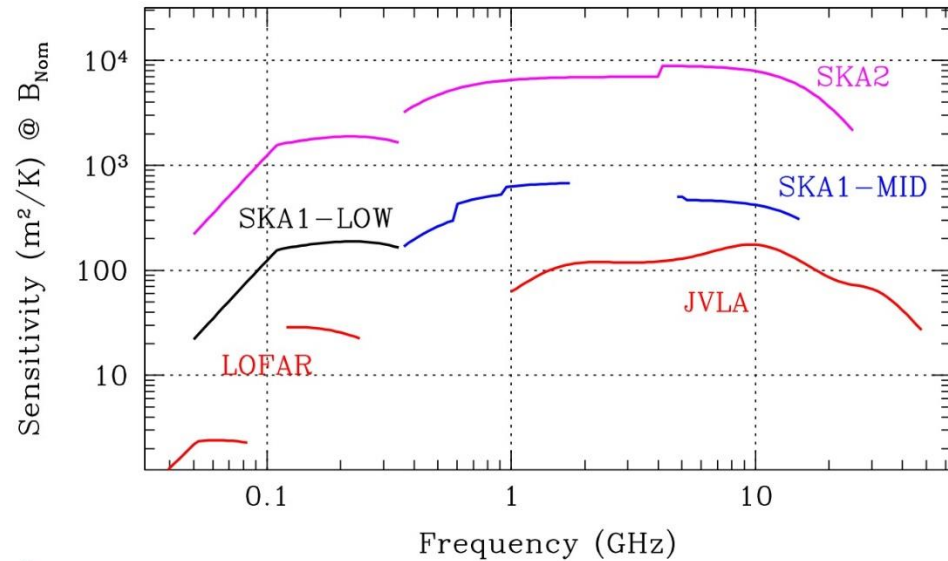
➤ 電波連続波サーベイ

- 銀河からのシンクロトロン放射を大規模構造のトレーサーとして測定。
- これまでも行われてきたが、次世代においては宇宙論的に十分な数のソースを観測できる。

SQUARE KILOMETRE ARRAY



- ✓ これまでになかった周波数領域
- ✓ 広視野
- ✓ 高空間分解能
- ✓ 高感度



観測量	サーベイ	SKA Phase	赤方偏移	掃天 (deg ²)	観測 銀河数
HI [21cm線]	HI銀河赤方 偏移サーベイ (gal)	Phase-1	$z < 0.8$	5,000	$\sim 10^7$
		Phase-2	$z < 2$	30,000	$\sim 10^9$
HI [21cm線]	HI強度マッピ ングサーベイ (MID-IM)	Phase-1	$z < 3$	25,000	--
		Phase-2	$z < 3.7$	30,000	--
HI [21cm線]	HI強度マッピ ングサーベイ (LOW-IM)	Phase-1	$3 < z < 27$	1,000	--
		Phase-2	$3 < z < 27$	30,000	--
シンクロトン 放射	電波連続線 サーベイ (conti)	Phase-1	$z < 6$	25,000	$\sim 10^8$
		Phase-2	$z < 6$	30,000	$\sim 10^9$
可視域	e.g. Euclid		$z < 2$	15,000	$\sim 10^8$

$S = 70(\text{SKA1gal}), 5(\text{SKA2gal}), 1(\text{SKA1cont}), 0.1(\text{SKA2cont}) [\mu\text{Jy}]$

$\Delta\theta = 1(\text{SKA1}), 0.1(\text{SKA2}) [\text{arcsec}], t_{\text{int}} = 10^4 [\text{hr}]$

観測量	サーベイ	SKA Phase	赤方偏移	掃天 (deg ²)	観測 銀河数
HI [21cm線]	HI銀河赤方 偏移サーベイ (gal)	Phase-1	$z < 0.8$	5,000	$\sim 10^7$
		Phase-2	$z < 2$	30,000	$\sim 10^9$
HI [21cm線]	HI強度マッピ ングサーベイ (MID-IM)	Phase-1	$z < 3$	25,000	--
		Phase-2	$z < 3.7$	30,000	--
HI [21cm線]	HI強度マッピ ングサーベイ (LOW-IM)	Phase-1	$3 < z < 27$	1,000	--
		Phase-2	$3 < z < 27$	30,000	--
シンクロトン 放射	電波連続線 サーベイ	Phase-1	$z < 6$	25,000	$\sim 10^8$
		Phase-2	$z < 6$	30,000	$\sim 10^9$
可視域					$\sim 10^8$

Phase-1であってもIM/contiならば十分大きなサーベイ体積[全天+high-z]を持つ！

(cont) [μ Jy]

$S_{21} = 1(S_{10} z^1) + 0.1(S_{10} z^2) [\mu Jy]$ $S_{int} = 10^{-1} [mJy]$

Phase-2では最終的に**~10億個(!)**もの
銀河の位置を特定

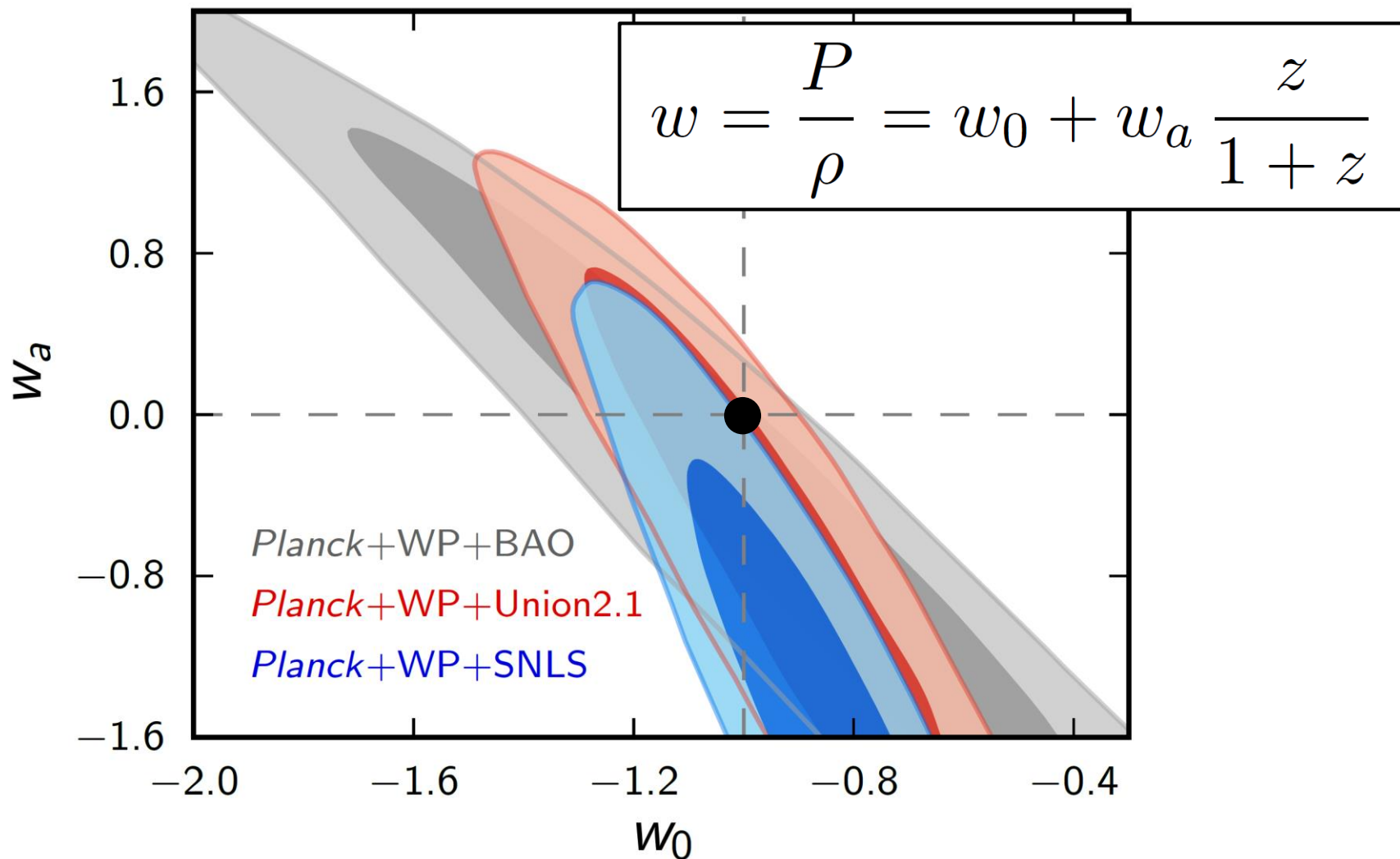
観測量	HI銀河赤方 偏移サーベイ (gal)	$z < 0.8$	5,000	$\sim 10^7$	
		Phase-2	$z < 2$	30,000	$\sim 10^9$
HI [21cm線]	HI強度マッピ ングサーベイ (MID-IM)	Phase-1	$z < 3$	25,000	--
		Phase-2	$z < 3.7$	30,000	--
HI [21cm線]	HI強度マッピ ングサーベイ (LOW-IM)	Phase-1	$3 < z < 27$	1,000	--
		Phase-2	$3 < z < 27$	30,000	--
シンクロトロン 放射	電波連続線 サーベイ (conti)	Phase-1	$z < 6$	25,000	$\sim 10^8$
		Phase-2	$z < 6$	30,000	$\sim 10^9$
可視域	e.g. Euclid	$z < 2$	15,000	$\sim 10^8$	

