

月面低周波電波干渉計による科学 ：暗黒時代21cm線による宇宙論



山内大介 (神奈川大学)

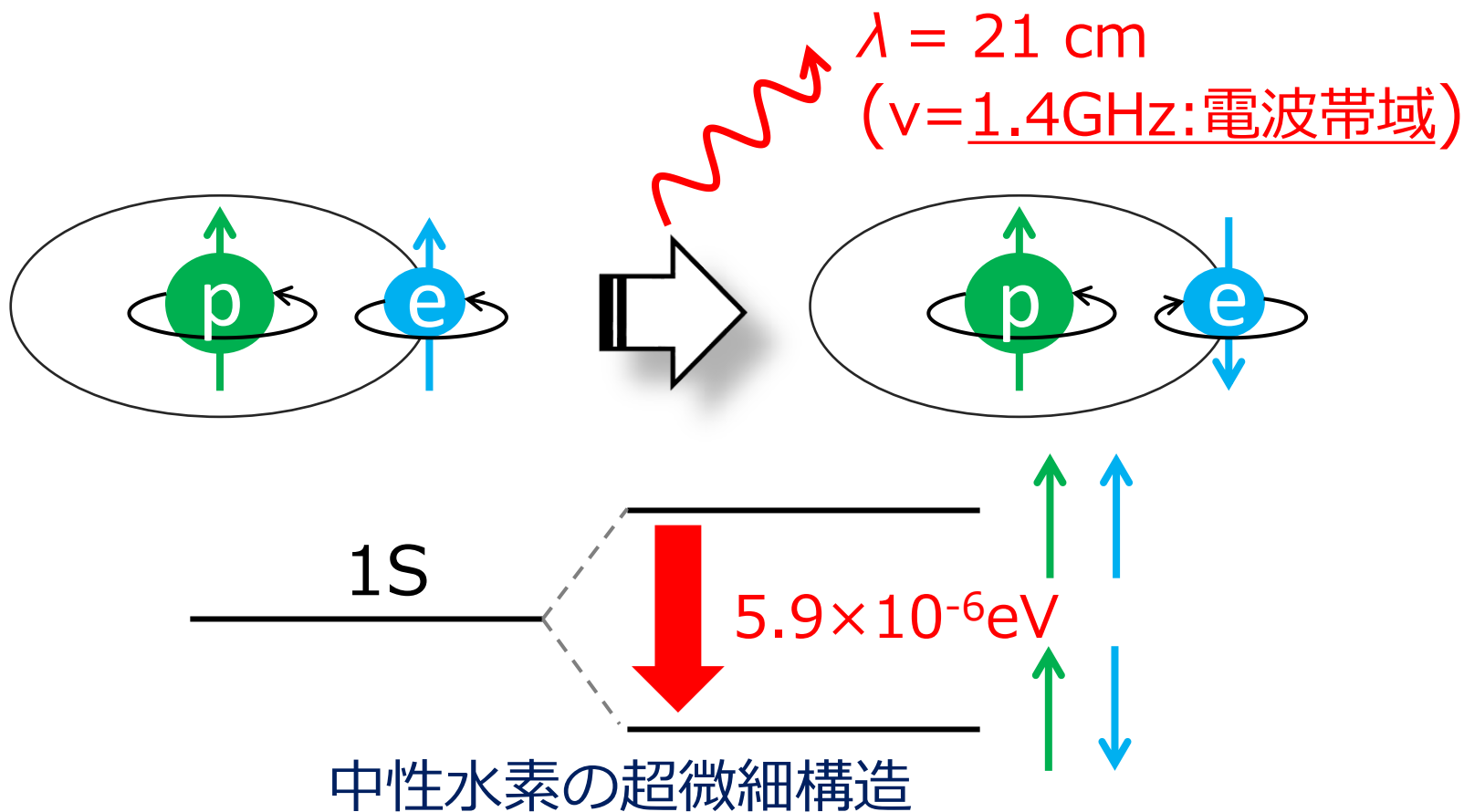
月面の科学フィジビリティスタディ「月面からの宇宙物理観測」グループ：
井口聖(自然科学研究機構国立天文台), 大西利和(大阪公立大学),
高橋慶太郎(熊本大学), 土屋史紀(東北大学), 磯部直樹, 岩田隆浩,
関本裕太郎, 宮崎康行, 山田亨, 佐伯孝尚, 森治, 吉光徹雄(宇宙科学研究所)

2022/09/15 天文学会 U09a

[関連：V132a(全体計画：山田亨 他), V133a(概念設計検討：井口聖 他)]

