



電波観測による 重力理論の検証

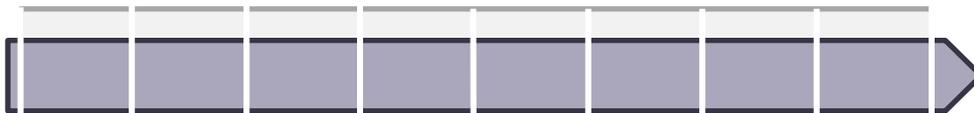
山内大介
岡山理科大学



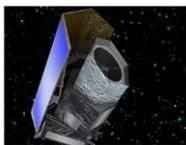
2024 2026 2028 2030 2032



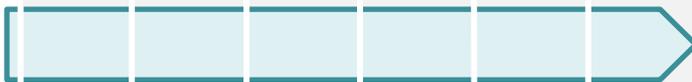
すばる望遠鏡
(可視・赤外)



Rubin望遠鏡
(可視光)



Euclid宇宙望遠鏡
(可視・近赤外線)



Roman宇宙望遠鏡
(近赤外線)



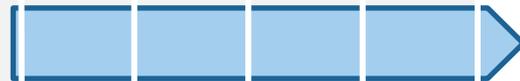
Simons Observatory
(CMB)



LiteBIRD衛星
(CMB)



**Square Kilometre
Array天文台 (電波)**

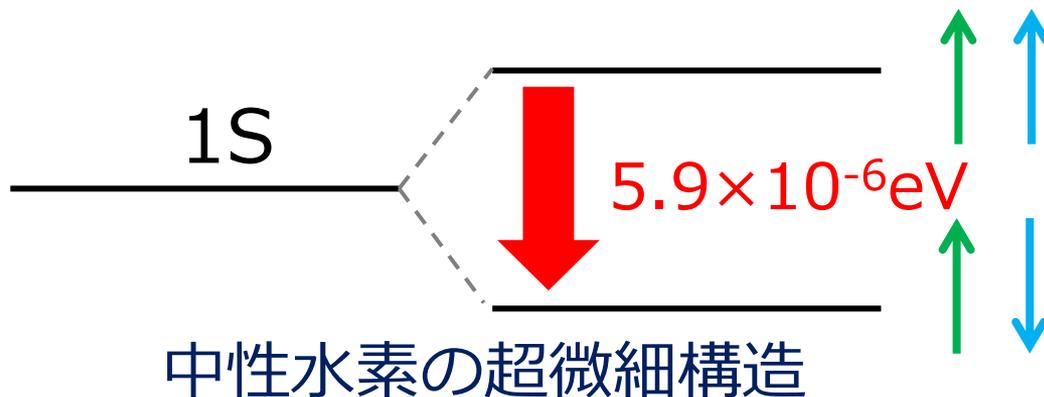
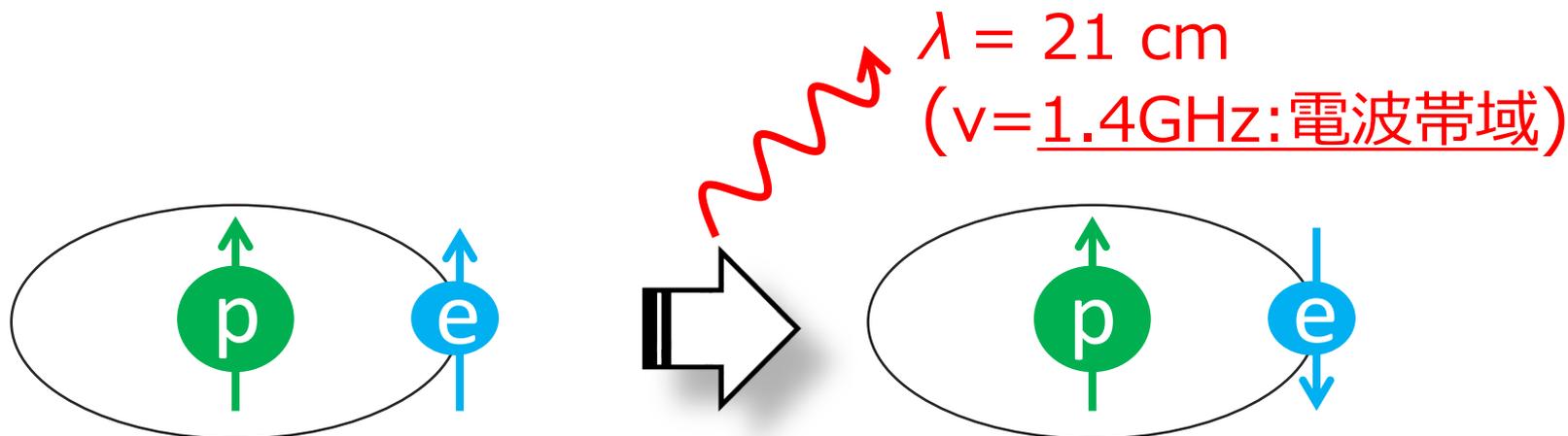


月面天文台 (電波)



