

SKAによる宇宙論



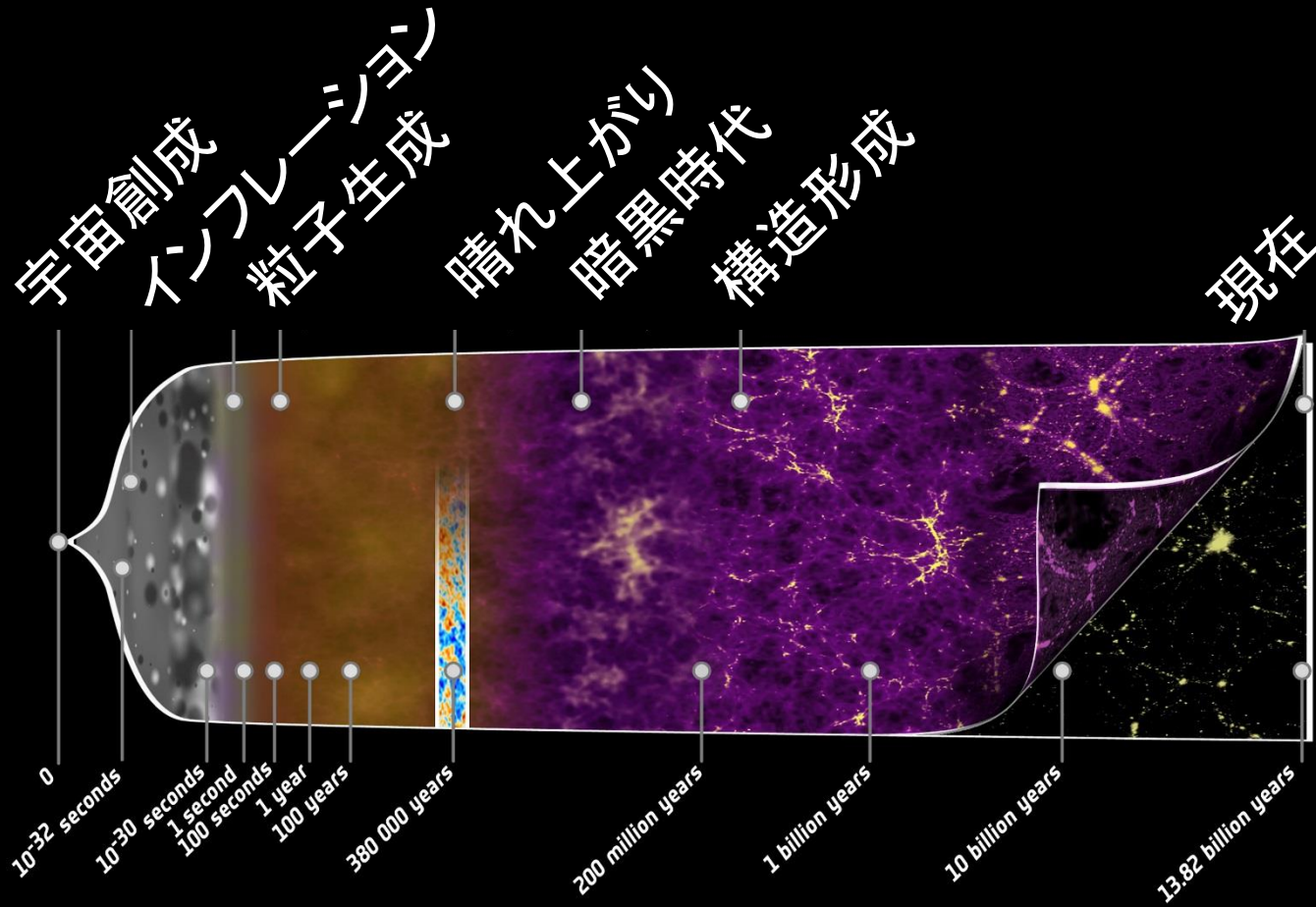
山内大介

東京大学

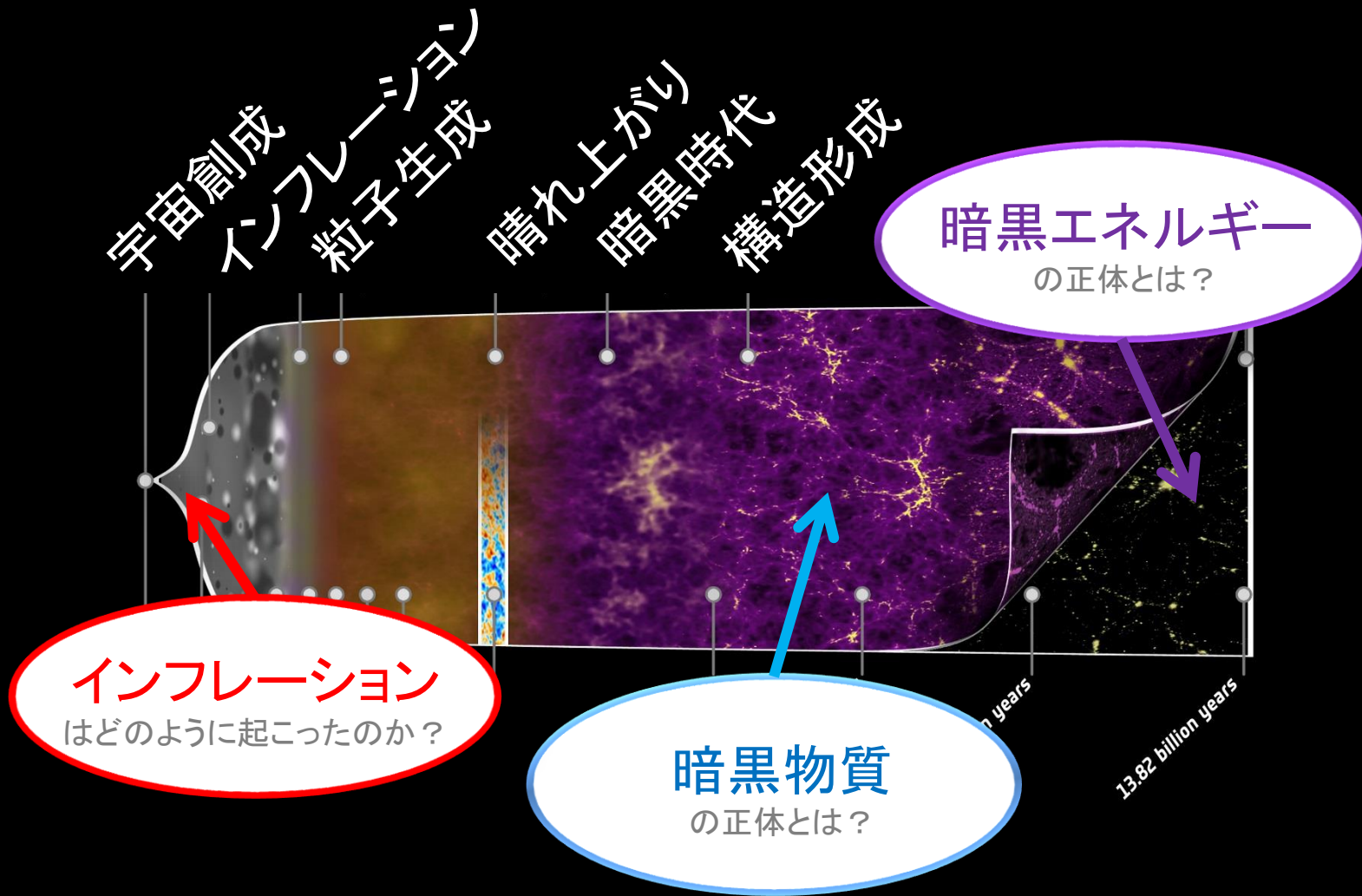
ビッグバン宇宙国際研究センター

& SKA-JP宇宙論科学検討班

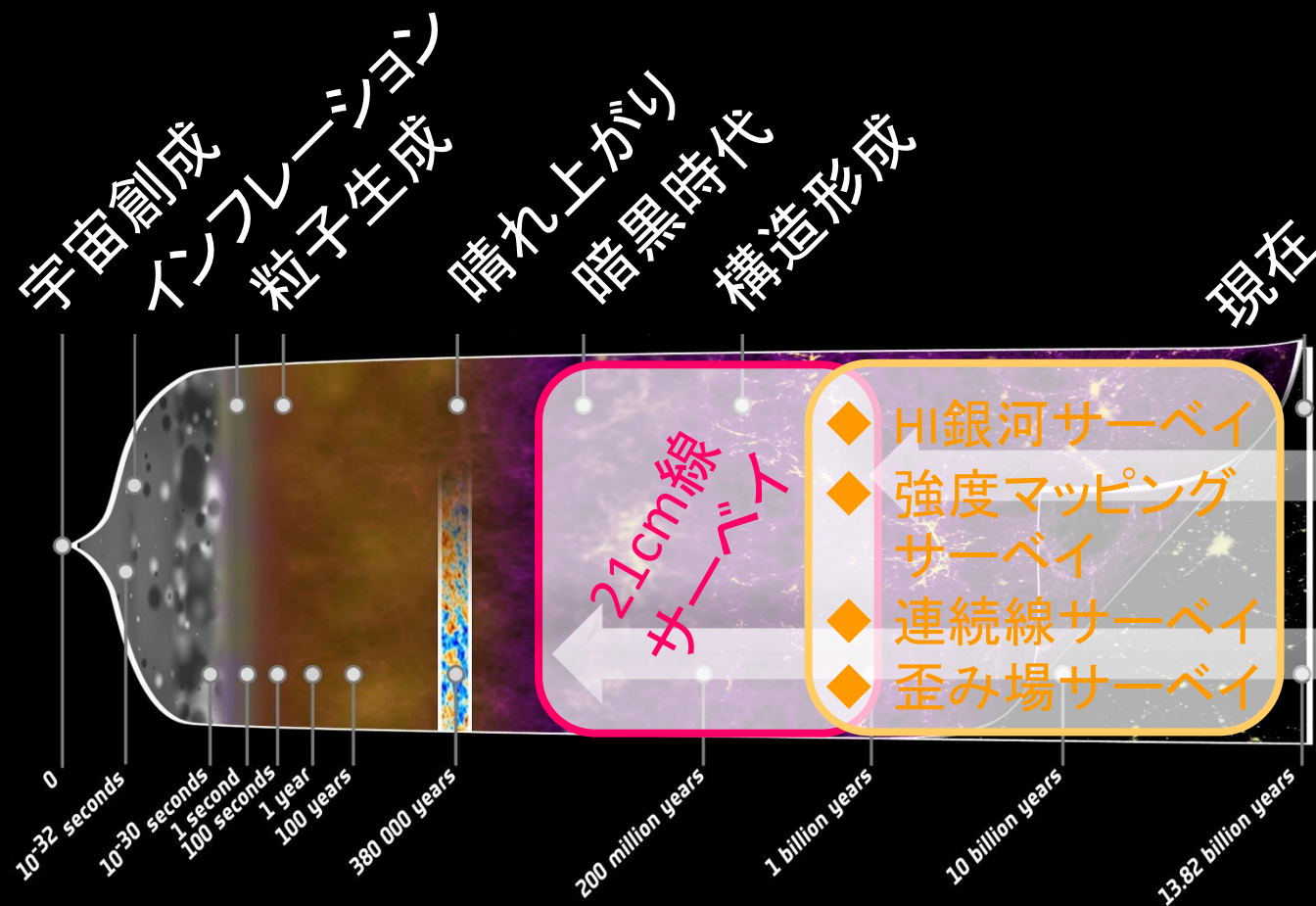
標準宇宙論と未解決問題



標準宇宙論と未解決問題



SQUARE KILOMETRE ARRAY による宇宙論



SKA (中間周波数帯)



SKA (低周波数帯)



➤ HI輝線サーベイ

✓ HI銀河赤方偏移サーベイ (gal)

- 赤方偏移情報 ($z < 2$)
- 銀河分布

新たな観測手法
最初の観測
[Chang+(2010)]

✓ HI強度マッピングサーベイ (IM)

- ピクセル内の全ての21cm放射の積分量を観測
- SKA1でも高赤方偏移($z < 3$)+広範な掃天

✓ 21cm線(HI)サーベイ