なぜ電波か？

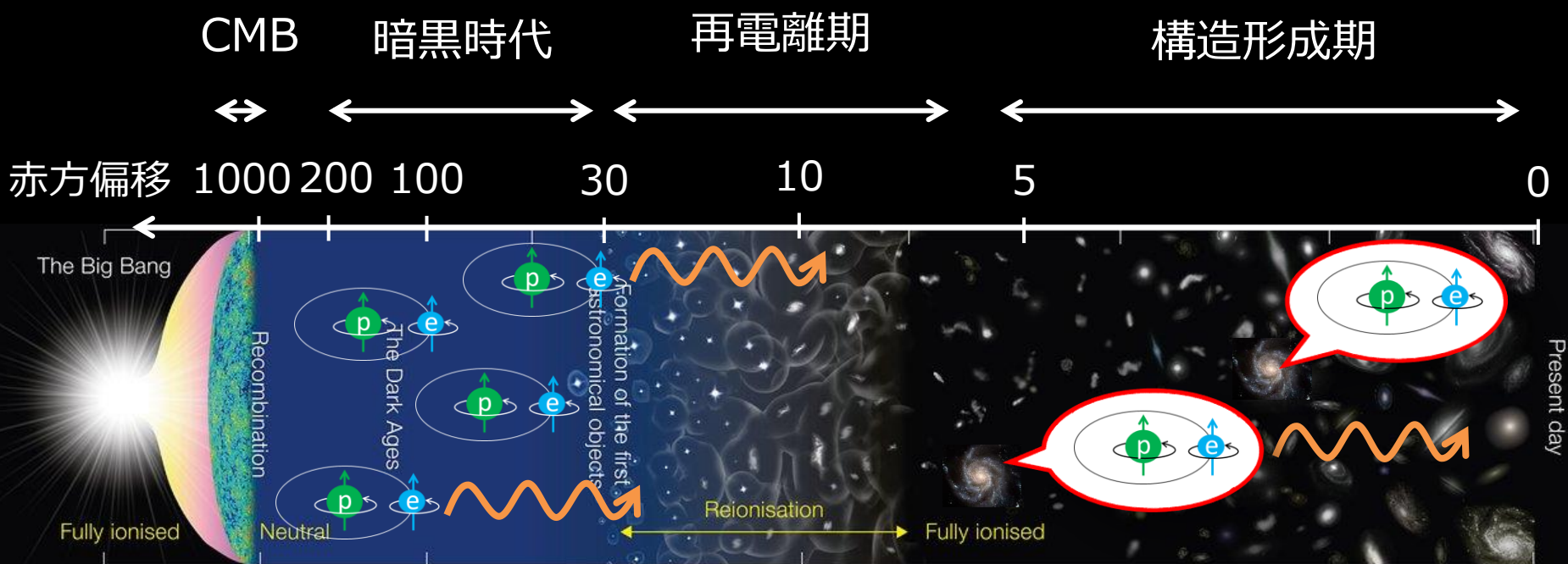
◆21-cm線:中性水素の超微細構造線



なぜ中性水素21cm線か？

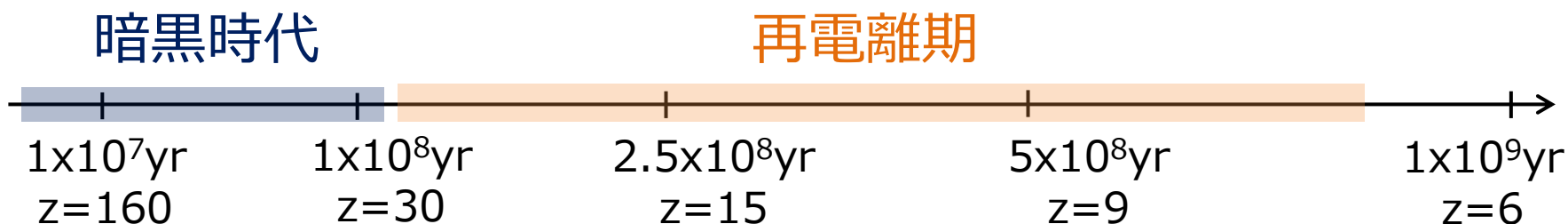
- 中性水素は高赤方偏移宇宙($z > 30$)における最も普遍的に存在する物質

⇒ 赤方偏移した21cm線は物質場のトレーサー

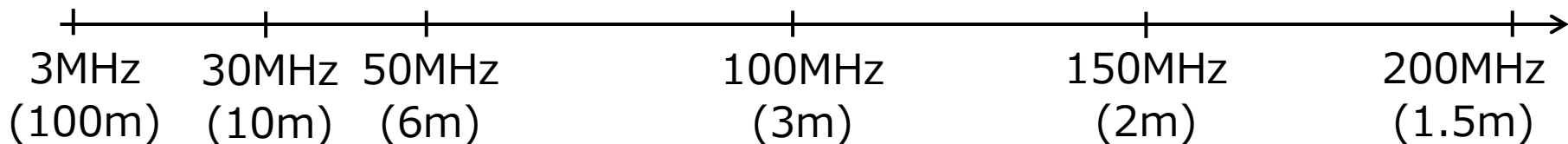


なぜ月面か？

宇宙年齢 (赤方偏移)