なぜ電波か？

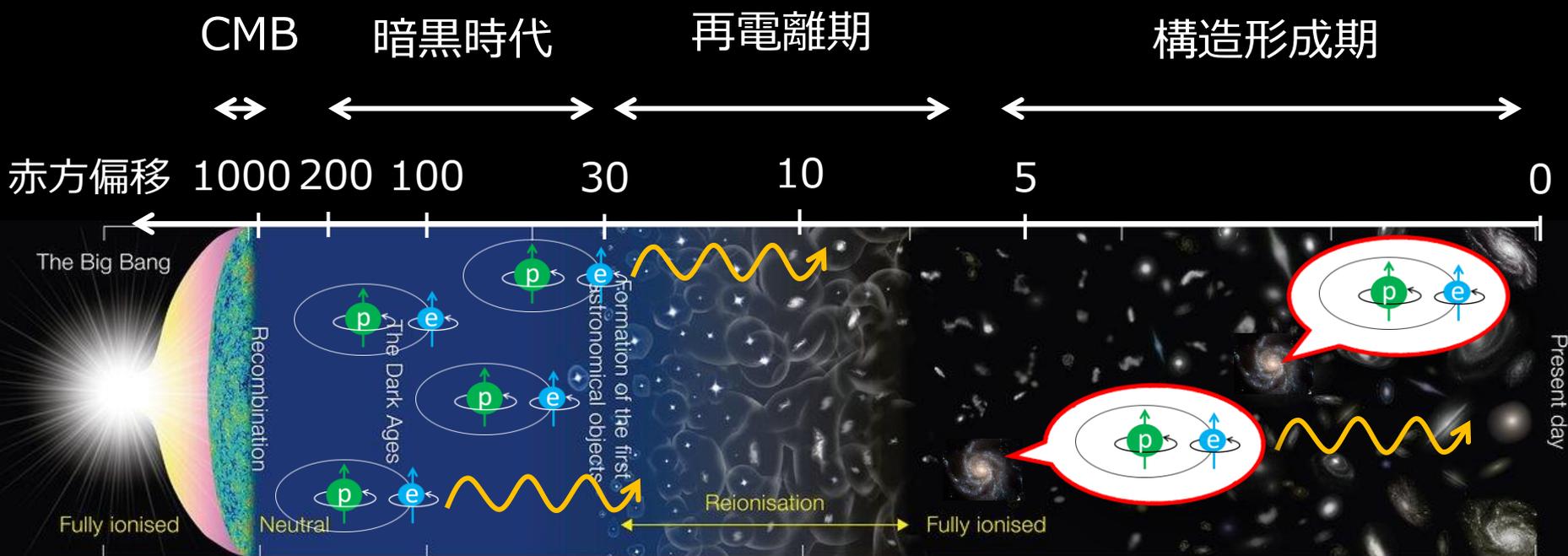
◆21-cm線:中性水素の超微細構造線



なぜ中性水素21cm線か？

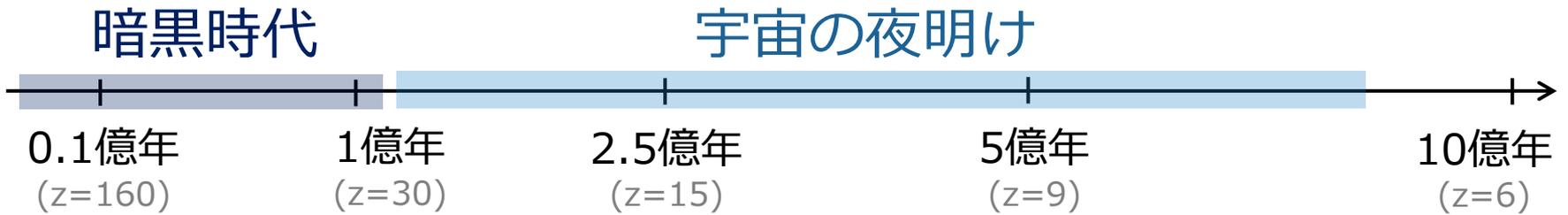
□ 中性水素は高赤方偏移宇宙($z > 30$)における最も普遍的に存在する物質

⇒ 赤方偏移した21cm線は物質場のトレーサー

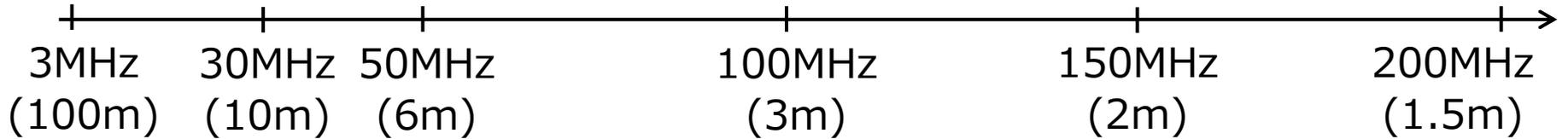


21cm線と電波望遠鏡の関係

宇宙年齢

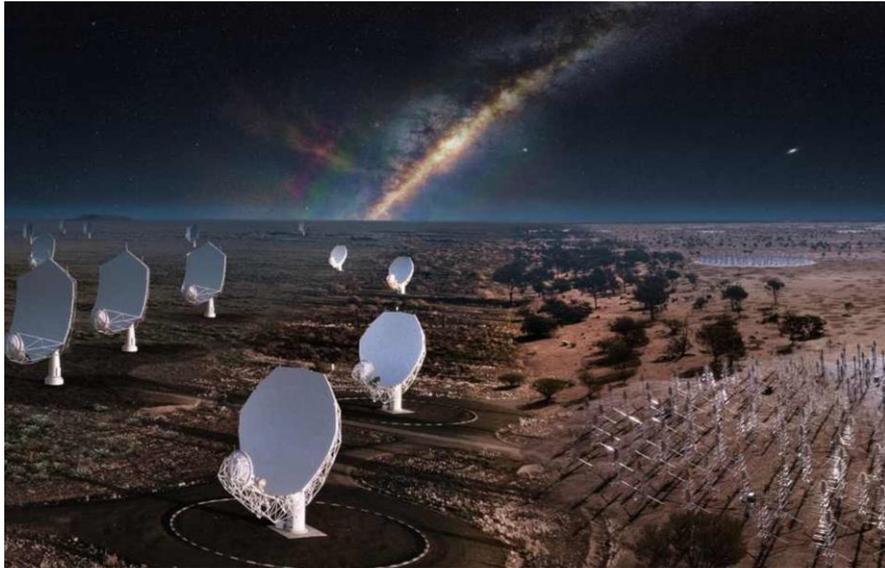


中性水素21cm線に対応する周波数 (波長)