$S = 70(\text{SKA1gal}), 5(\text{SKA2gal}), 1(\text{SKA1cont}), 0.1(\text{SKA2cont}) [\mu\text{Jy}]$
 $\Delta\theta = 1(\text{SKA1}), 0.1(\text{SKA2}) [\text{arcsec}], t_{\text{int}} = 10^4 [\text{hr}]$

大規模電波サーベイによる宇宙論 I: 暗黒エネルギーと一般相対論の検証

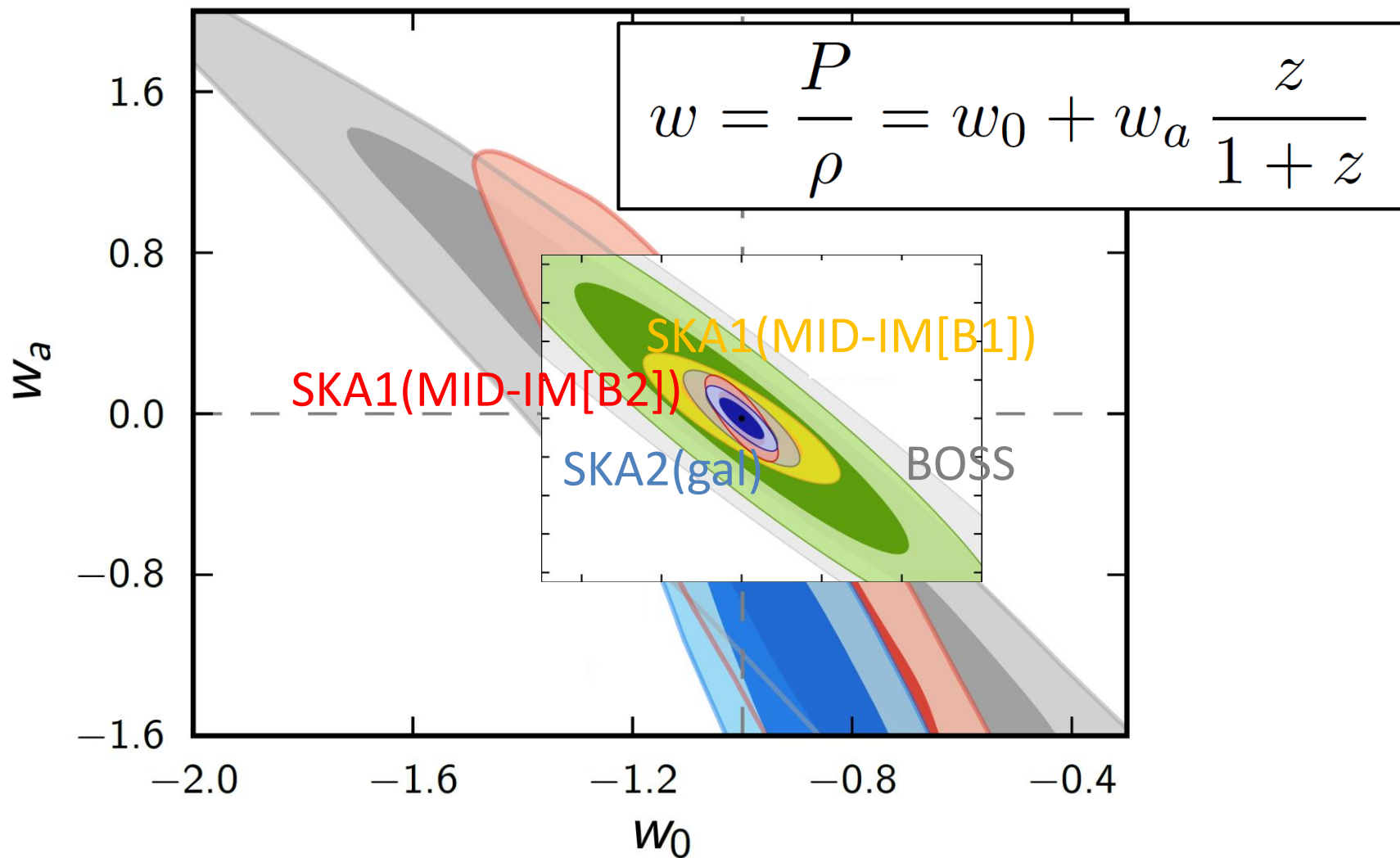
暗黒エネルギーの性質の解明

暗黒エネルギー状態方程式への制限