中性水素21cm線に対応する周波数 (波長)



月面観測

地球上観測

月面・月周回軌道21cm線観測計画

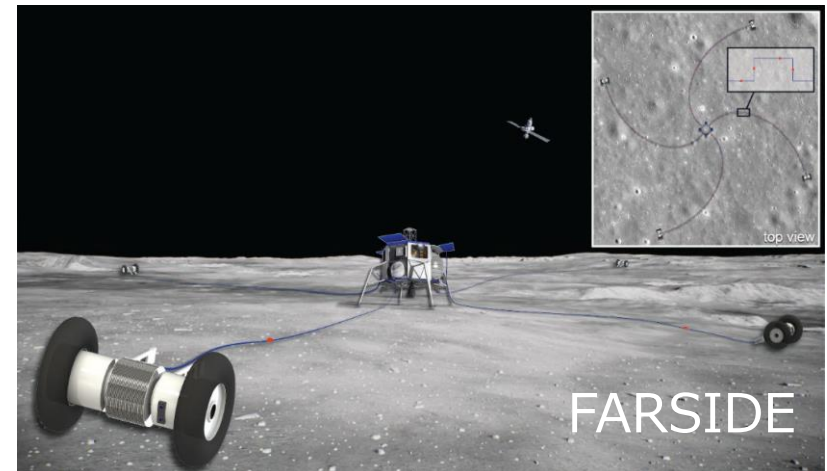
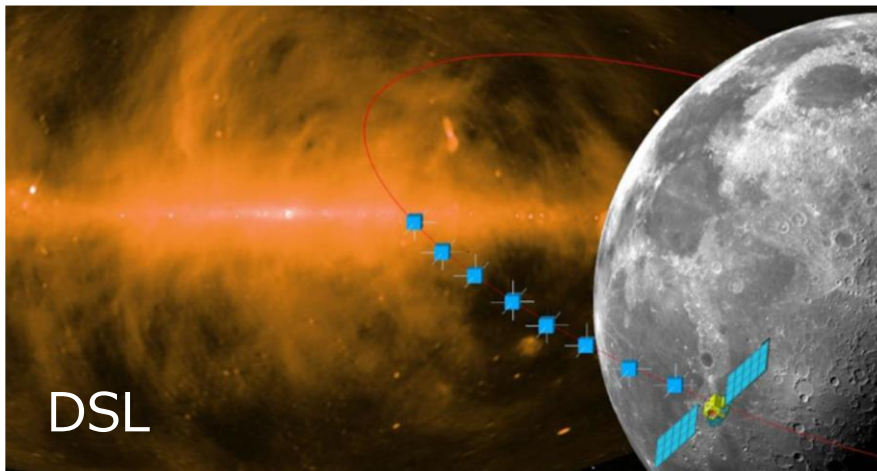
□ 月周回軌道

- DARE/DAPPER (NASA)
- DSL (China)
- NCLE (Netherland+China)
- CoDex (ESA)