- 再電離期以前の中性水素の分布

新たな分野

➤ 銀河連続線サーベイ (conti)

- シンクロトロン放射
- 赤方偏移はわからないが、感度高い ($z < 6$)
- 弱重力レンズ効果

系統誤差の削減

観測量	サーベイ	SKA-phase	赤方偏移 (z)	掃天範囲 (deg ²)	銀河数 (個)
21cm輝線	HI銀河赤方偏移 サーベイ (gal)	SKA1 MID(B2)	z<0.8	5,000	~ 10 ⁷
		SKA2	z<2	all-sky	~ 10 ⁹
21cm輝線	HI強度マッピング サーベイ (IM)	SKA1 MID(B1+2) & LOW	z<3	all-sky	--
		SKA2	z<3.7	all-sky	--
シンクロ トロン放射	銀河連続光 サーベイ (conti)	SKA1 MID(B2)	z<6	all-sky	~ 10 ⁸
		SKA2	z<6	all-sky	~ 10 ⁹
シンクロ トロン放射	歪み場弱重力 レンズサーベイ	SKA1 MID(B2)	z<3	5,000	3 [arcmin ⁻²]
		SKA2	z<6	all-sky	10 [arcmin ⁻²]
可視/光赤外	Euclid		z<2	15,000	~ 10 ⁸

観測量	サーベイ	観測装置	赤方偏移	観測範囲	銀河数 (個)
21cm輝線	HI銀河赤方偏移サーベイ (gal)	SKA2	$z < 2$	all-sky	$\sim 10^7$
21cm輝線	HI強度マッピングサーベイ (IM)	SKA1 MID(B1+2) & LOW	$z < 3$	all-sky	--
		SKA2	$z < 3.7$	all-sky	--
シンクロトロン放射	銀河連続光サーベイ (conti)	SKA1 MID(B2)	$z < 6$	all-sky	$\sim 10^8$
		SKA2	$z < 6$	all-sky	$\sim 10^9$
シンクロトロン			$z < 3$	5,000	3 [arcmin ⁻²]
			$z < 6$	all-sky	10 [arcmin ⁻²]
可視/光赤外	Euclid		$z < 2$	15,000	$\sim 10^8$