SKA天文台

月面天文台



- 南ア・豪州 (2027-)
- 月面では不可能な精度・規模での観測
- 究極の地上電波望遠鏡
- 後期宇宙を精密に探査



- 月面 (2030年台前半-)
- 地球上では観測できない 低周波数帯(過去)を観測
- 究極の電波望遠鏡
- 宇宙開闢の情報を保存

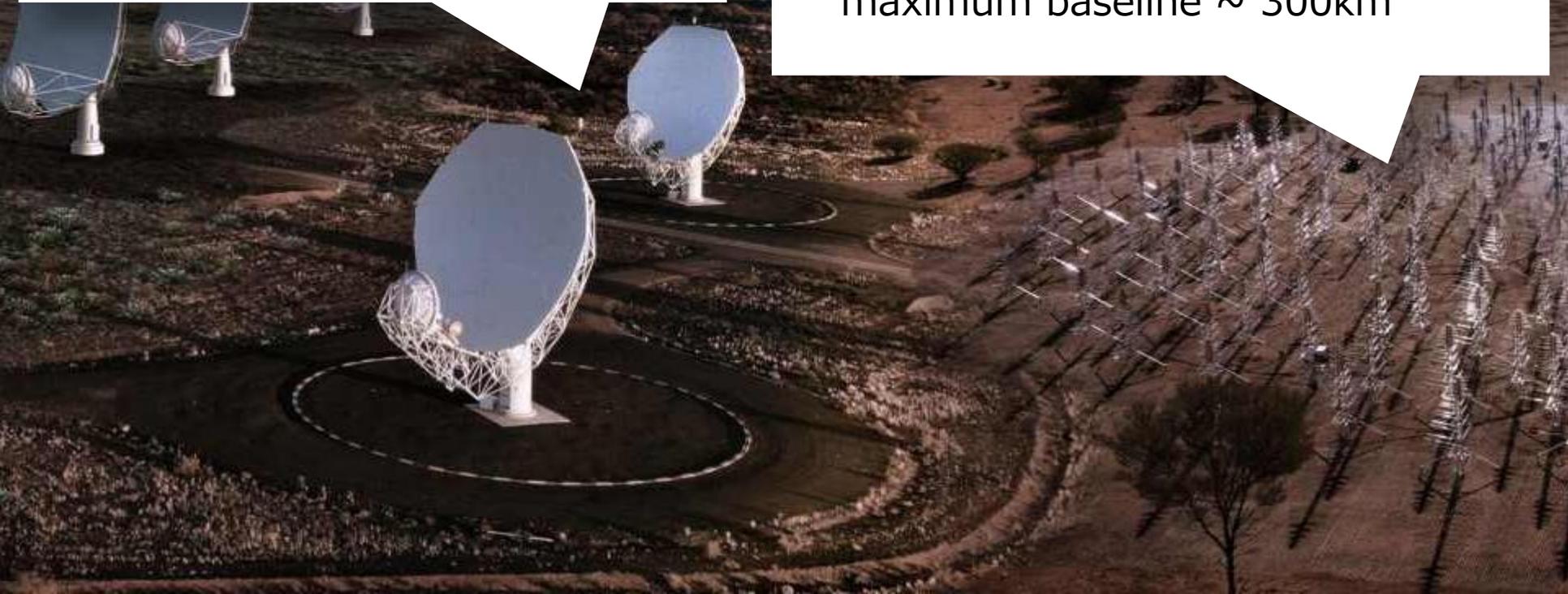
SKA天文台

SKA-MID [0.35-15GHz]

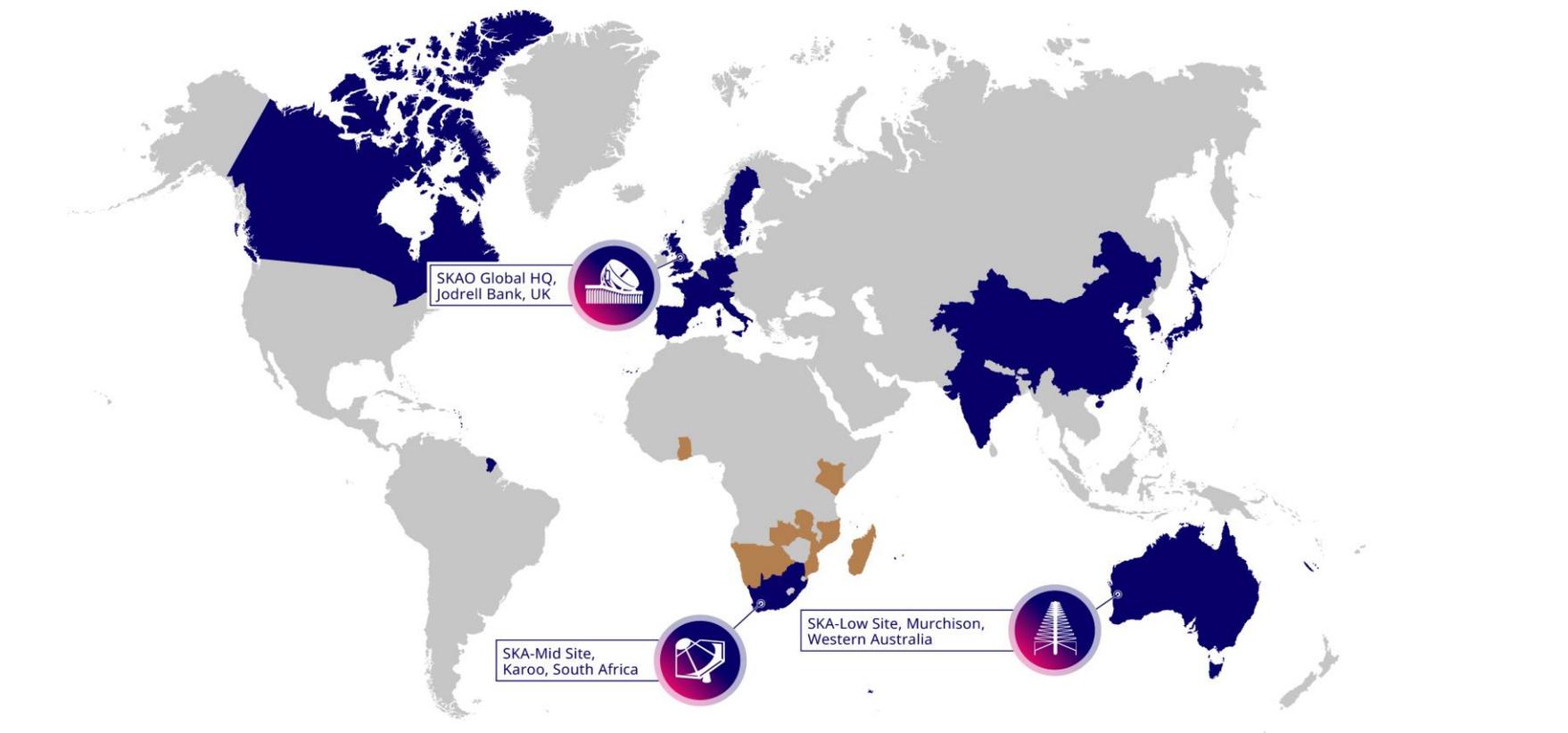
- ◆ Phase-1
197 antenna (15m + 13.5m)
maximum baseline ~ 150km
- ◆ Phase-2
2,000 antenna (15m)
maximum baseline ~ 3,000km

SKA-LOW [50-350MHz]

- ◆ Phase-1
131,072 antenna (512 stations)
maximum baseline ~ 74km
- ◆ Phase-2
1,250,000 antenna (4,880 stations)
maximum baseline ~ 300km



SKAメンバー国



SKAO Partnership - includes SKAO Member States* and SKAO Observers (as of June 2024)



African Partner Countries



SKA建設の状況

SKA1-LOW [豪]



- ◆ 2024年3月に13万台の最初の1台のアンテナ設置
- ◆ 現在3局まで設置済

SKA1-MID [南ア]