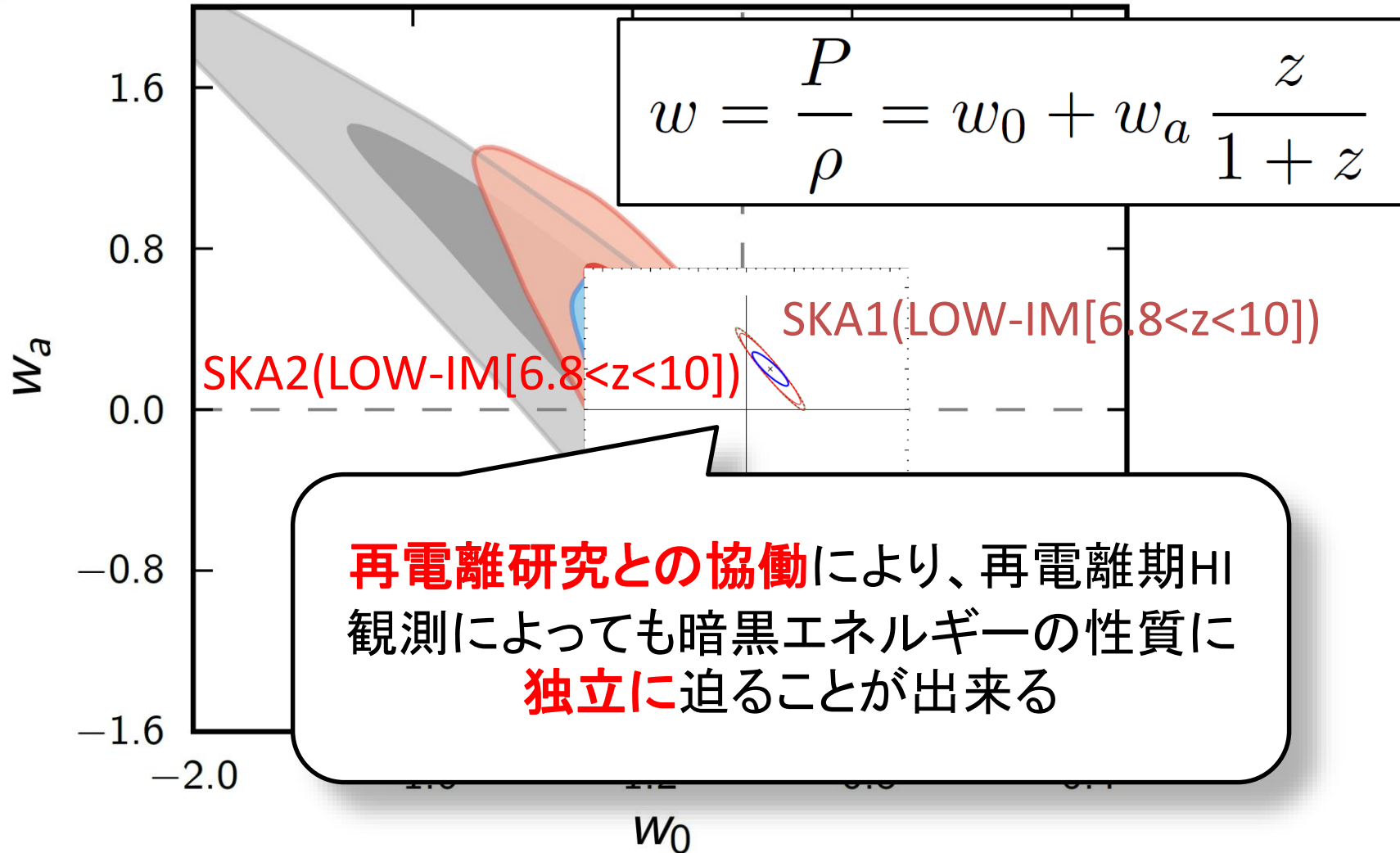
暗黒エネルギーの性質の解明

暗黒エネルギー状態方程式への制限



再電離期21cm線による探査

暗黒エネルギー状態方程式への制限

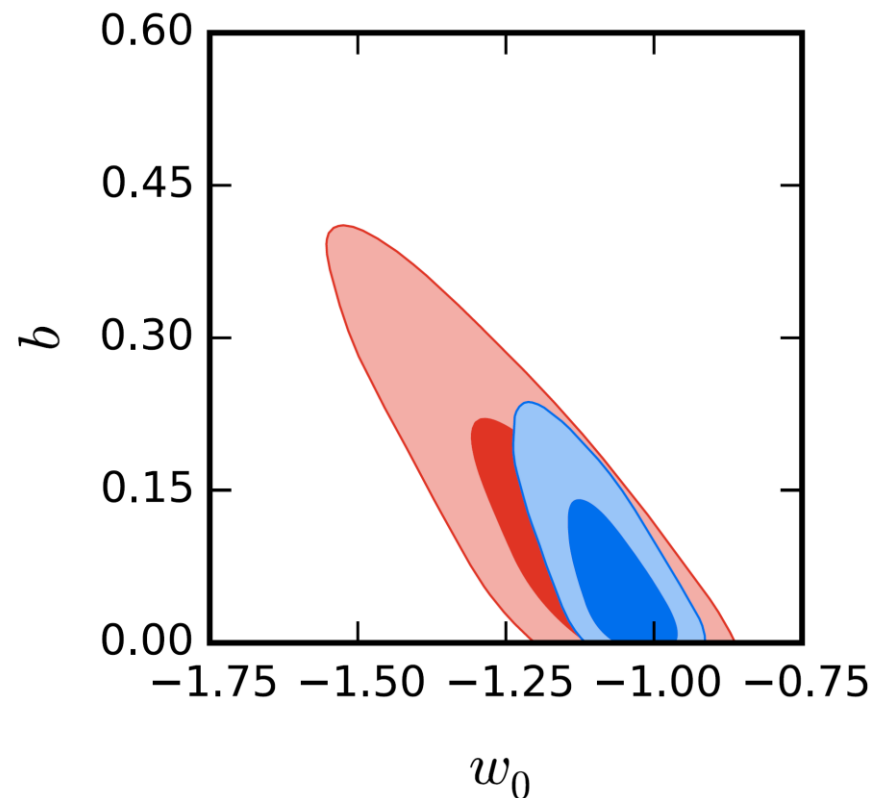
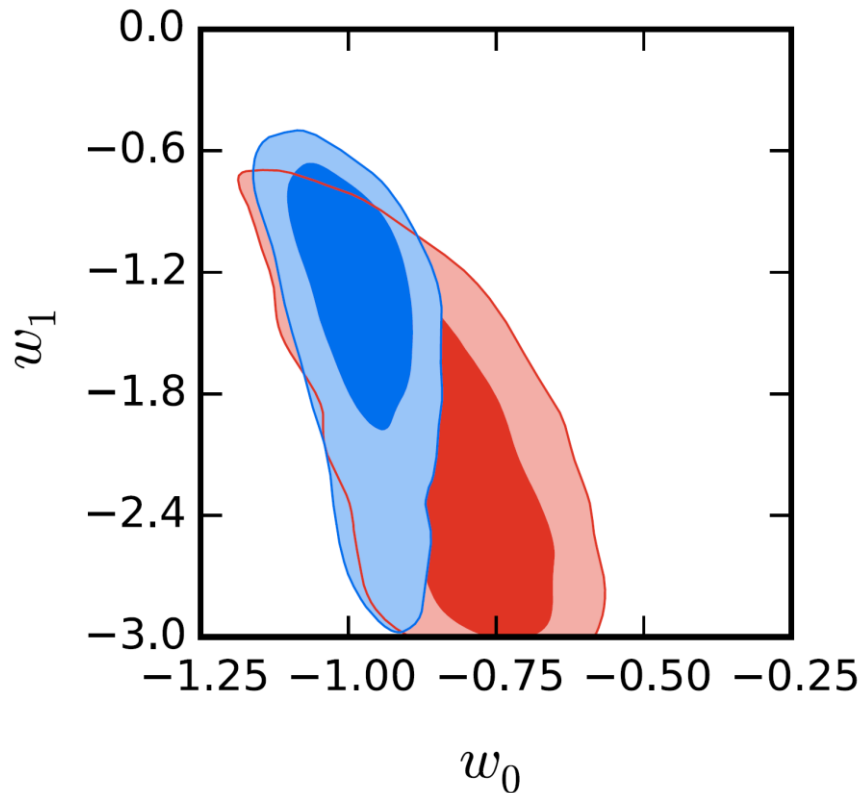


再電離期21cm線による探査

暗黒エネルギー状態方程式の時間発展依存性による違い

$$w = w_0 w_1 \frac{1 + \left(\frac{a_s}{a}\right)^p}{w_1 + w_0 \left(\frac{a_s}{a}\right)^p}$$