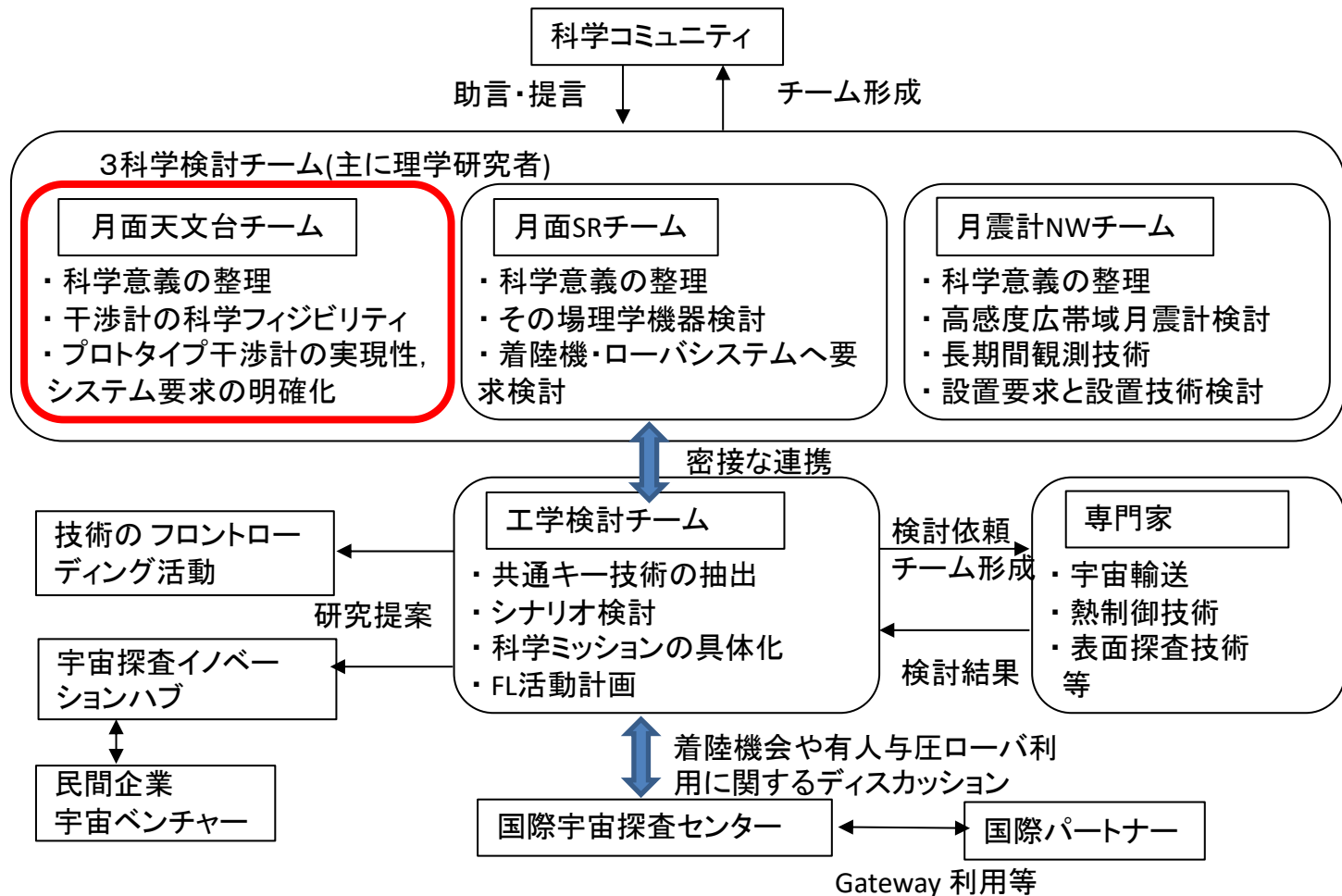
□ 月面 (月の裏側)

長期間にわたる安定な観測が可能！

- FAR SIDE (NASA)
- LCRT (NASA)
- 今回のトーク



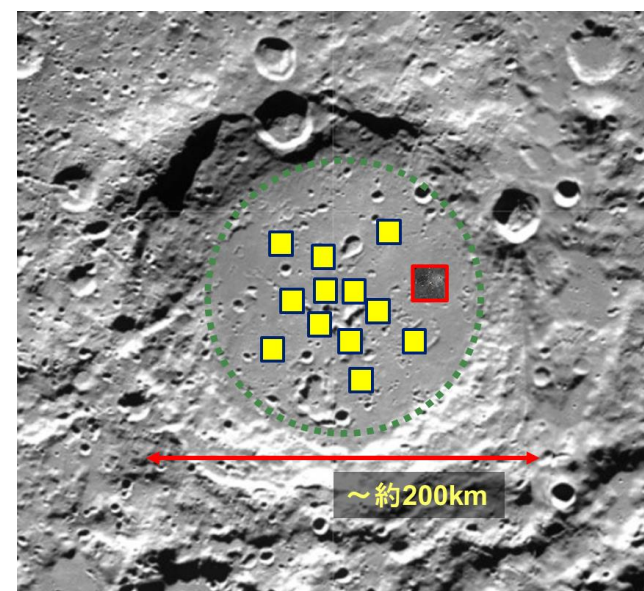
JAXAフィジビリティスタディ 「第一級の月面科学を実現するための シナリオと実現性の検討」



月面天文台に向けて

◆ 日本のチャレンジ :

月面~100km基線の電波干渉計



☑ 2022年

月面天文台フィジビリティ検討

☑ (2022年9月アルテミス1打ち上げ)

☑ 2020年代後半

LEADミッション(JAXA) → 月面での実証(LOPTA)

☑ 2030年台

3台ユニットによる干渉計の実現

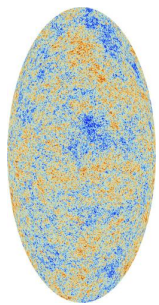
☑ >2040年台

~100台, ~100km基線干渉計の実現

V132a 山田 他
(全体計画)
V133a 井口 他
(概念設計検討)