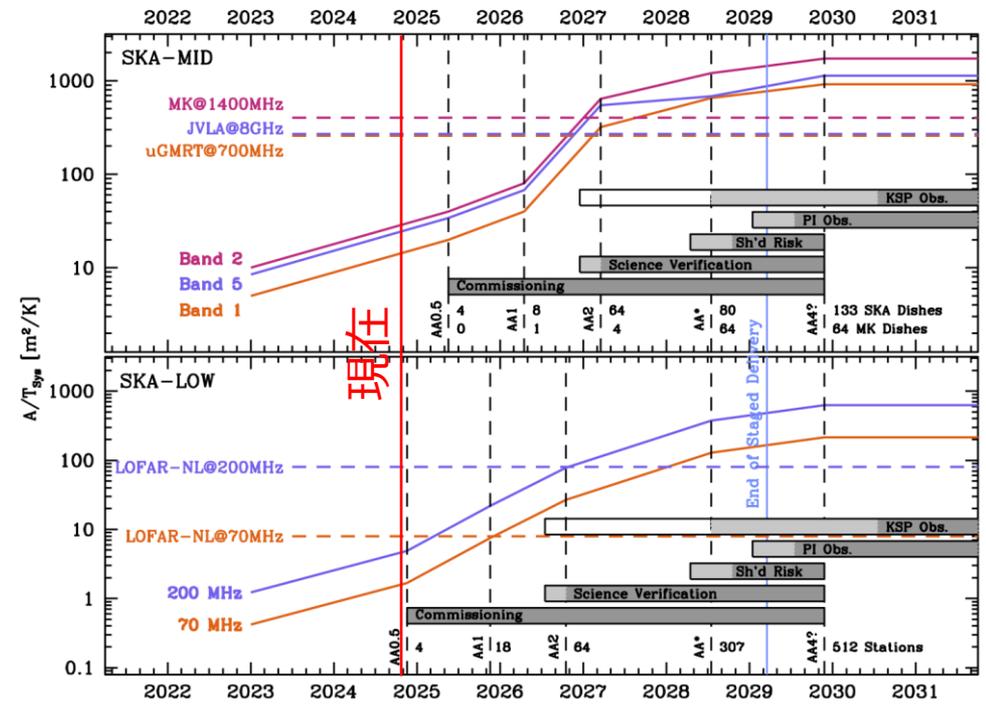
- ◆ 2024年7月に1台目の望遠鏡設置

Staged Delivery Plan (AA*)

Major dates



- ◆ 現在: AA0.5 [4局/4台] → 2026.6: AA1 [18局/8台] → 2027.5: AA2 [64局/64台] → 2028.3: AA* [307局/144台] → 定常運用化
- ◆ SKA1計画最終目標: AA4 [512局/197台]



月面天文台

月面・月周回軌道21cm線観測計画

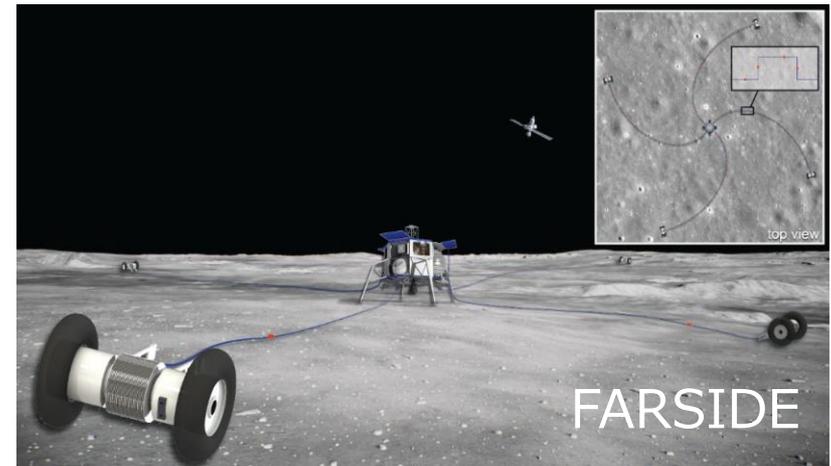
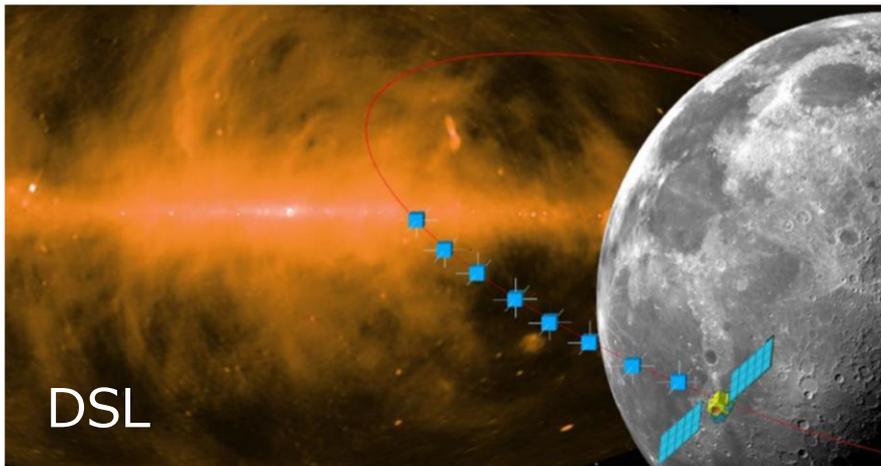
□ 月周回軌道

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

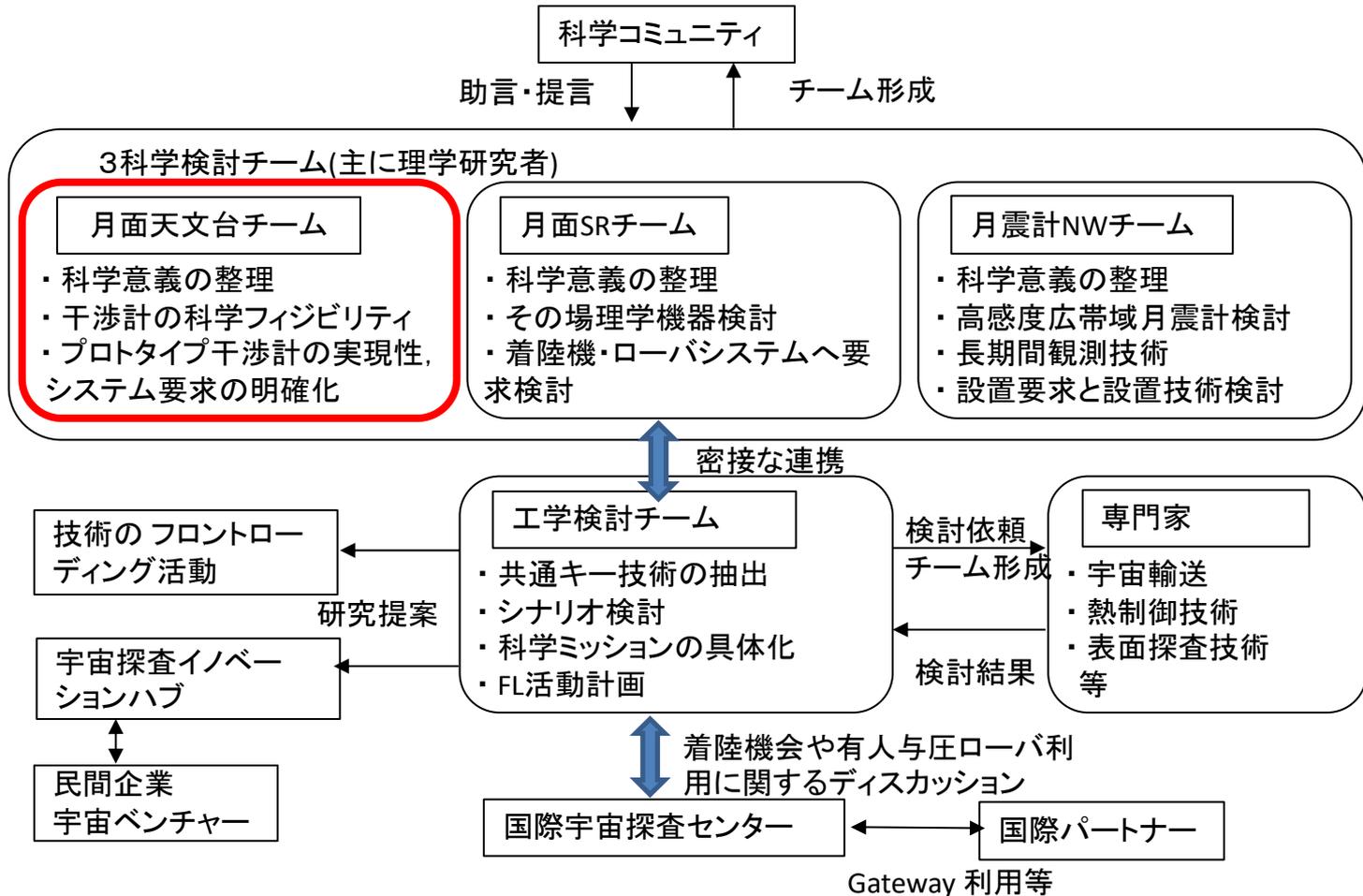
□ 月面 (月の裏側)