$$w = \frac{w_0}{[1 + b \log(1 + z)]^2}$$



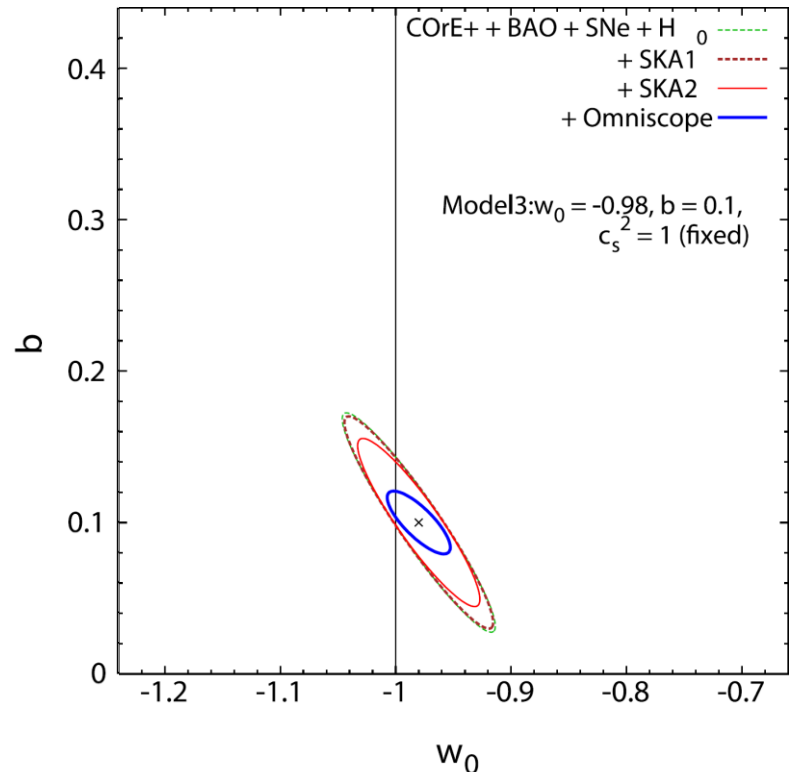
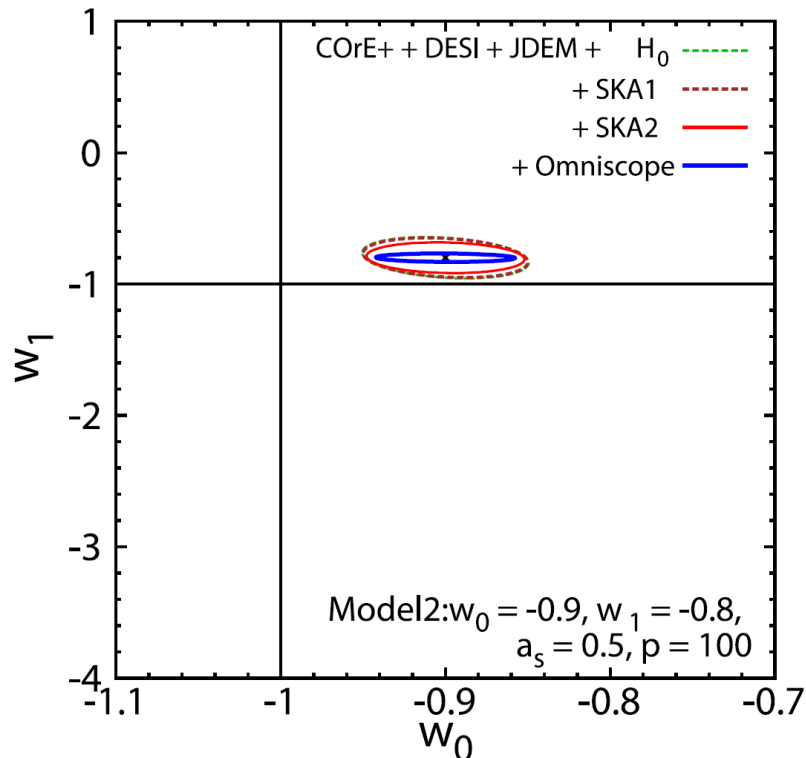
我が国による貢献

再電離期21cm線による探査

暗黒エネルギー状態方程式の時間発展依存性による違い

$$w = w_0 w_1 \frac{1 + \left(\frac{a_s}{a}\right)^p}{w_1 + w_0 \left(\frac{a_s}{a}\right)^p}$$

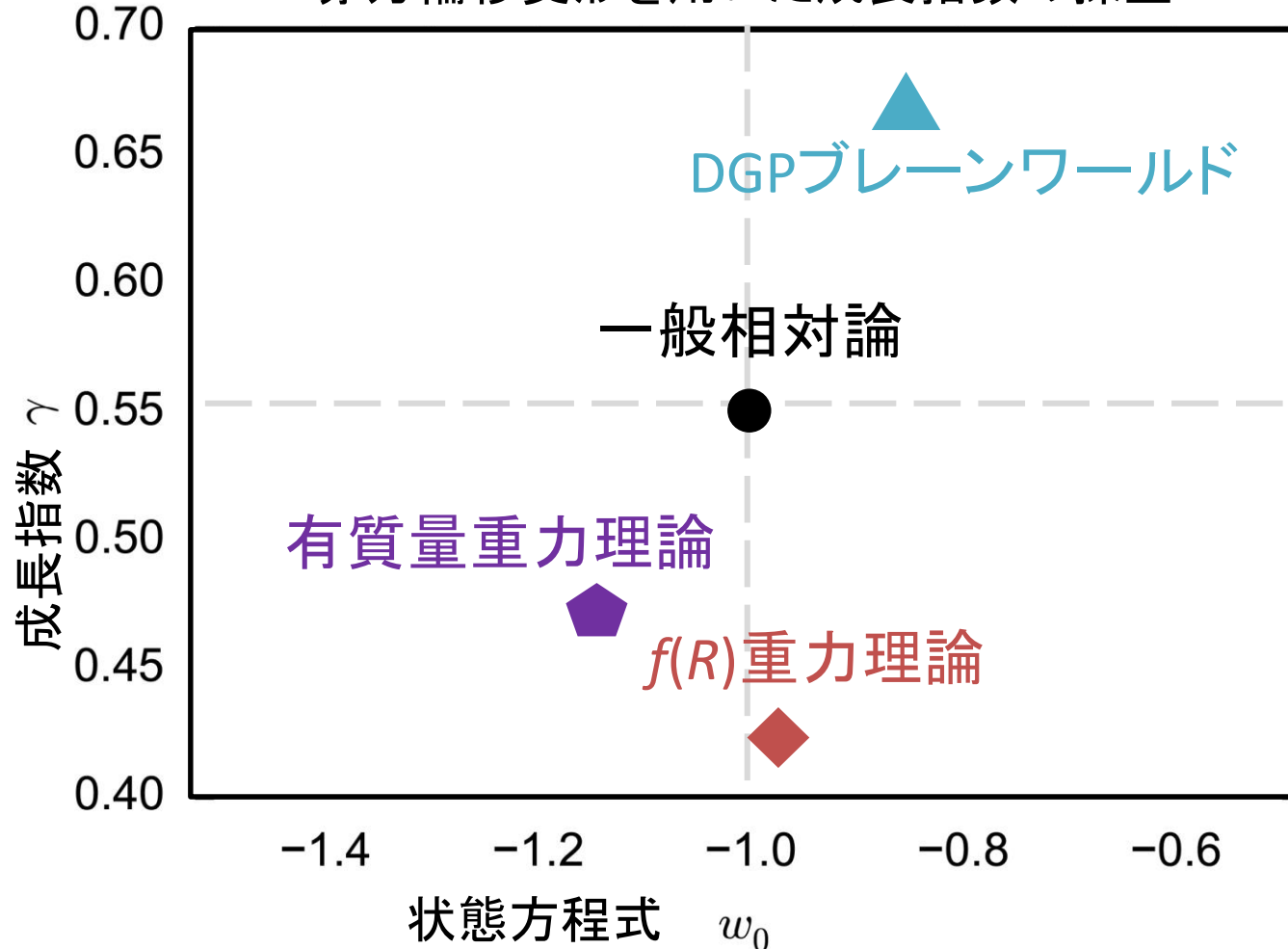
$$w = \frac{w_0}{[1 + b \log(1 + z)]^2}$$