観測量

□ CMB温度に対する21cm線輝度温度の差



T_{CMB}



- 光学的厚さ τ_{21}
- スピン温度 T_s

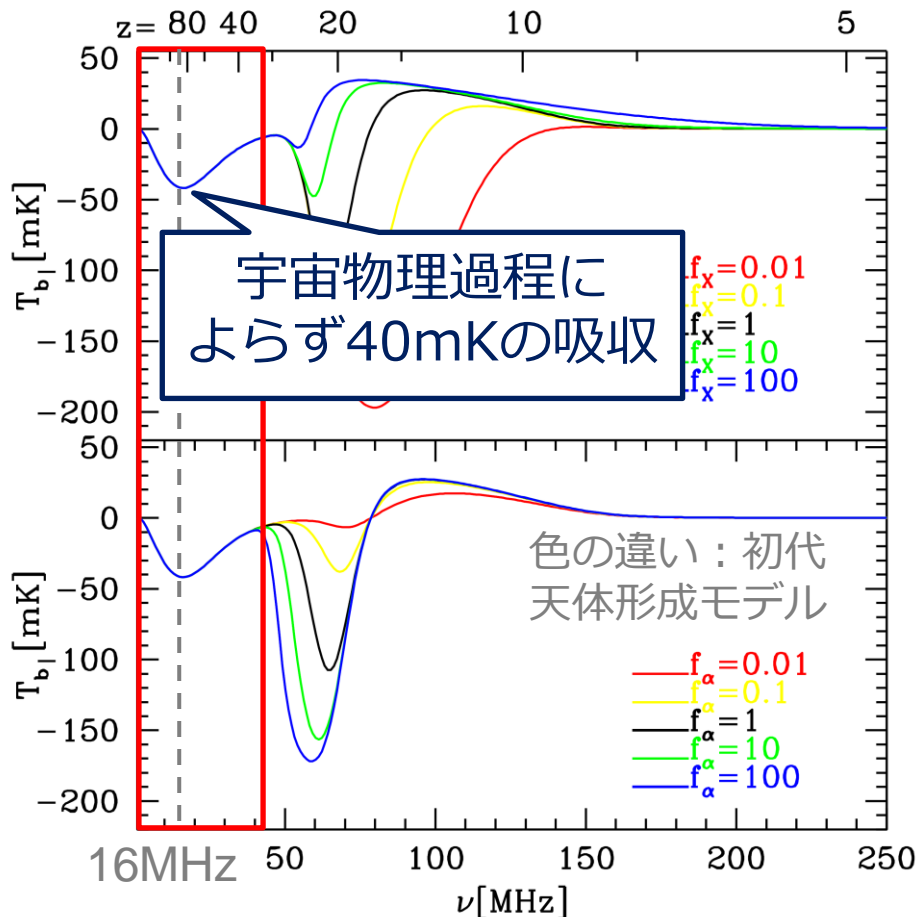


$T_{\text{CMB}} + T_{21}$

$$T_{21} = \frac{T_s - T_{\text{CMB}}}{1 + z} (1 - e^{-\tau_{21}})$$

21cm線グローバルレシグナル

--空間的な平均温度



Pritchard+Loeb PRD82(2010)023006

特徴

- 星形成・宇宙再電離の不定性がなく、純粹に宇宙論のみで決まる
- 不定性のない予言が可能
- もし予言と異なるシグナルを発見したら...