“Billion galaxy survey”:
究極の宇宙論サーベイ

SKA1であっても
Euclidに匹敵！

SKA-JP宇宙論班が狙うサイエンス

1. 広視野：「超地平線スケール宇宙論」

山内、横山、高橋(慶)、大栗

- ✓ 密度揺らぎ：線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：介在しない

2. 深宇宙：「21cm線観測による深宇宙探査」

大山、郡、関口、島袋、高橋(慶)、高橋(智)、横山、吉川

- ✓ 密度揺らぎ：小スケールまで線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：再電離班との協働により分離

3. 理論予言：「精緻な理論模型構築と暗黒エネルギー」

クリーンな宇宙論観測

SKA-JP宇宙論班が狙うサイエンス

1. 広視野：「超地平線スケール宇宙論」

山内、横山、高橋(慶)、大栗

- ✓ 密度揺らぎ：線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：介在しない

2. 深宇宙：「21cm線観測による深宇宙探査」→ B09a 大山さん

大山、郡、関口、島袋、高橋(慶)、高橋(智)、横山、吉川

- ✓ 密度揺らぎ：小スケールまで線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：再電離班との協働により分離

3. 理論予言：「精緻な理論模型構築と暗黒エネルギー」

SKA-JP宇宙論班が狙うサイエンス

1. 広視野：「超地平線スケール宇宙論」

山内、横山、高橋(慶)、大栗

- ✓ 密度揺らぎ：線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：介在しない

2. 深宇宙：「21cm線観測による深宇宙探査」→ B09a 大山さん

大山、郡、関口、島袋、高橋(慶)、高橋(智)、横山、吉川

- ✓ 密度揺らぎ：小スケールまで線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：再電離班との協働により分離