我が国による貢献

一般相対論の検証

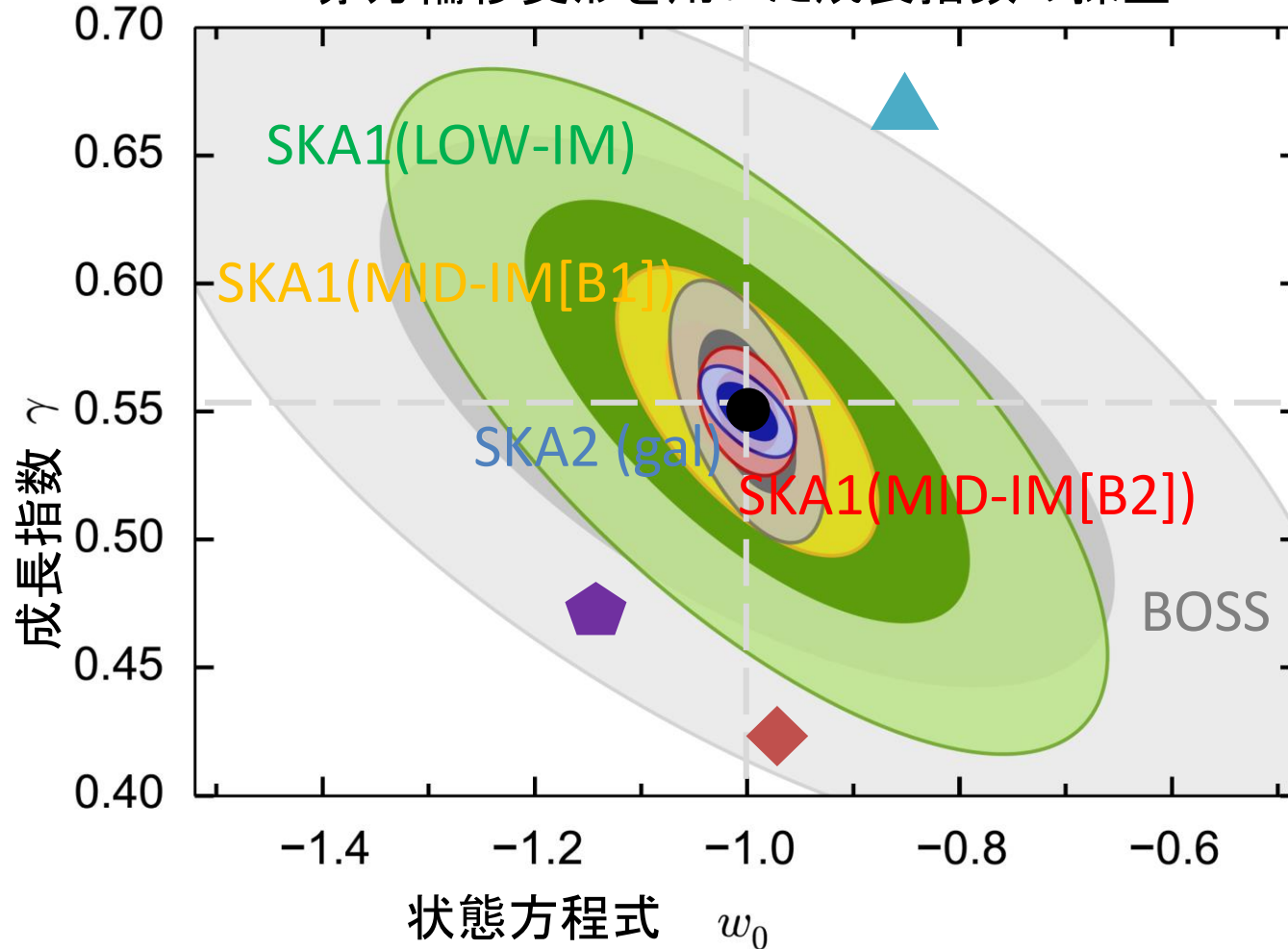
赤方偏移変形を用いた成長指数の探査



$$[d(\ln \delta_{\text{gal}})/d(\ln a) = (\Omega_m(z))^\gamma]$$

一般相対論の検証

赤方偏移変形を用いた成長指数の探査



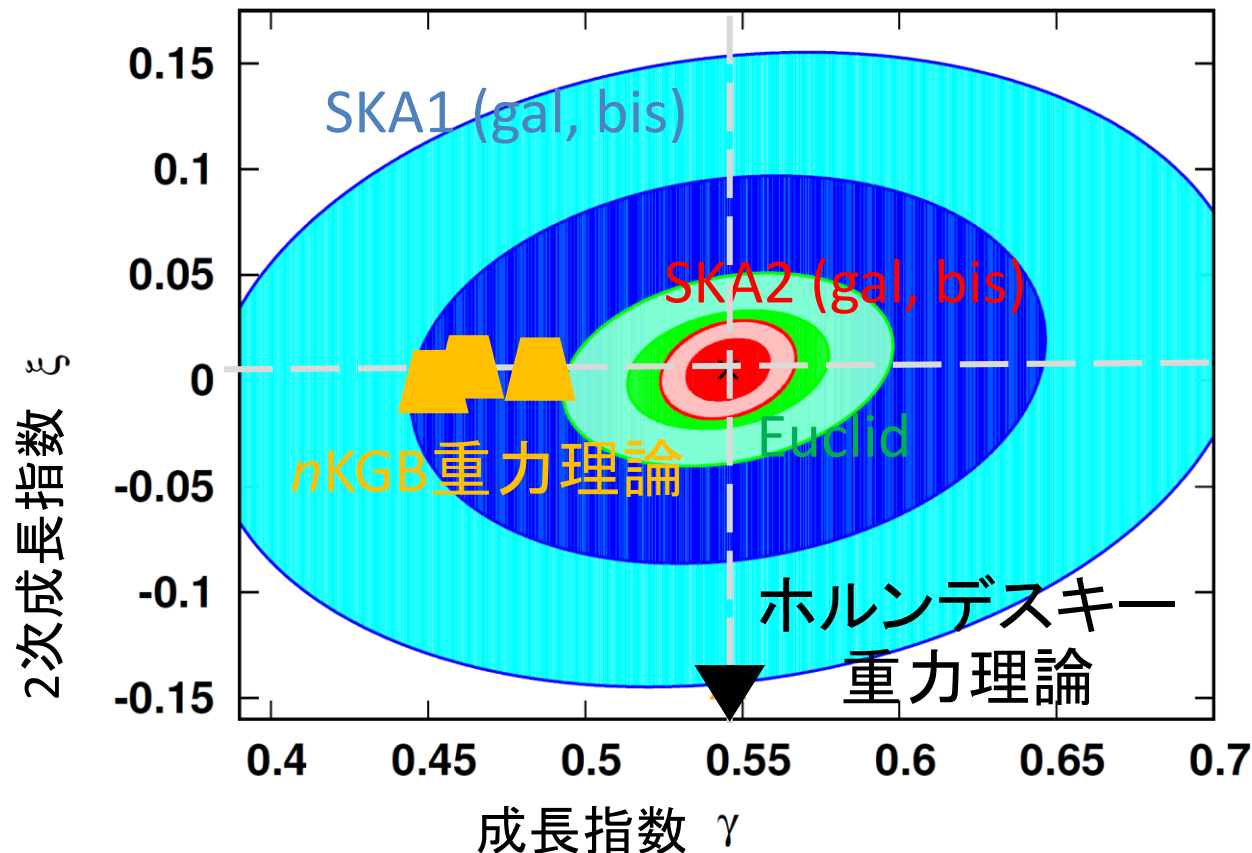
$$\left[\frac{d(\ln \delta_{\text{gal}})}{d(\ln a)} = (\Omega_m(z))^\gamma \right]$$

我が国による貢献

一般相対論のさらなる検証可能性

成長指数だけでは一般相対論と縮退するモデルが存在

→ 将来電波サーベイではこれらを峻別可能！



大規模電波サーベイによる宇宙論 II: インフレーション宇宙

インフレーション宇宙の理解の現状

観測済み

▶ 原始曲率揺らぎ → スケール不変からのわずからのズレ(5σ)

$$P_{\zeta}(k) \propto k^{-0.04+\dots} \quad [\text{WMAP, Planck,}\dots]$$

観測近し

▶ 原始重力波 → 原始曲率揺らぎの10%以下 [Planck]

[future : LiteBIRD → 0.1%]

最後の
ピース

▶ 原始揺らぎの統計性 → 「ほぼ」ガウス分布 [Planck]

✓ ガウス分布からのズレをパラメータ化

: 非線形パラメータ f_{NL} [Komatsu+Spergel (2001)]