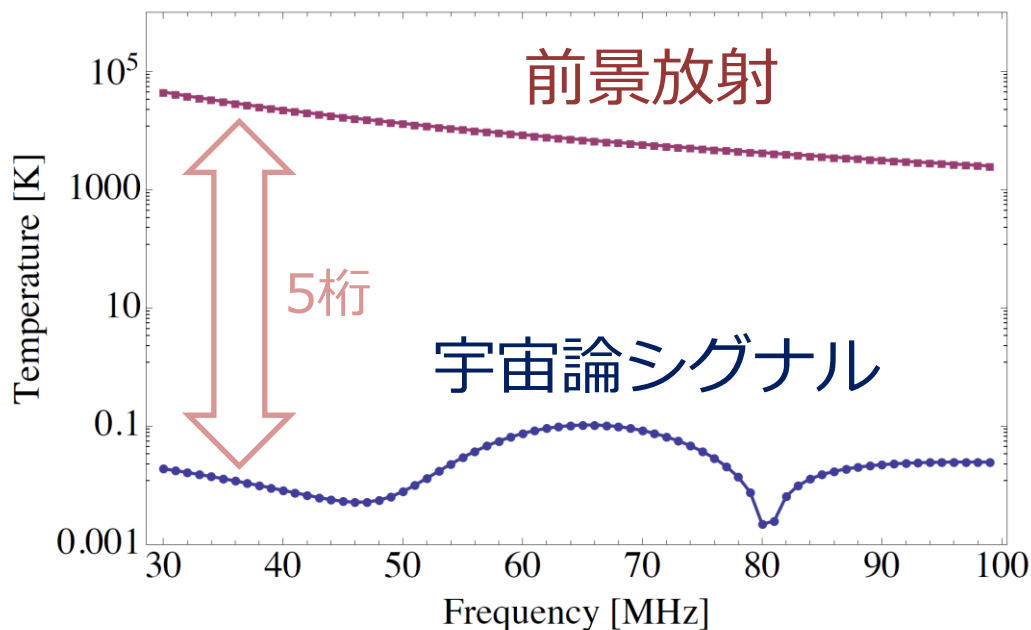
明らかな「標準宇宙論の破れ」の証拠

非常に大きなインパクト

フィージビリティスタディ検討

--観測周波数に関する科学要件

Liu+PRD87 (2013) 4, 043002



◆ 周波数の科学要件

✓ 最低周波数

$$\nu_{\min} < 10\text{MHz}$$

[$z < 150$ 信号計測。惑星電波にはより低周波が必要。]

✓ 周波数分解能

$$\delta\nu < 1\text{MHz}$$

[宇宙論のみ。RFI除去のためには高分解能必要。]

◆ 周波数帯域幅 $\Delta\nu$ 要求

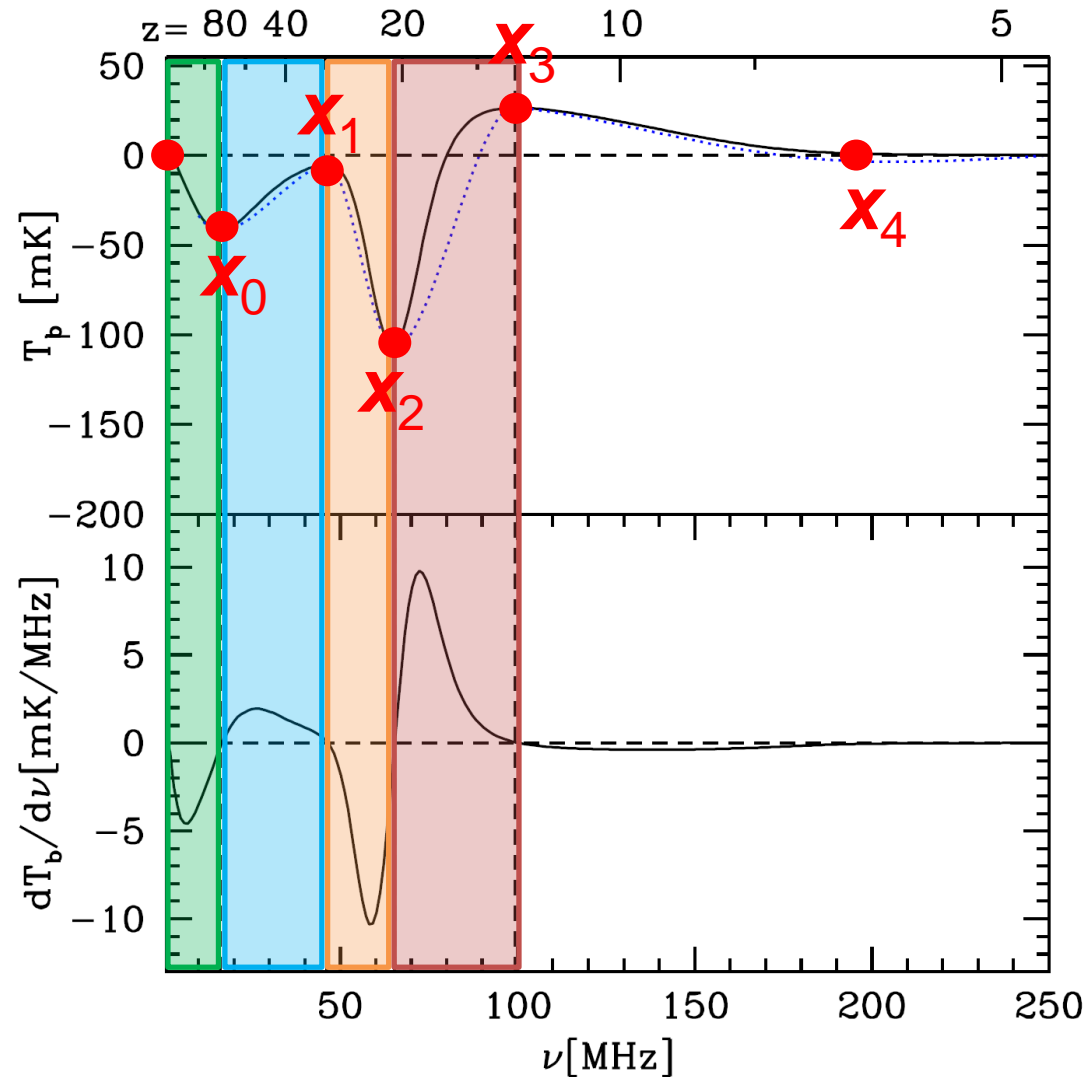
□ 前景放射除去のため
広帯域が必要 (次頁)