3. 理論予言：「精緻な理論模型構築と暗黒エネルギー」

目的：銀河バイアスを通じた インフレーション機構の決定

最後の
ピース

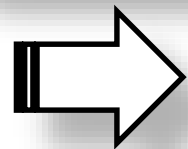
➤ 原始揺らぎの統計性

観測済み

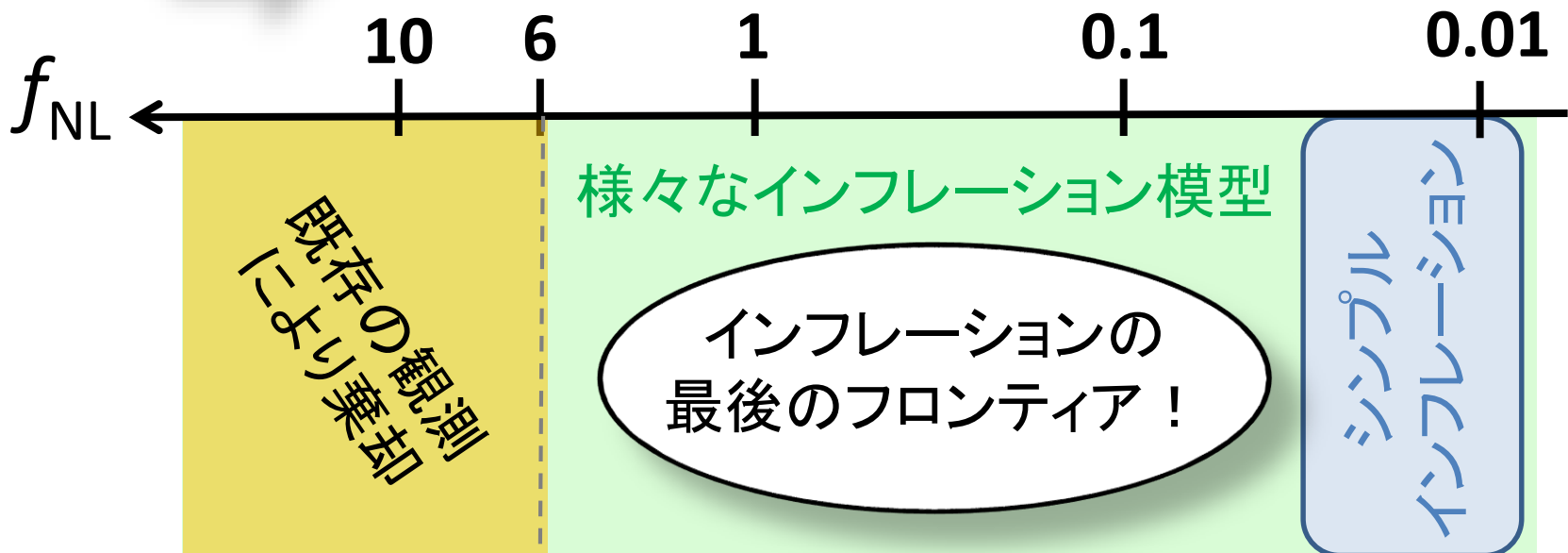
➤ 原始曲率揺らぎ

観測近し

➤ 原始重力波

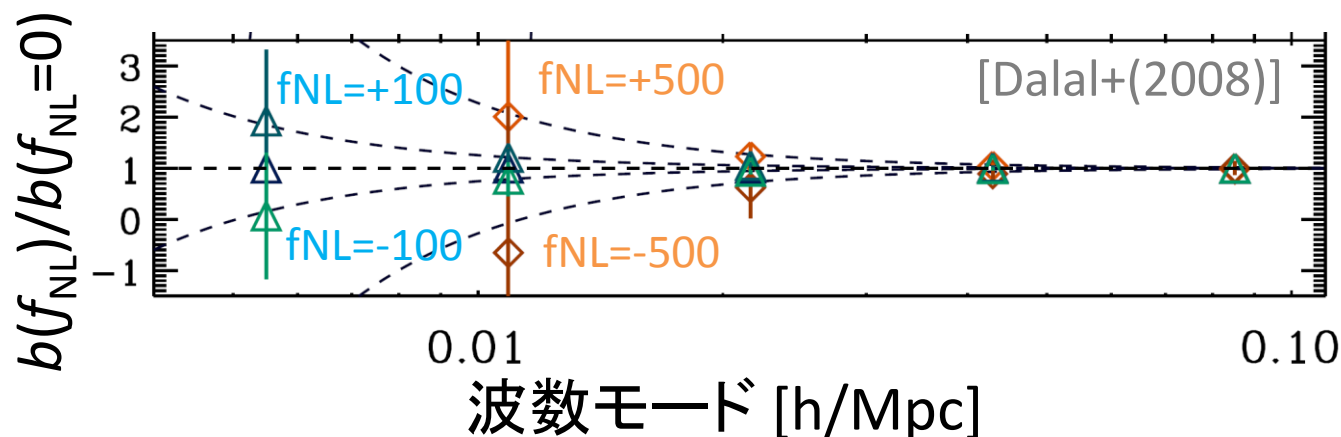


SKA銀河サーベイで探査可能



原始非ガウス性探査

- 原始非ガウス性 → スケールに依存するバイアス



- 超地平線スケール観測が鍵！

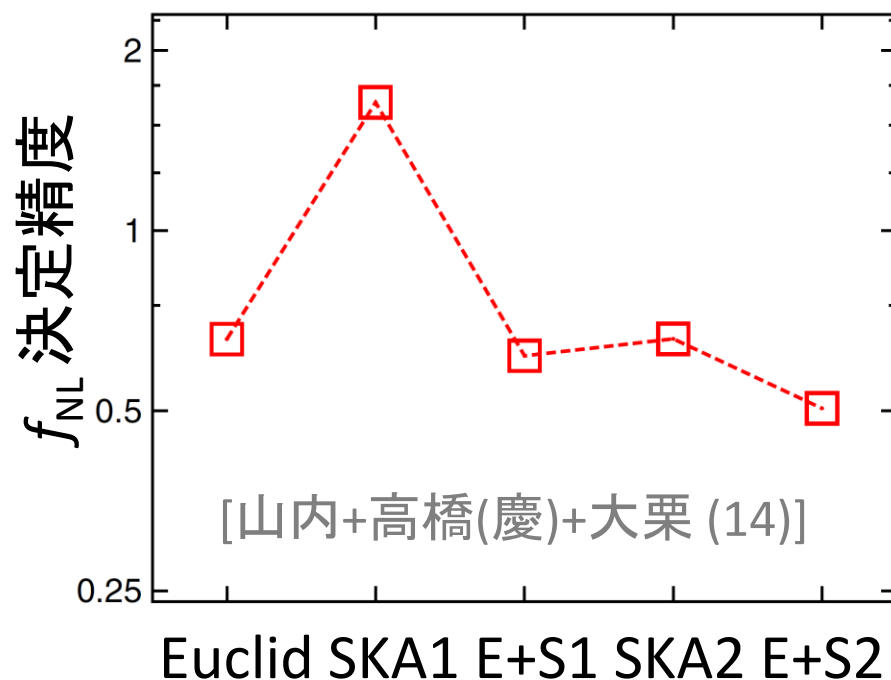
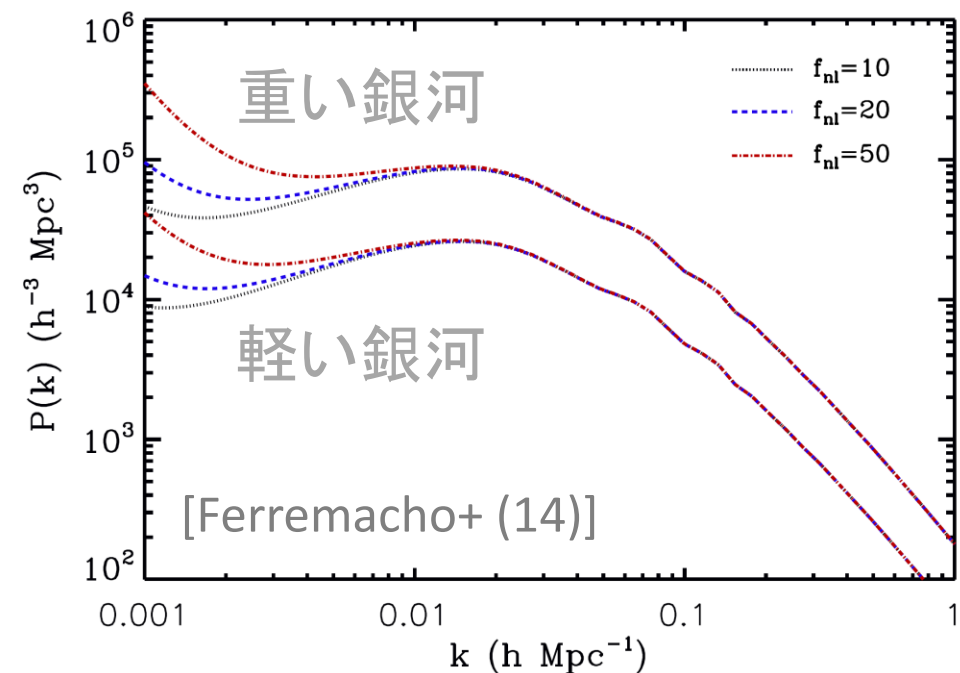
✓ マルチトレーサー法 [Seljak (2009)]