長期間にわたる安定な観測が可能！

- FAR SIDE (NASA)
- LCRT (NASA)
- **TSUKUYOMI (JAXA)**



JAXAプロジェクト「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」 (FS:2021-2023, FL:2024-)

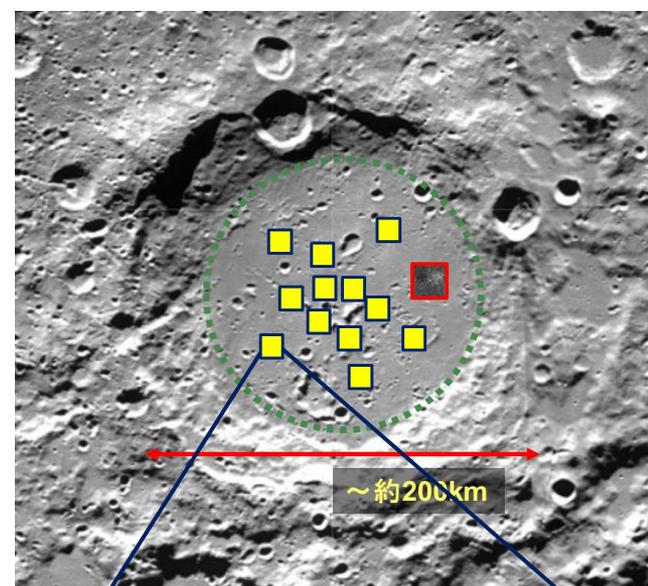


月面天文台に向けて

◆ 日本のチャレンジ :

月面~100km基線の電波干渉計

- ✓ 2021年-
月面天文台検討
- ✓ (2022年9月アルテミス1打ち上げ)
- ✓ 2020年代後半
月面での実証ミッション(LOPTA)
- ✓ 2030年台
3~10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

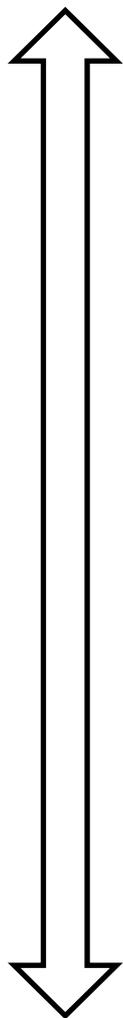


超低周波21cm
線($z \sim 80$)初検出

$z > 30$ の21cm線
ゆらぎ初検出

大規模構造観測
による
重力理論の検証

理論から
決まる



(Th1) 理論模型

我々の
知らない理論

(Th2) 有効理論 (準)線形作用ベースで修正

(Obs3) 現象論的
関数 運動方程式ベースで修正

(Obs2) 現象論的
パラメータ 観測量ベースで修正

(Obs1) 観測量

観測から
決まる

(Obs2) 現象論的パラメータ

: 観測量ベースで修正



◆ 宇宙のハッブル膨張率

$$H^2(a) = H_0^2 \left[\frac{\Omega_{m,0}}{a^3} + \Omega_{DE,0} \exp \left(-3 \int_1^a [1 + w_{DE}(a')] d \ln a' \right) \right]$$