原始曲率揺らぎの精密測定

我が国による貢献

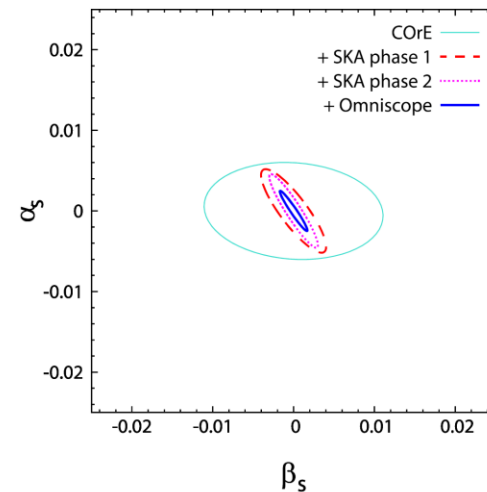
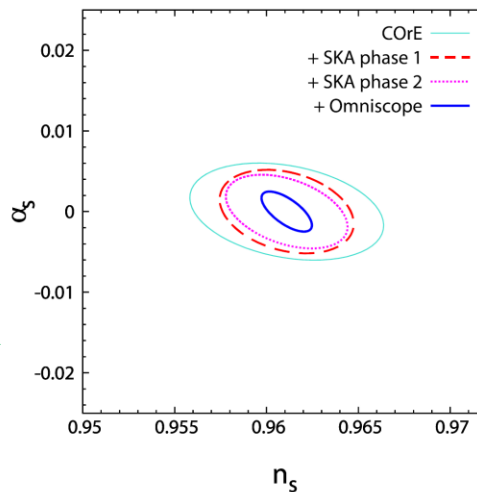
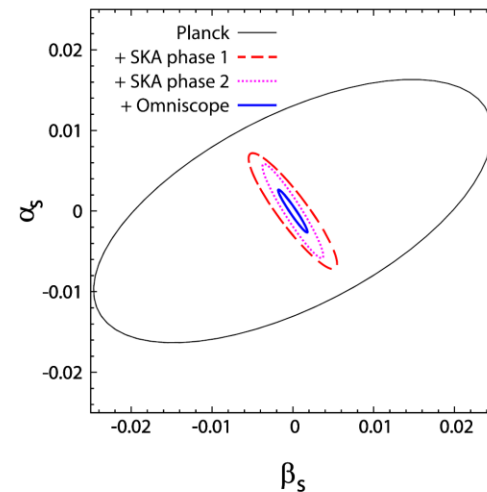
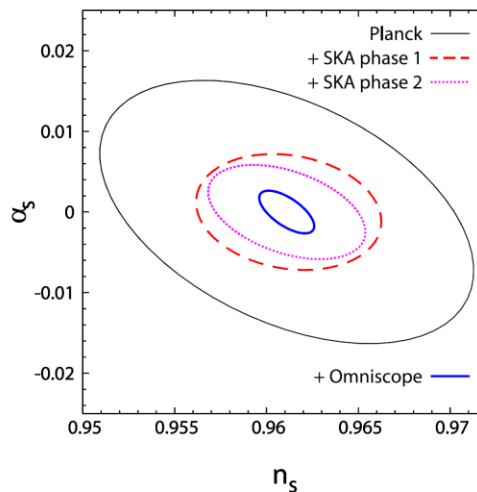
HI強度マッピングサーベイ [6.8<z<10]

➤ ベキを展開

$$\begin{aligned} \ln[P_\zeta] \propto & (n_s - 1) \ln(k/k_{\text{ref}}) \\ & + \alpha_s \ln^2(k/k_{\text{ref}})/2 \\ & + \beta_s \ln^3(k/k_{\text{ref}})/3! \\ & + \dots \end{aligned}$$



(n_s, α_s, β_s) :
個々のインフレーションモデル
に特徴的 → 峻別しうる!



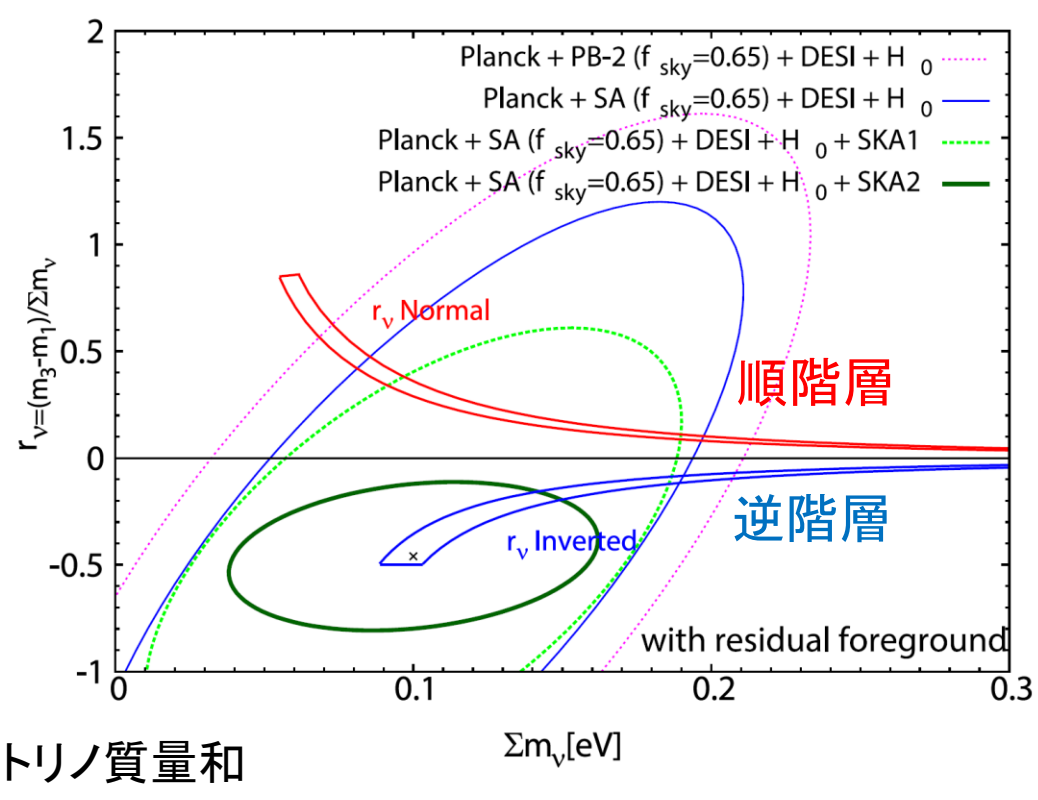
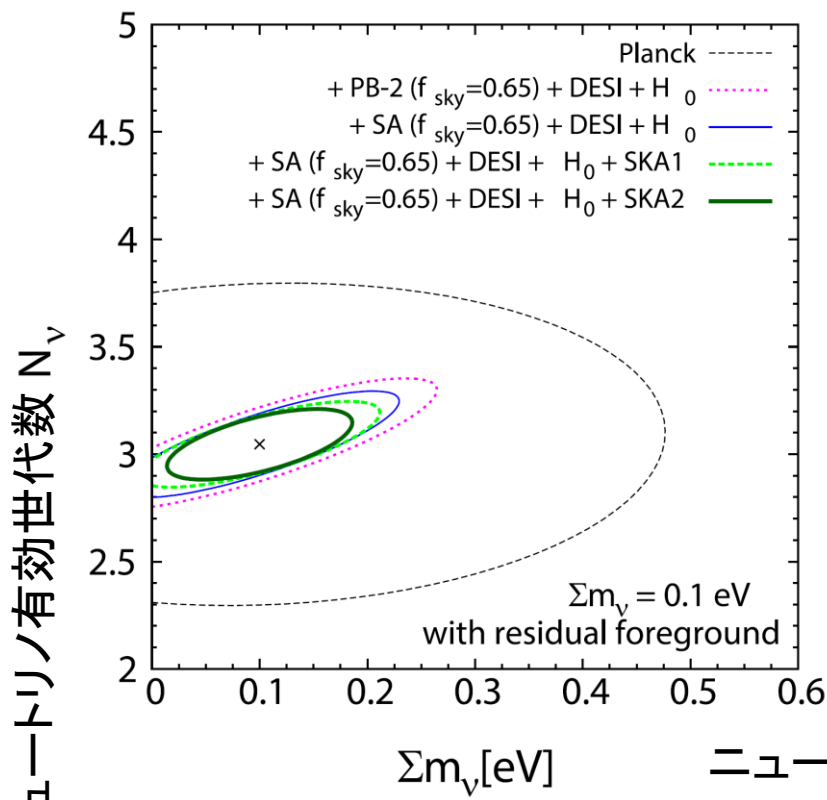
我が国による貢献

[Oyama+Kohri+Hazumi (2016), Oyama+Kohri+Shimizu (2013)]

ニュートリノの性質の解明

密度揺らぎの精密測定

→ ニュートリノを含む素粒子の性質の探査が可能に！



HI強度マッピングサーベイ [6.8 < z < 10]