: 形態分類した銀河サンプルを解析することで、コズミックバリエーションに依らずにバイアスの「比」を決定できる！

ターゲット：形態分類した 銀河サンプルのパワースペクトル

Euclid : 5つの質量ビン

SKA[連続波]: 5種類の形態分類



性能要求

✓ 3 μJy depth

✓ 分解能 : 1 arcsec

✓ 掃天 : 30,000 deg^2

✓ 積分時間 : 10^4 時間

将来計画

原始非ガウス性の理論的研究は
我が国による多くの重要な寄与
[SKA-JP SWG : 郡, 関口, 高橋(智),
高橋(慶), 横山]

➤ 原始非ガウス性 + マルチトレーサー法

✓ 原始ガウス性の一般化 : f_{NL} , τ_{NL} , g_{NL} , $f_{\text{NL}}^{\text{eq}}$, $f_{\text{NL}}^{\text{orth}}$, ...

[e.g. Gong+Yokoyama (2011), Yokoyama+Matsubara (2011)]

これらを網羅的に調べなければ真のインフレーション模型
の全貌を明らかにすることはできない！

✓ 無矛盾条件 (須山-山口不等式)

$$\tau_{\text{NL}} \geq (36/25) (f_{\text{NL}})^2 \quad [\text{Suyama+Yamaguchi (2010)}]$$