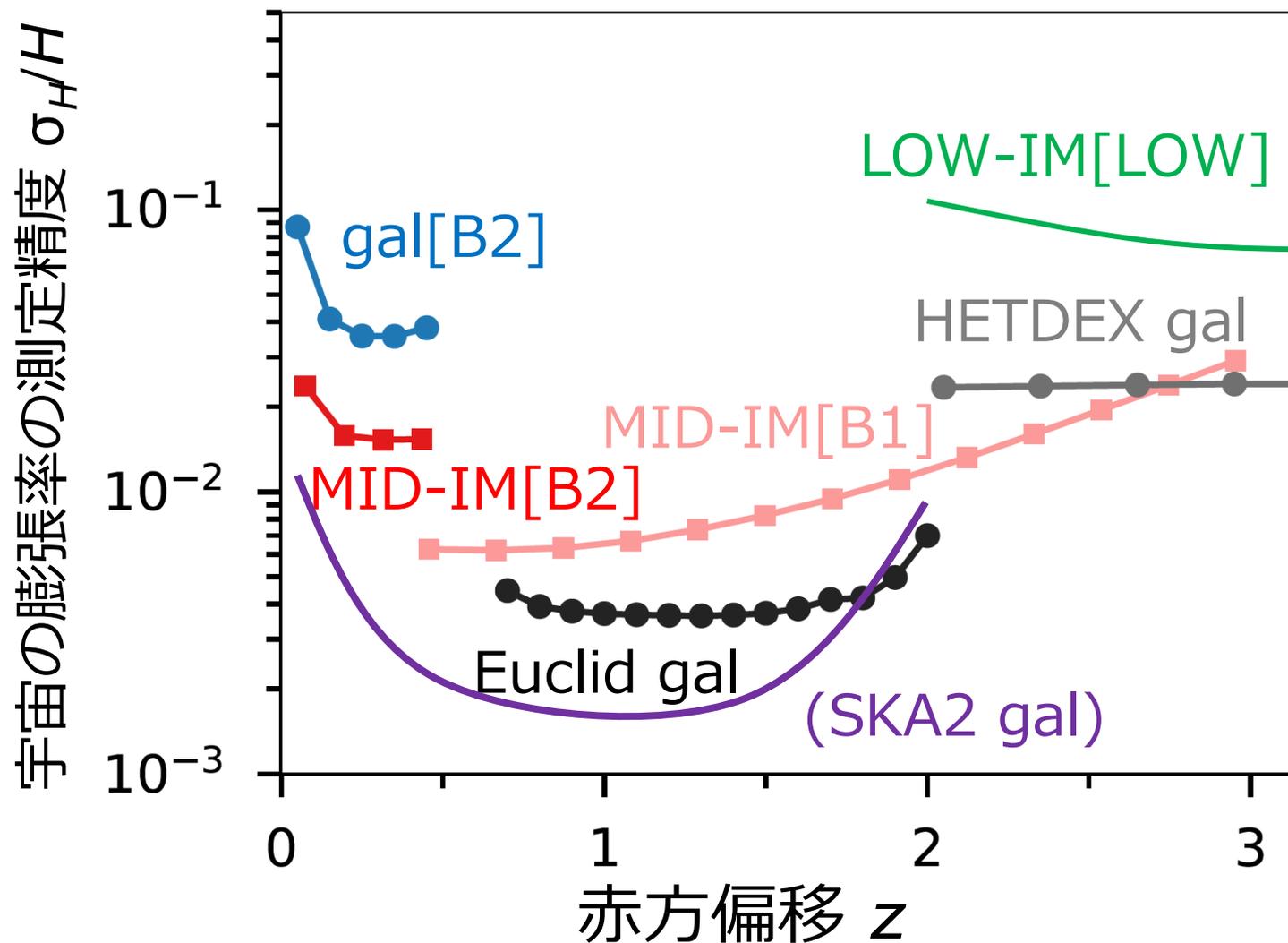
暗黒エネルギーの状態方程式

◆ 密度揺らぎ δ の成長率

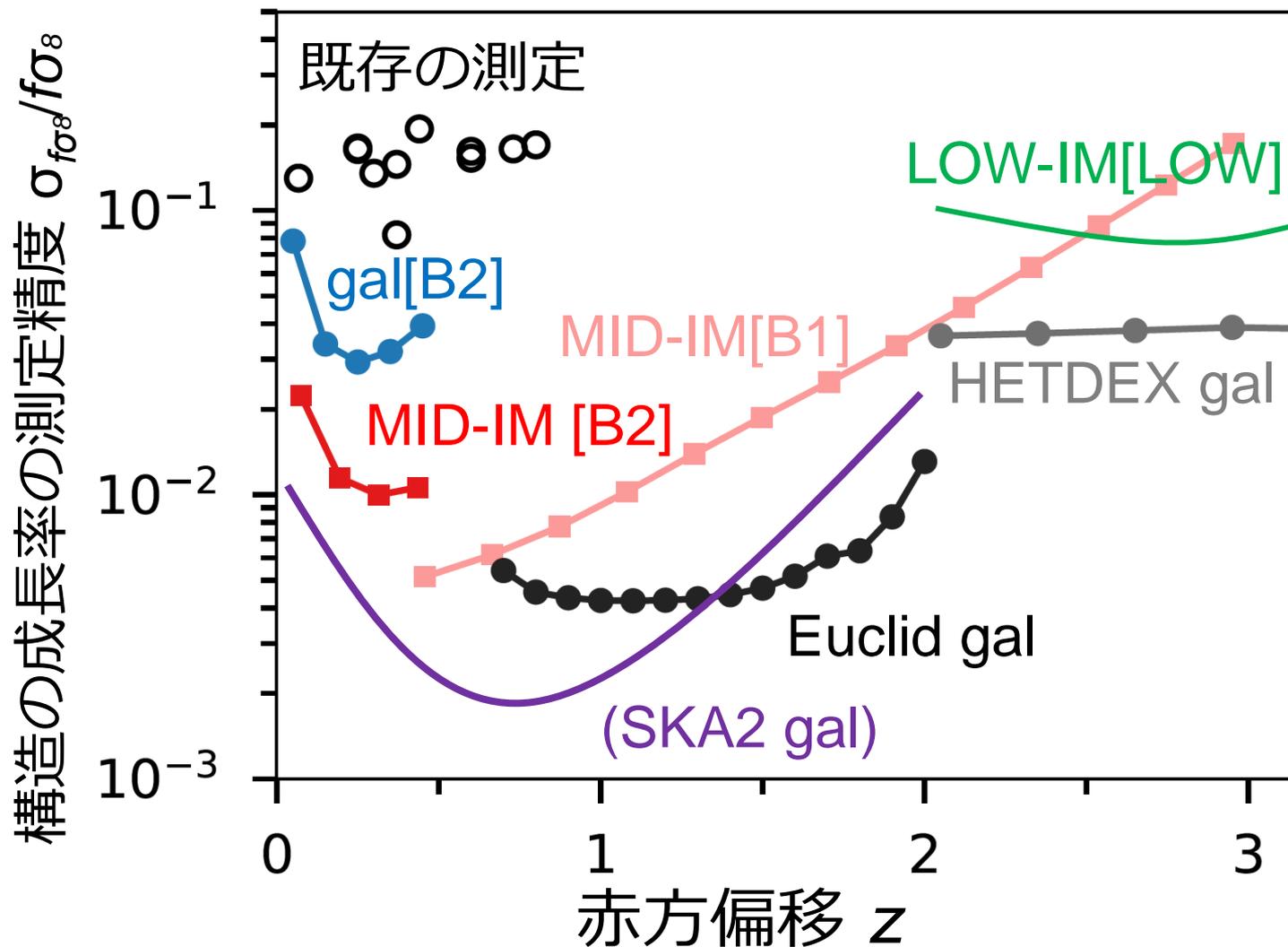
$$\delta(a, \mathbf{k}) = \exp \left(\int_0^a f(a') d \ln a' \right) \delta_*(\mathbf{k})$$