SKA1のキーサイエンス：非ガウス性

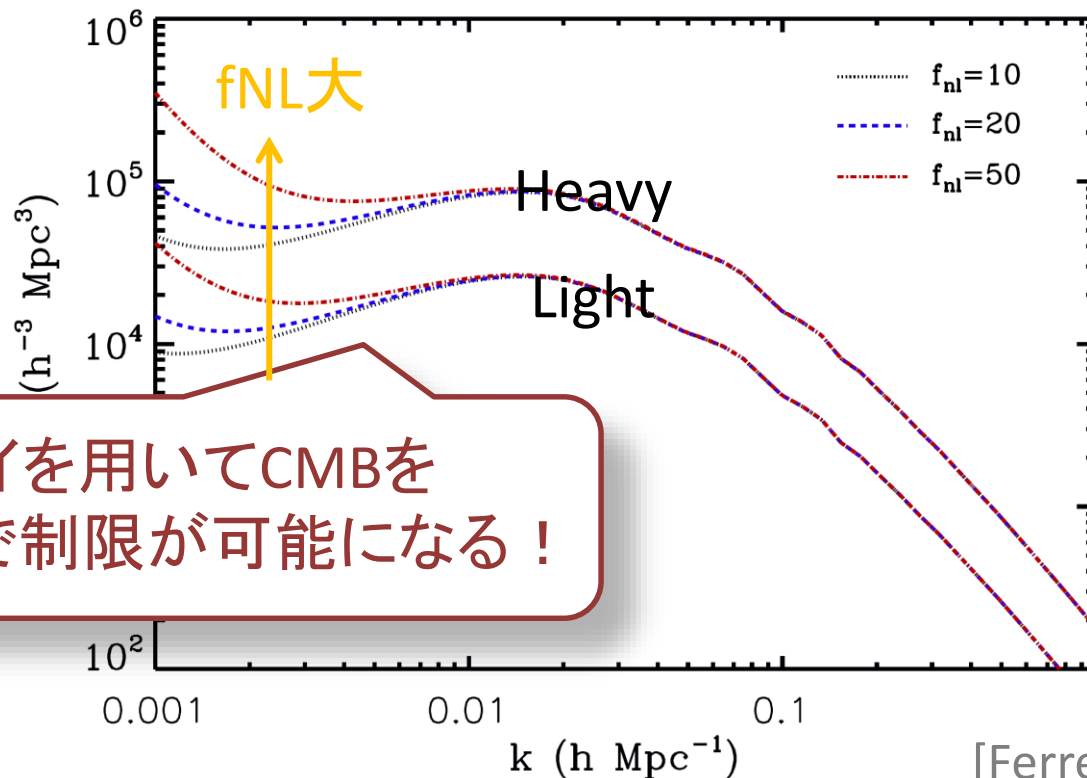
Science Goal	SWG	Objective	SWG Rank
1	CD/EoR	Physics of the early universe IGM - I. Imaging	1/3
2	CD/EoR	Physics of the early universe IGM - II. Power spectrum	2/3
4	Pulsars	Reveal pulsar population and MSPs for gravity tests and Gravitational Wave detection	1/3
5	Pulsars	High precision timing for testing gravity and GW detection	1/3
13	HI	Resolved HI kinematics and morphology of $\sim 10^{10} M_{\odot}$ mass galaxies out to $z \sim 0.8$	1/5
14	HI	High spatial resolution studies of the ISM in the nearby Universe.	2/5
15	HI	Multi-resolution mapping studies of the ISM in our Galaxy	3/5
18	Transients	Solve missing baryon problem at $z \sim 2$ and determine the Dark Energy Equation of State	=1/4
22	Cradle of Life	Map dust grain growth in the terrestrial planet forming zones at a distance of 100 pc	1/5
27	Magnetism	The resolved all-Sky characterisation of the interstellar and intergalactic magnetic fields	1/5
32	Cosmology	Constraints on primordial non-Gaussianity and tests of gravity on super-horizon scales.	1/5
33	Cosmology	Angular correlation functions to probe non-Gaussianity and the matter dipole	2/5
37 + 38	Continuum	Star formation history of the Universe (SFHU) – I+II. Non-thermal & Thermal processes	1+2/8

“Constraints on primordial non-Gaussianity and tests of gravity on super-horizon scales”

2点関数から非ガウス性をどうやって見積もるのか？

➤ スケール依存する銀河バイアス:

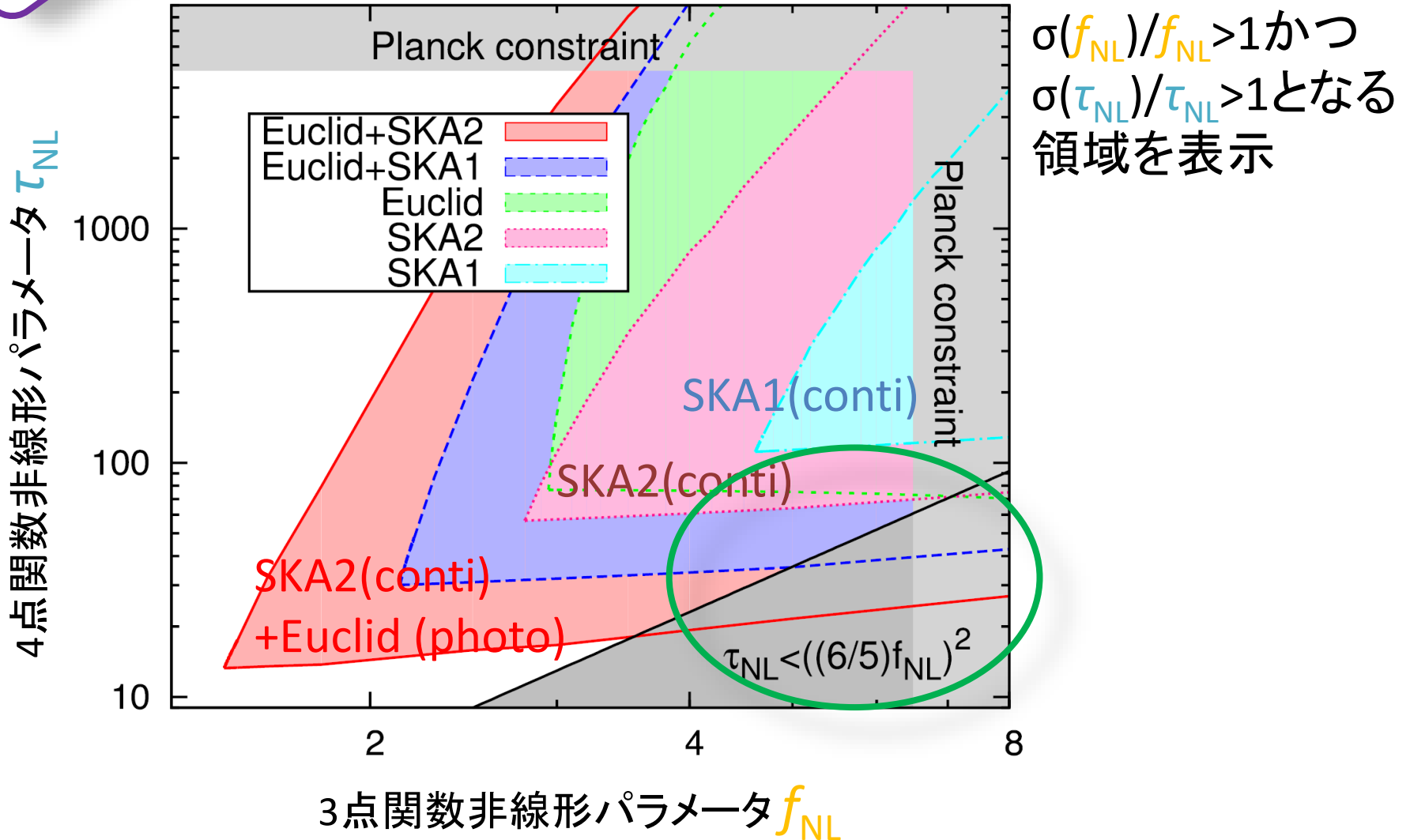
$$P_{\text{gal}} = [b_1(M, z) + f_{\text{NL}} \beta_f(M, z) / k^2 D_+(z)]^2 P_{\delta}$$