グローバルレシグナル解析模型

Pritchard+Loeb PRD82(2010)023006

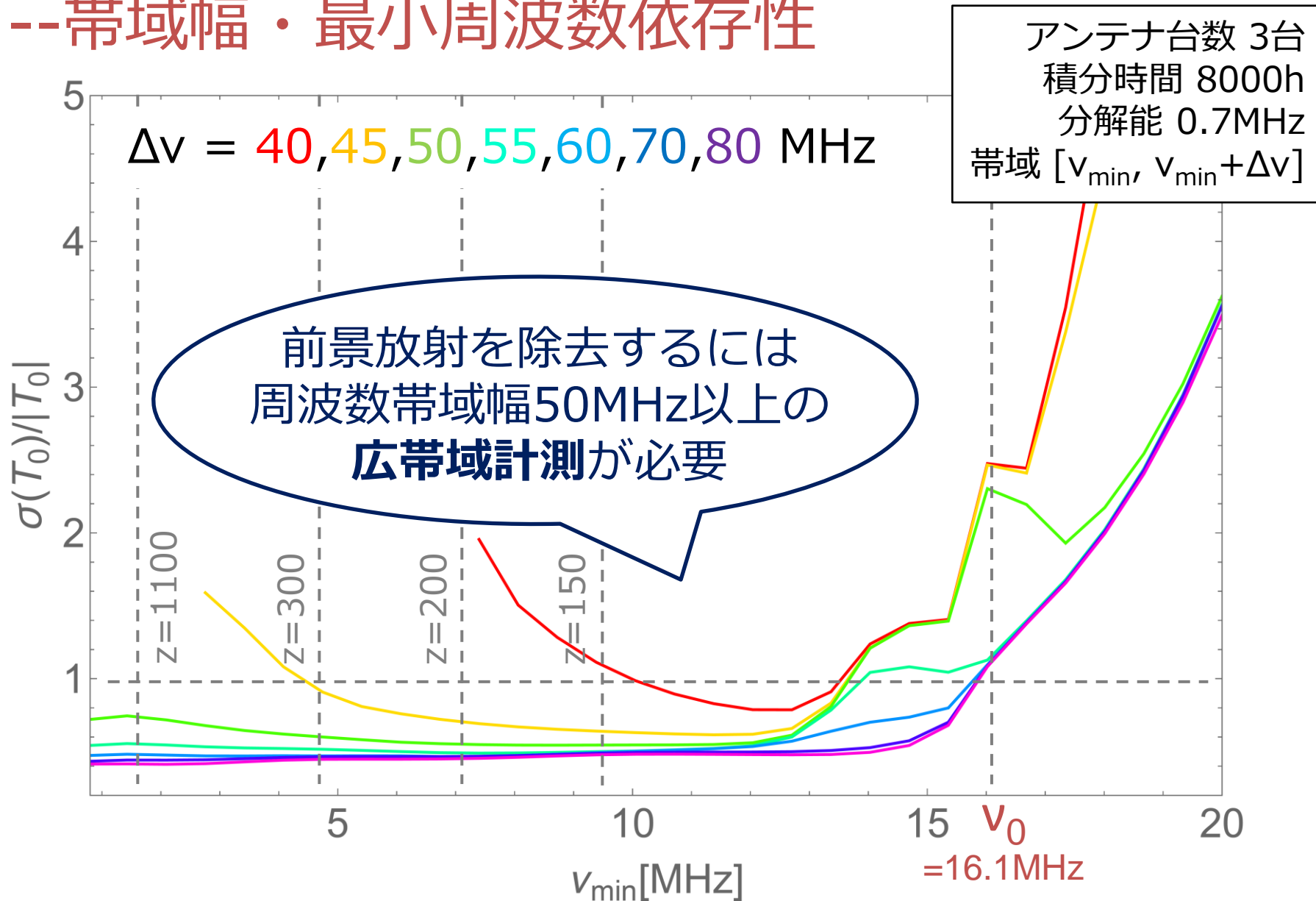
- Turning point model

- 5つの極値でパラメータ化
- $\mathbf{x}_0 = (16.1\text{MHz}, -42\text{mK})$
[暗黒時代のピーク]
- $\mathbf{x}_1 = (46.2\text{MHz}, -5\text{mK})$
[暗黒時代-宇宙の夜明け]
- $\mathbf{x}_2 = (65.3\text{MHz}, -107\text{mK})$
[Ly α , X線強度に依存]
- $\mathbf{x}_3 = (99.4\text{MHz}, 27\text{mK})$
[宇宙の夜明け-再電離期]
- $\mathbf{x}_4 = (180\text{MHz}, 0\text{mK})$
- \mathbf{x}_n から \mathbf{x}_{n+1} までは
3次曲線でフィット