線形成長率

宇宙膨張率の測定

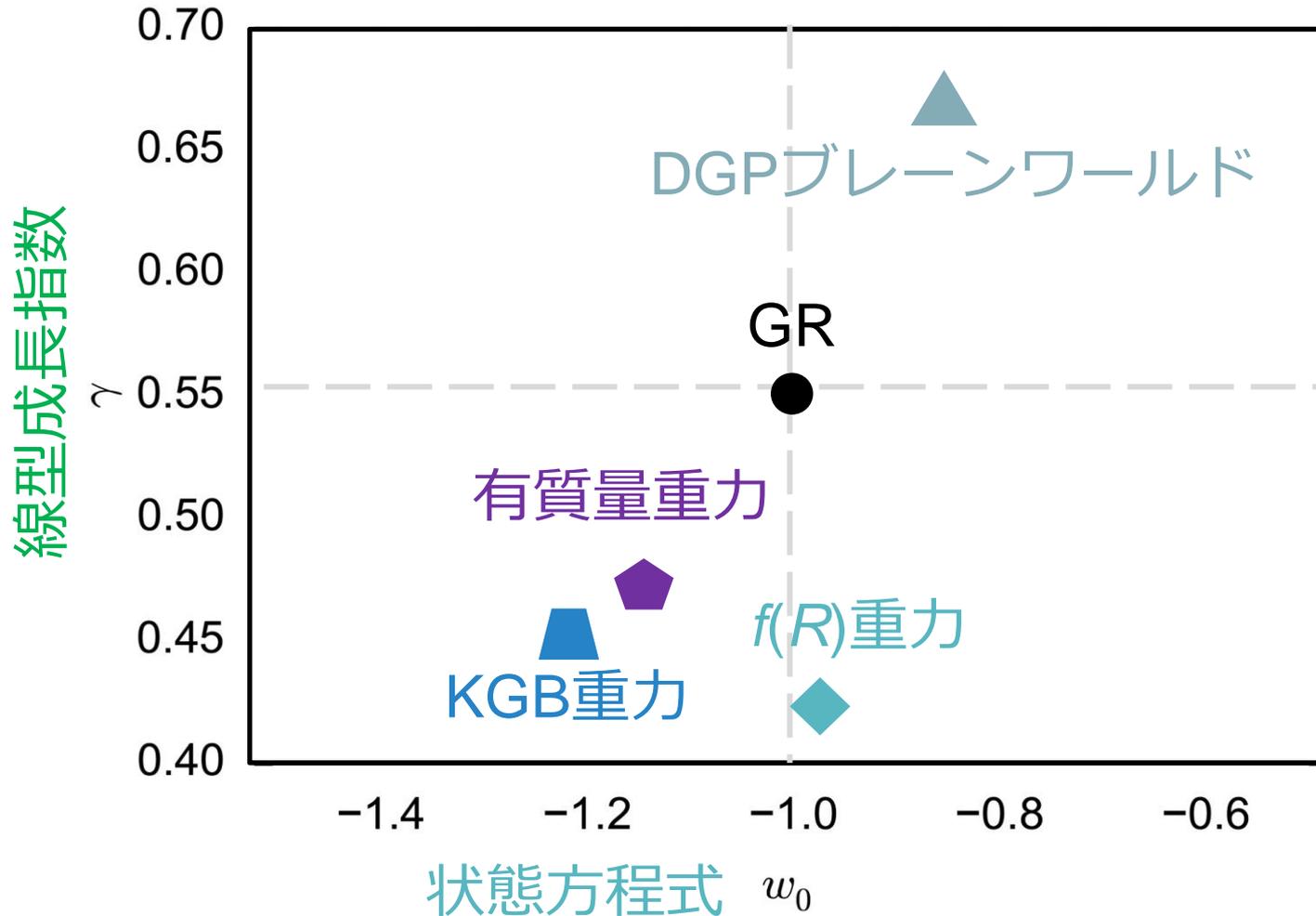


大規模構造の成長率測定



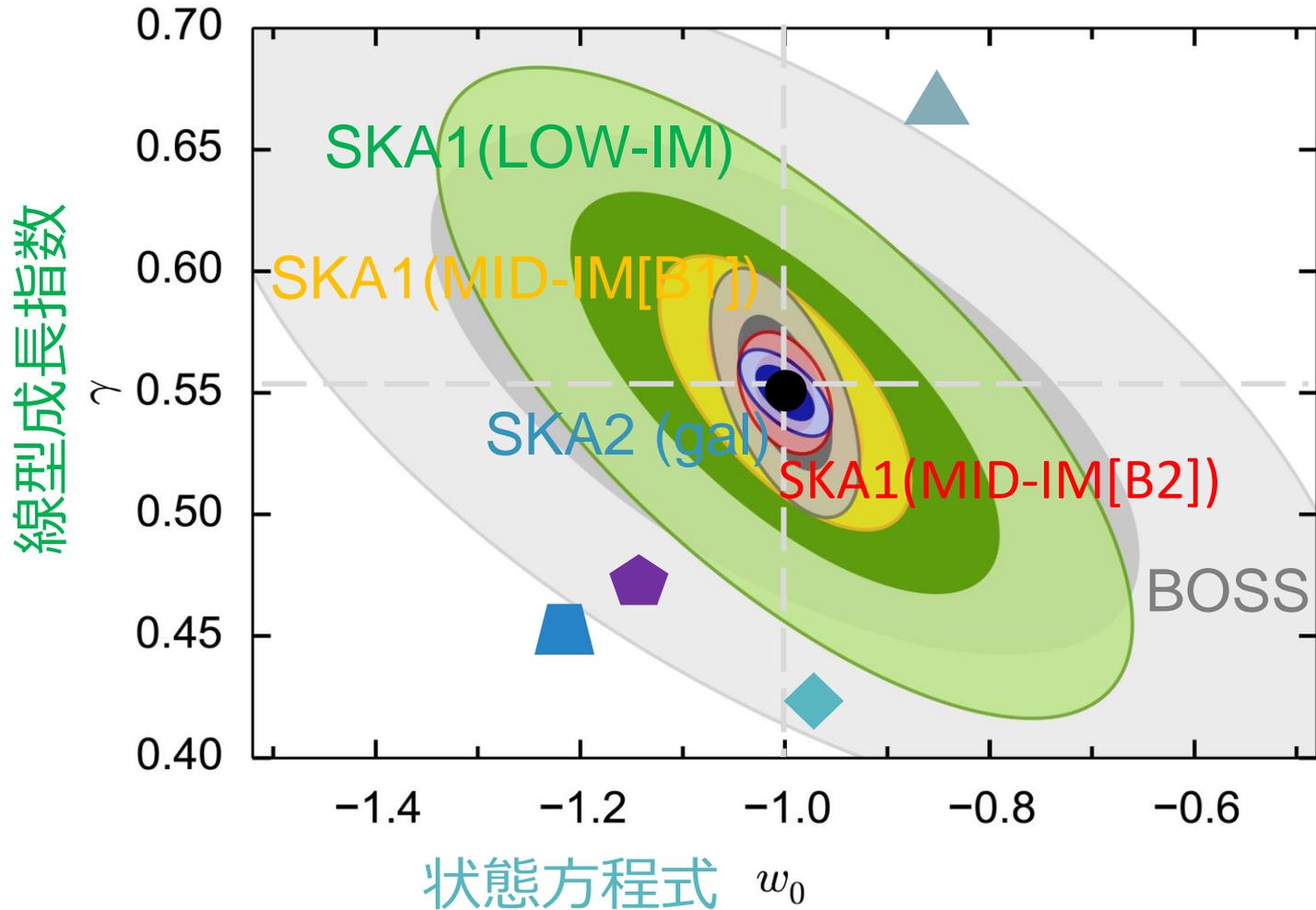
線型成長率

$$P_{\text{gg}}(\mathbf{k}, z) = \left(b(z) + \Omega_m^\gamma(z) \hat{k}_\parallel^2 \right)^2 P_m(k, z)$$