インフレーション模型を決定付ける！

まとめ

- 電波宇宙論で未解決問題に決定打を！

インフレーション

はどのように起こったのか？

**Square
Kilometre
Array**

暗黒エネルギー

の正体とは？

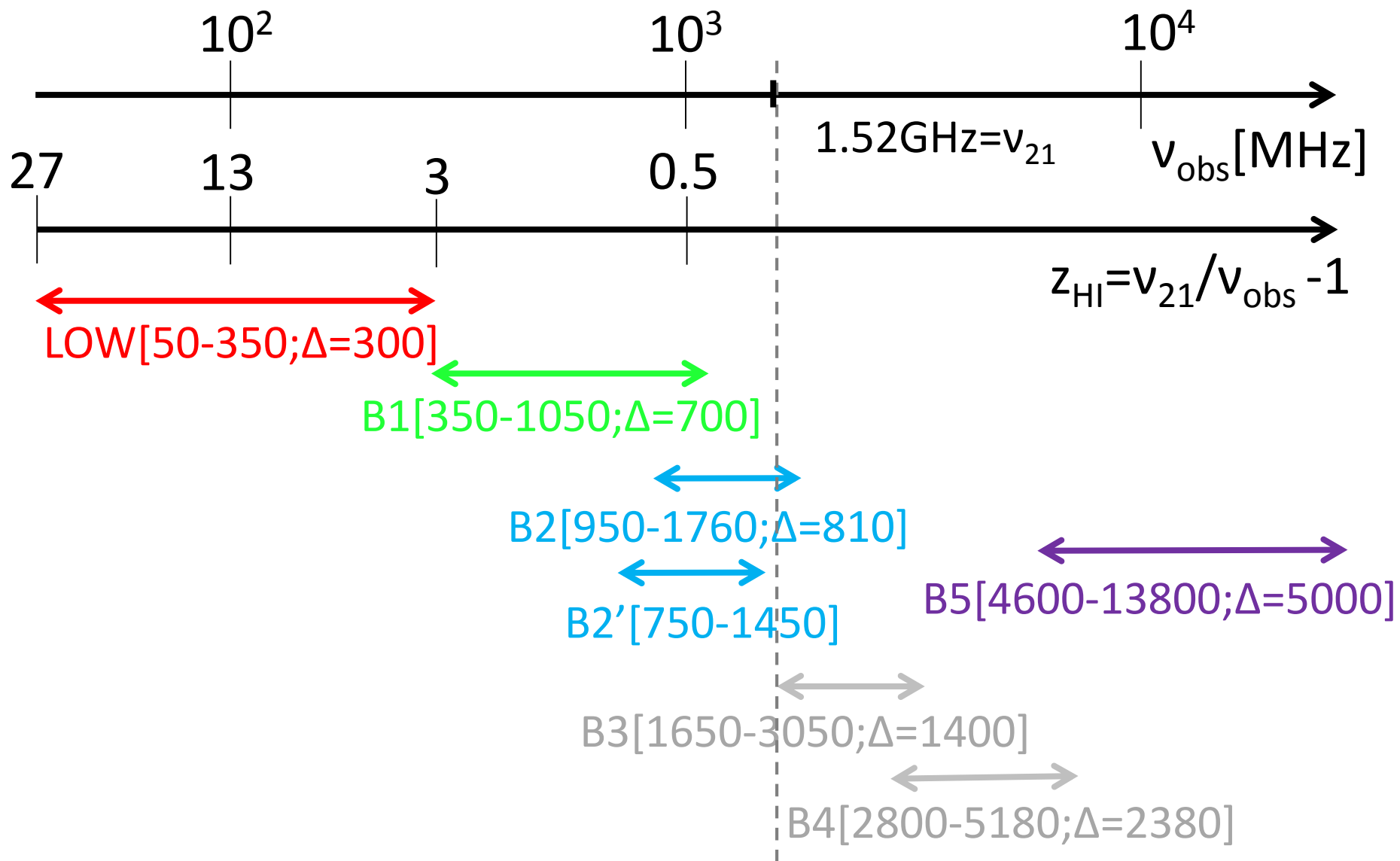
暗黒物質

の正体とは？

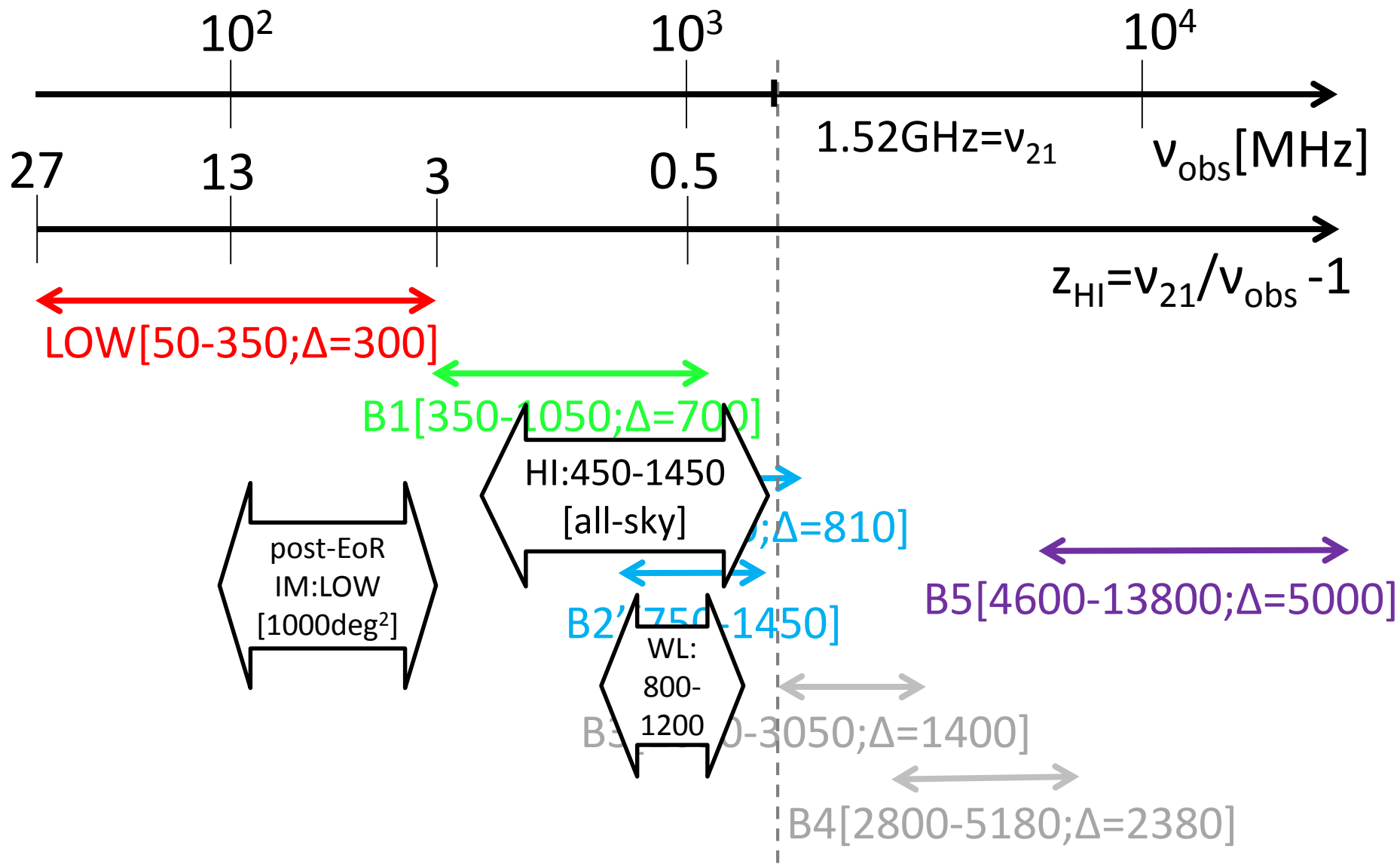
Proposed KSPs

- 3D map of the Universe across cosmic time
 - All-sky, B1, 10^4 hrs, high- z HI IM out to $z \sim 2$, drift scan, using auto-correlation for large-scale and interferometer data
- Testing the foundations of cosmology with radio continuum
 - All-sky, B2 (centered at 1GHz), 10^4 hrs
- Direct mapping of dark matter with weak lensing
 - All-sky, B2, 10^4 hrs
 - 1000 deg^2 , B2, 10^4 hrs
 - 10 deg^2 , B2, 10^3 hrs, calibration for WL (pol data)

SKA1周波数割り当て



宇宙論KSP



survey	cosmo	conti	HI	EoR	mag	pulsar	Trans	MW
All sky	450-1450 :IM	50-250	B1 : abs	50-250 drift	B2(low)	300 (low)	B5, B2, (B1)	
1000 [deg2]	800-1200 :WL	~1000	B2 (4000deg2)	50-450 tomo, PS, abs	B1+B2		B5, B2, (B1)	B5
100 [deg2]		~1000	B2 (4000deg2)		2020 (60deg2)		B5, B2, (B1)	B5
10 [deg2]	800-1200 :calib		795-1470		B2 B5		B5, B2, (B1)	
1 [deg2]		B5	450-825		B5		B5, B2, (B1)	
0.08 [deg2]		B5	B2 targeted		Gal center	B5 : Gal center		

観測量	サーベイ		赤方偏移 (z)	掃天範囲 (deg ²)	銀河数 (個)
21cm輝線	HI銀河赤方偏移 サーベイ (gal)	SKA1 MID	z<0.7	5,000	~ 10 ⁷
		SKA2	z<2	30,000	~ 10 ⁹
21cm輝線	HI強度マッピング サーベイ (IM)	SKA1 MID	z<3	30,000	--
