

月面電波干渉計TSUKUYOMIに向けた超低周波電波受信システムの技術的検討

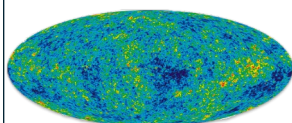
大阪公立大学大学院 理学研究科 物理学専攻 博士後期課程3年 松本健

月面天文台構想:TSUKUYOMI

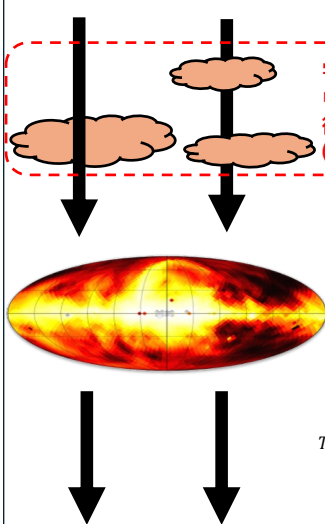
日本のアルテミス計画への参画を受け、JAXA 宇宙科学研究所を中心に、(1)月面での天体観測(2)サンプルの採取(3)月震計の三つの科学目標のフィジビリティ検討を推進している。月面天文台検討グループTSUKUYOMIでは、月面上でこそ価値のある電波観測「暗黒時代相当のグローバルシグナルの検出」に向けた概念検討を進めている。本ポスターでは、我々が掲げる科学目標と超低周波電波受信システムの技術検討について議論する。

月面天文台が受信する電波成分

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)



観測対象
宇宙マイクロ波背景放射に対する中性水素21cm線のスピンの温度の差



宇宙空間に漂う中性水素原子ガスの微細構造線(波長:21cm)

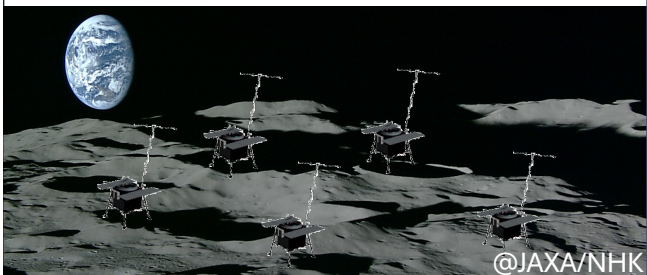
赤方偏移(宇宙膨張により遠ざかっている)

主要な雑音源: 前景放射
周波数が低いほど、温度が極めて高くなる

- ✓ 周波数に対して、冪乗則で変化
- ✓ 1-50MHz帯では、 $10^4 \sim 10^7 K$

$$T_{\text{sky}}(\nu) = \begin{cases} 16.3 \times 10^6 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{-2.53} & \nu > 2\text{MHz} \\ 16.3 \times 10^6 \left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{-3} & \nu \leq 2\text{MHz} \end{cases}$$

(S Jester et al. 2009)



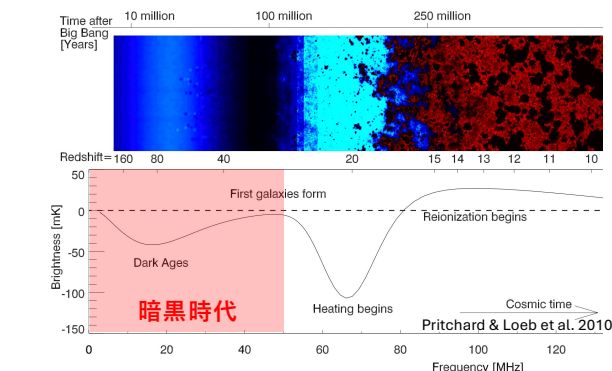
@JAXA/NHK

月面の裏側での電波観測の優位性

周波数帯域	3-30kHz 10-100km	30k-30MHz 10m-10km	30M-3GHz 0.1-10m	3-100GHz 0.3-10cm	100G-1THz 0.3-3mm	1-10THz 30-300um	10-100THz 3-30um	100T-1PHz 0.3-3um	1-3PHz 0.1-0.3um
名称	超長波	短/中/長波	メートル波	センチ波	ミリ波 サブミリ波	遠赤外線	中間赤外線	近赤外線 可視光	紫外線
月	○	○	○	○	○	○	○	○	○
地球の電離層	×	×	○	○	○	○	○	○	○
地球の電離層	×	×	○	○	○	○	○	○	○
地球上マウナケアアタカマなど	×	×	○	○	○	○	○	○	○