銀河サーベイを用いてCMBを超える精度で制限が可能になる！

我が国による貢献

整合性条件とその破れ



我が国による貢献

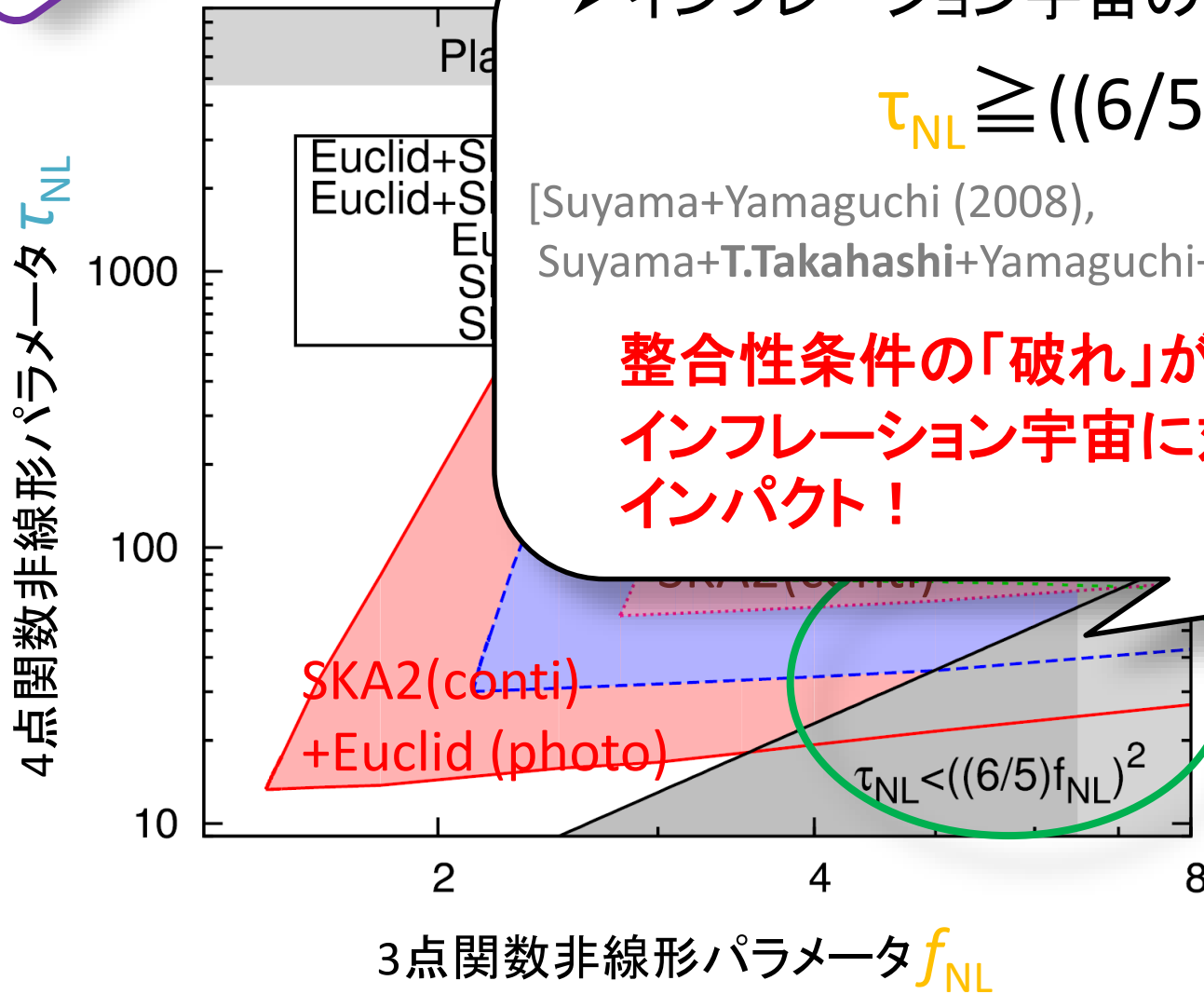
整合性条件とその破れ

➤ インフレーション宇宙の整合性条件

$$\tau_{NL} \geq ((6/5)f_{NL})^2$$

[Suyama+Yamaguchi (2008),
Suyama+T.Takahashi+Yamaguchi+S.Yokoyama (2010)]

整合性条件の「破れ」が見えた場合、
インフレーション宇宙に対して絶大な
インパクト！



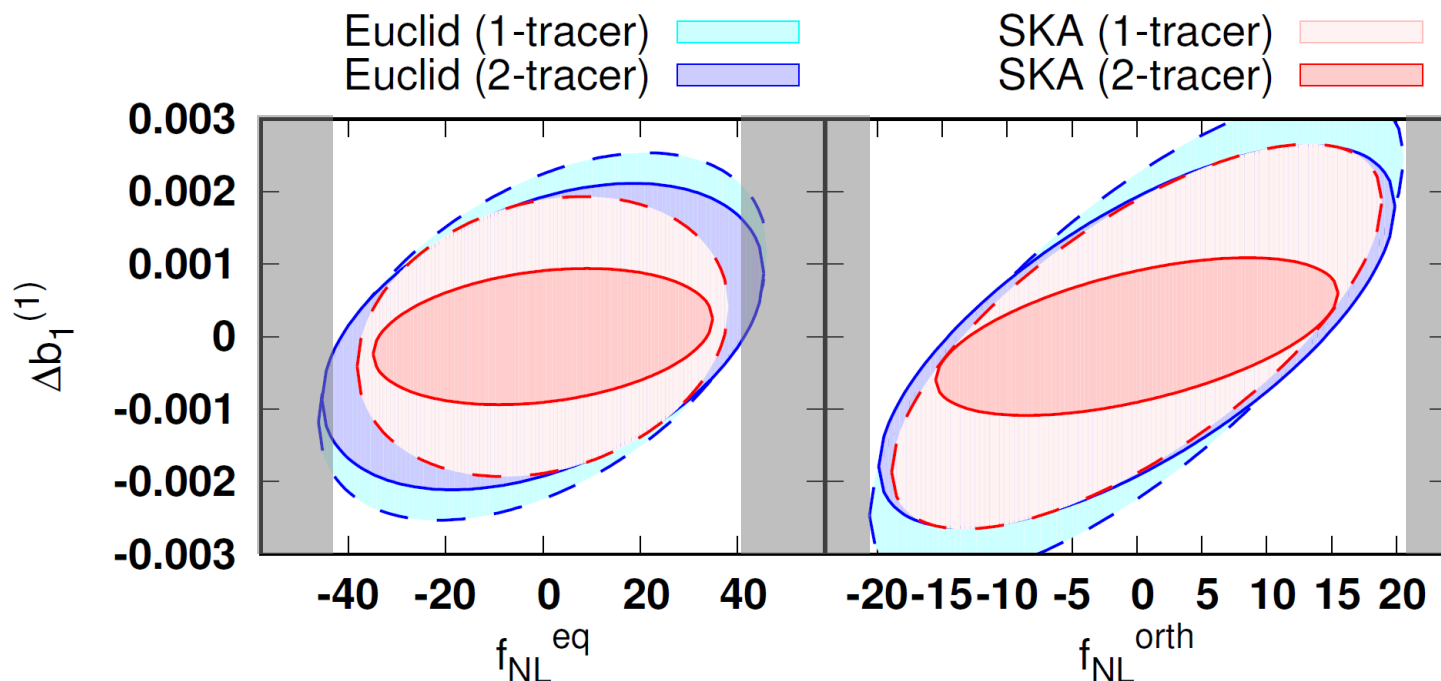
揺らぎの生成機構の詳細に迫る

➤ 銀河バイスペクトル解析 → 原始宇宙の多様な情報を含む！

[DY+S.Yokoyama+K.Takahashi (2016)]

✓ 正三角形型: **音速**に敏感

✓ 直交型: **真空状態**に敏感



✓ 局所型のスケール依存性: **揺らぎ生成モデル**(カーバトン等)に依存

[DY+S.Yokoyama+T.Takahashi in prep.]

まとめ

- 次世代の低周波電波サーベイでは宇宙論に適した**多様な**サーベイを行うことができる
 - ✓ HI赤方偏移銀河サーベイ
 - ✓ HI強度マッピングサーベイ
 - ✓ 電波連続線サーベイ
- 多様なサーベイを組み合わせ、他波長観測との**シナジー**によってこれまでにない精度・規模での宇宙論を展開できる！

Thank you!