		SKA2	z<3.7	30,000	--
シンクロ トロン放射	銀河連続光 サーベイ (conti)	SKA1 MID	z<6	30,000	~ 10 ⁸
		SKA2	z<6	30,000	~ 10 ⁹
可視/光赤外	e.g. Euclid		z<2	15,000	~ 10 ⁸

$$\Delta\nu/\nu = 0.3 \text{ @ } 0.8\text{-}1.7[\text{GHz}]$$

$$\Delta\theta = 1 \text{ [arcsec]}$$

$$S = 1 \text{ }[\mu\text{Jy}]$$

$$t_{\text{int}} = 10^4 \text{ [hour]}$$

SKA-JP「宇宙論」科学検討班

市來淨與	(名古屋大)
井上進	(Max Planck Int.)
大栗真宗	(東京大)
大山祥彦	(東京大)
郡和範	(KEK)
島袋隼士	(名古屋大)
関口豊和	(Helsinki大)
高橋慶太郎	(熊本大)
高橋智	(佐賀大)
山内大介	(東京大)
横山修一郎	(立教大)
吉川耕司	(筑波大)

田代
浅羽

SKA-JP宇宙論班が狙うサイエンス

1. 広視野：「超地平線スケール宇宙論」

- ✓ 密度揺らぎ：線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：介在しない

2. 深宇宙：「21cm線観測による深宇宙探査」

- ✓ 密度揺らぎ：小スケールまで線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：再電離班との協働により分離

3. 理論予言：「精緻な理論模型構築と暗黒エネルギー」

クリーンな宇宙論観測

SKA-JP宇宙論班が狙うサイエンス

1. 広視野：「超地平線スケール宇宙論」

- ✓ 密度揺らぎ：線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：介在しない

2. 深宇宙：「21cm線観測による深宇宙探査」→ B09a 大山さん

- ✓ 密度揺らぎ：小スケールまで線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：再電離班との協働により分離

3. 理論予言：「精緻な理論模型構築と暗黒エネルギー」

SKA-JP宇宙論班が狙うサイエンス

1. 広視野：「超地平線スケール宇宙論」

- ✓ 密度揺らぎ：線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：介在しない

2. 深宇宙：「21cm線観測による深宇宙探査」→ B09a 大山さん

- ✓ 密度揺らぎ：小スケールまで線形領域
- ✓ 宇宙物理過程：再電離班との協働により分離

3. 理論予言：「精緻な理論模型構築と暗黒エネルギー」