10MHz以下の非常に低い周波数帯の観測は、地球の電離層によって反射することで地上での観測が困難である。月面上では、長波電波の遮断がなく、長時間にわたる電波観測を可能にする。さらに、月面の裏側では我々が発する人工電波源(RFI)の影響が極めて少ない環境(Ono et al. 2010)での観測を実行でき、メートル波電波天文学において、非常に適した場所である。

科学目標: 現代宇宙論の観測的証明



月面でしか観測できない周波数帯を含む1~50MHz帯のメートル波には、星すら存在しない生まれたての宇宙の痕跡が残っている。現代宇宙論によると、宇宙が晴れ上がり最初の星ができるまでに中性水素ガスだけが満ちた、星のない時代『暗黒時代』が存在する。極初期の宇宙の進化過程や初代星の形成を理解する上で重要な期間であり、唯一の手がかりといえるのが、初期宇宙を満たす中性水素原子の21cm線である。理論モデルが予測する暗黒時代相当の赤方遷移($z=1100\sim 30$)の中性水素21cm線の輝度温度、CMBとの温度差を表す「グローバルシグナル」を観測することで、現代宇宙論の観測的検証に挑戦する。

観測システムへの要求

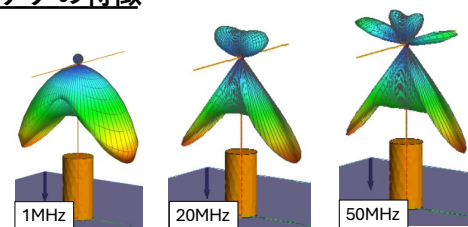
1. 周波数帯域: 1-50MHz
2. 前景放射と比較して、受信システムの雑音が十分低い
3. 帯域全体を通して、出力電力の差を小さくする(ADCへの制限)
4. モデル解析に向けた周波数特性の平坦化
5. 月面上への設置を考慮したアンテナ設計

5mのショートダイポールアンテナ+集中定数回路による電圧伝送システム

ショートダイポールアンテナの特徴

Forward Efficiency

周波数によってビームパターンが大きく変化する



周波数が高くなるとアンテナ効率が上昇する

観測感度(\propto 放射抵抗)

- ✓ 外来温度 T_{ext} により励起されるアンテナ電圧 V_A は、
- ✓ ショートダイポールアンテナの放射抵抗 $Re(Z_a)$ の理論値は、

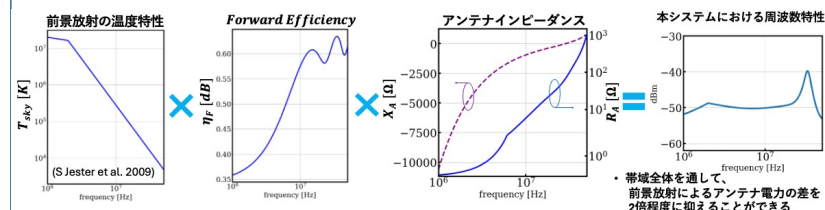
$$V_A = \sqrt{4k_b T_{\text{ext}} Re(Z_a) B}$$

(k_b : ボルツマン定数, B : バンド幅)

$$R_A \approx 20\pi^2 \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2$$

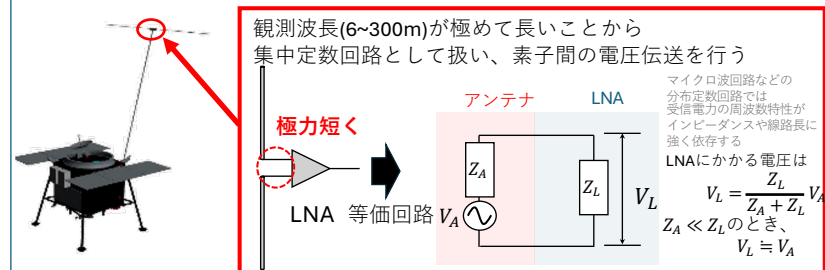
(L : アンテナ長, λ : 観測波長)

周波数が高くなると観測感度が良くなる



冪乗則で変化する前景放射の温度差の影響を抑制する

アンテナ-プリアンプ間の電圧伝送システム



Summary & Future Work

- ✓ 月面天文台のアンテナ受信機モデルとして、5mのショートダイポールアンテナの特徴と伝送線路を短くすることによる電圧増幅システムを用いることで、前景放射による観測システムの周波数特性を抑制する。

- 観測感度を達成するための受信機への性能要求を提案する
- 周辺環境やアンテナユニット等の構造体などがビームパターンや放射抵抗に与える影響を念頭にシミュレートを行う
- ビームパターンやインピーダンスの測定手法を確立する