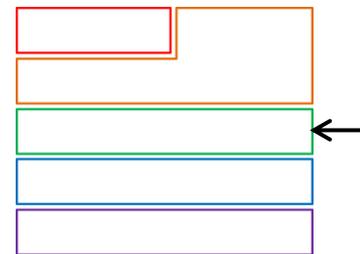
線型成長率

$$P_{\text{gg}}(\mathbf{k}, z) = \left(b(z) + \Omega_m^\gamma(z) \hat{k}_\parallel^2 \right)^2 P_m(k, z)$$



(Obs3) 現象論的関数

:運動方程式ベースで修正



◆ 密度揺らぎの重力理論への依存性： μ

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} + \frac{1}{a^2} \nabla^2 \Phi = 0$$

重力ポテンシャル(計量の00成分)

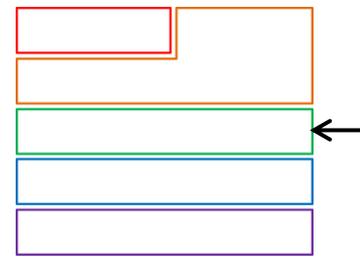
重力理論に依存

$$\text{ポアソン方程式 } \nabla^2 \Phi = 4\pi G a^2 \rho \delta$$

現象論的関数 $\mu(a, k)$

(Obs3) 現象論的関数

: 運動方程式ベースで修正



◆ 重力レンズ効果の重力理論への依存性 : Σ

$$\nabla^2(\Phi + \Psi) = 8\pi G a^2 \rho \delta$$

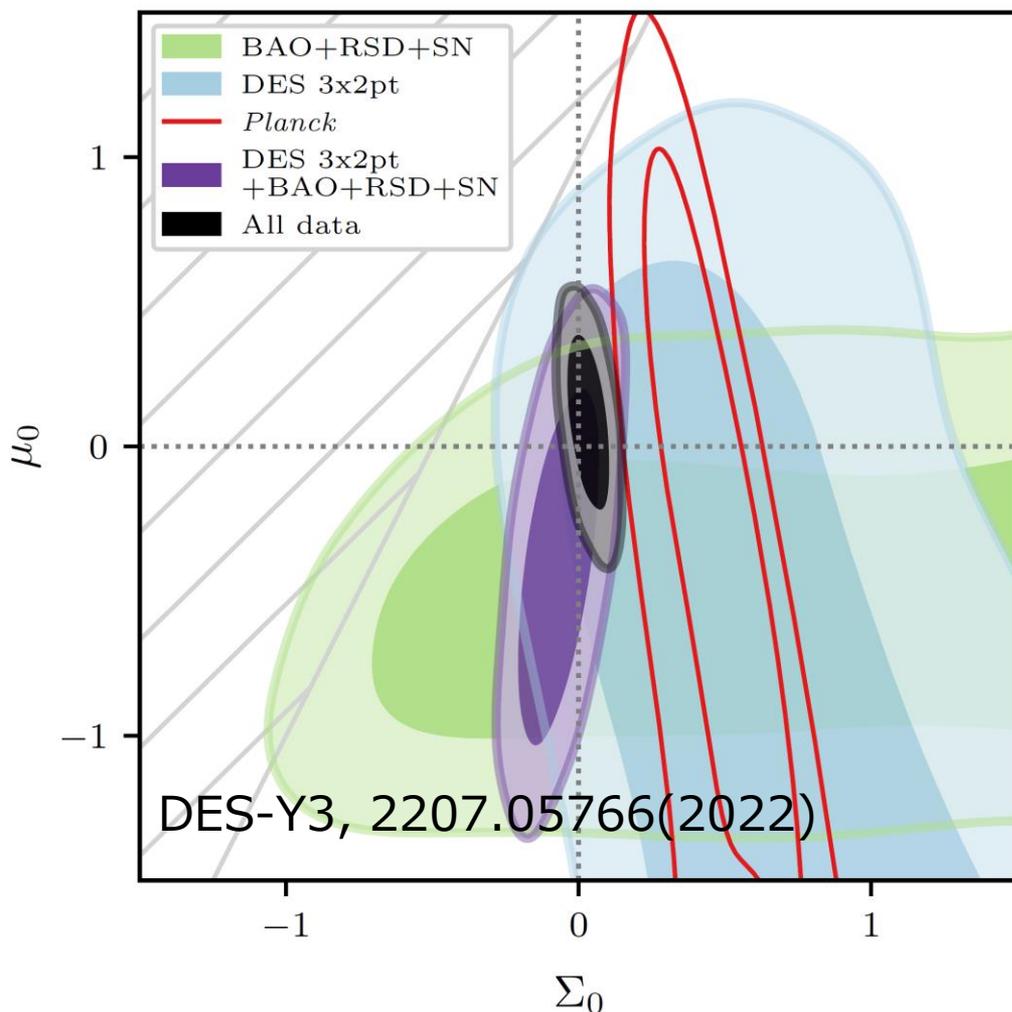
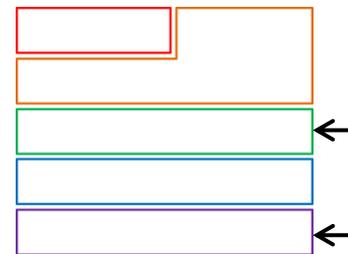
重力ポテンシャル(計量のij成分)

現象論的関数 $\Sigma(a, k)$

- ✓ 運動方程式を現象論的関数 μ と Σ で修正
- ✓ 時間依存性・波数依存性は手で仮定

(Obs3) 現象論的関数

: 運動方程式ベースで修正



◆ 時間/波数依存性の仮定が必要

$$\mu(a) = 1 + \mu_0 \frac{\Omega_{DE}(a)}{\Omega_{DE,0}}$$

$$\Sigma(a) = 1 + \Sigma_0 \frac{\Omega_{DE}(a)}{\Omega_{DE,0}}$$

◆ 観測データとの関連は**見通しが良い**

◆ 重力理論との直接の関係は**見えにくい**

観測と理論の 協働に向けて

理論と観測の協働に向けて 何をすべきか？

◆ レビュー論文の執筆 (2022/12)

- ✓ 日本人の重力コミュニティが最も制限すべきだとする理論模型：**Horndeski理論**



Horndeski理論を実際に観測データから制限する準備

- 理論側：観測量への対応(辞書)が出来ていないものは？
- 観測側：観測データから制限するルートはあるか？

Horndeski理論の制限に向けて 何をすべきか？

- ◆ CMB:
 - Horndeski(どころかDHOST)が解けるBoltzmann solver → ある！ cmb2nd [平松さん]
- ◆ 大規模構造:
 - μ - Σ 入りのコード → ある！
 - μ, Σ をEFTパラメータで書けるか？ → 書ける！
 - **準静的近似が破れたところは不完全(?)**
- ◆ あと何が必要？
 - EFTパラメータの時間進化モデル
 - **より具体的な理論モデル**
 - **他には？**

まとめ

- ◆ レビュー論文も書いたので、そろそろ次のステップのことを考えないといけない
 - (方向性 1) Horndeski模型を具体的な模型の制限を目指す
 - 他の方向性は？