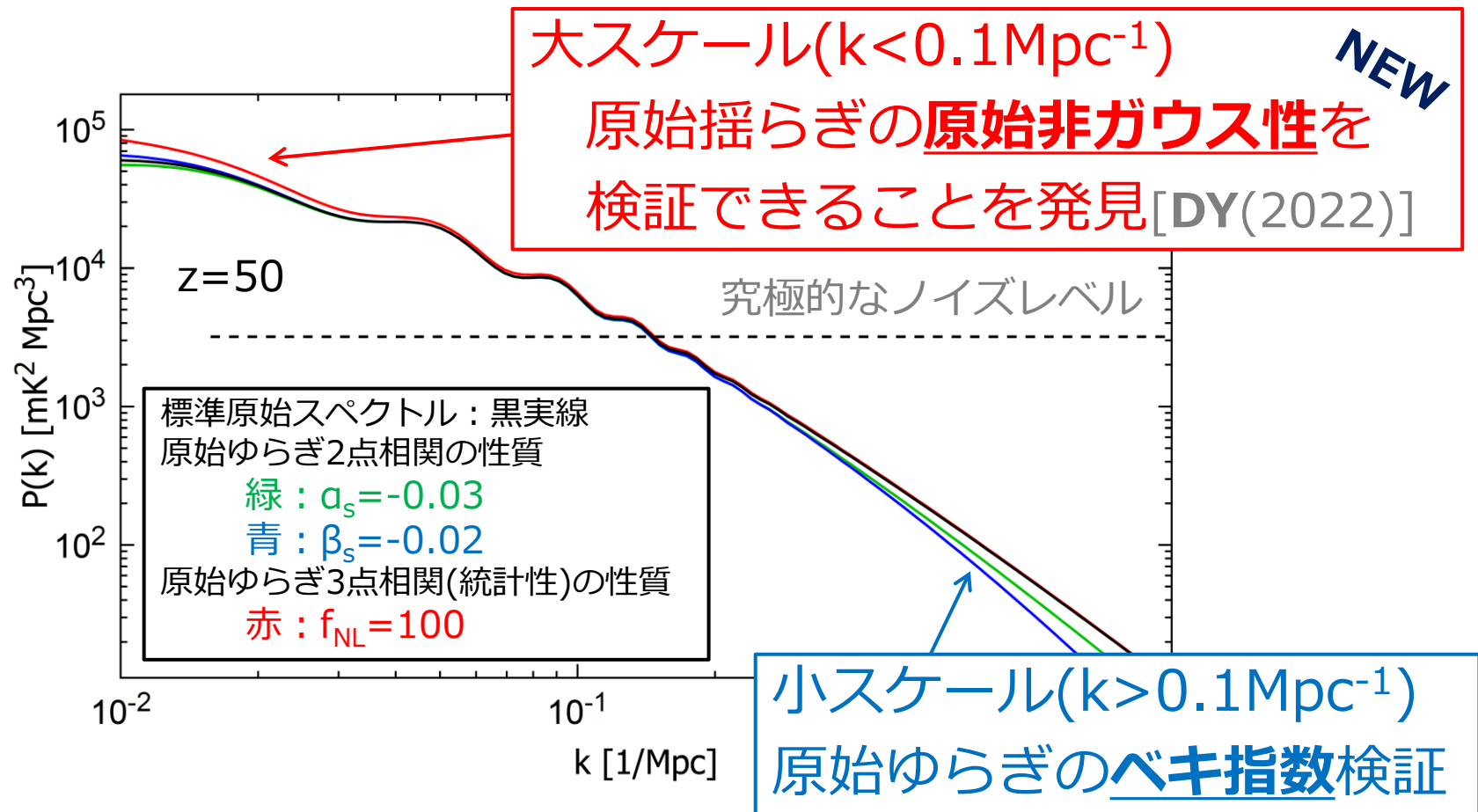
暗黒時代ピーク温度決定精度

--帯域幅・最小周波数依存性



将来：21cm線揺らぎ計測による インフレーションの検証

□ 究極目標：インフレーションへの決定打



まとめ

- ☑ **宇宙暗黒時代の21cm線グローバルシグナル**
[40 mKの吸収 @ 15 MHz ($z \sim 90$ に相当)]
 - ◆ 星形成や宇宙再電離の影響を受けず、
純粹に宇宙論のみで決まる
 - ◆ 理論予言と異なるシグナルの発見…
→ 明らかな「**標準宇宙論の破れ**」の証拠
 - ◆ 地球電離圏の影響で地球上からは観測難
→ 月面低周波干渉計
 - ◆ **月面の科学フィジビリティ検討**が進行中
- ☑ **21cm線揺らぎ** → インフレーションの検証