

スペースからの 低周波観測の検討

岩田 隆浩、村田 泰宏

(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)



はじめに

天文学の発展は、新たな観測周波数領域の開拓や、空間分解能と感度の向上など、新たな観測装置の登場によって引き起こされてきたことから、これまで為し得なかった観測方法の実現が常に求められている。**スペースからの電波天文学**は、大気による遮蔽や減衰が無い観測、地球サイズを超える長基線のVLBIによる高分解能観測を可能にする。「はるか」に続くスペースVLBI計画であった**ASTRO-G**は計画中止となったが、2020年代後半を見据えて技術的課題を克服して、スペースからの電波天文学に再チャレンジする事は重要である。その際、ASTRO-Gの主たる科学目標の対象であった、活動銀河やブラックホール研究においては、サブミリ波を含む高周波化とのトレードオフ、スペース基線必要性の再検討、中国が2020年打ち上げを目指しているスペースVLBI計画(Hong *et al.*, 2013)についても考慮する必要がある。

その一方で、いわゆる「電波の窓」より波長の長い低周波電波領域($\nu < 10\text{MHz}$)は、電離層を通過できないために地球上からの観測が不可能であることから、観測天文学に残された最後の未開拓分野の一つとなっている。この領域の電磁波は、**太陽及び木星**をはじめとする太陽系内惑星の電磁現象から、**超新星残骸、銀河間物質**、さらにはhigh-zの分子線として見られる**宇宙の初期構造**まで、宇宙の様々なスケールでの現象を提示しているものと考えられている。低周波電波観測の困難さは、地上では電離層による遮蔽のため観測できないこと、地球周回軌道においても地球起源の強い自然・人工電波雑音の影響を受けることに加えて、波長が長いために高い空間分解能を得るには大型の観測装置が必要であることにもある。例えば口径30mの電波望遠鏡で10GHzを受信する場合と同じ空間分解能を、10MHzで得るためには、基線長30kmの干渉計を必要とする。このため、宇宙空間で実現するには、常時相対位置決定を行う**編隊飛行**が有力な方法である。一方で、**月面**では安定な地盤が得られることに加え、月の裏側では地球からの遮蔽を確保できることから、特に低周波では優位な方法と考えられてきたが、環境・システム要求・運搬効率などを総合的に判断する必要がある。



スペース電波天文学の展望

- BH (black hole)の観測、ジェットなど天文学で解決すべき問題を解決する有効なアプローチは解像度を上げることである。
- 解像度を上げるためには波長/基線(口径)をできるだけ小さくする。
- 一方、波長が1桁変わると見えるものは変わる。
- 基線を宇宙に伸ばすというスペースVLBIは、必要な観測手法である！

SVLBIの方向性	freq. (GHz)	科学動機	考慮ポイント	技術的レベル	検討事項例	備考
High	86-350	BHシルエット 降着円盤	BHシルエットを確実に見るには？	ソリッドアンテナ サブミリ波 (SMILES) 高周波の困難	地上サブミリVLBIでどこまでできる？ 基線をスペースに伸ばす意義は？ 地上VSスペース	Space-Space サブミリ干渉計、 スペース ALMA
Mid	8-43 (22)	ジェット 降着円盤 水メーザ	ASTRO-G成果を利用し ミッション再定義	22 GHzまでは見 通し有り。43 GHzをGoalとする。	2020年代で ASTRO-Gのサイエ ンスは有効か？	中国のスペースVLBI
Low	< 3	パルサー 水素吸収線 ジェット 超新星残骸	SKAとの共同観測で何が できるか？	ETS-8、VLDR (パラボラ) もしくは別の構造物	低周波高分解能サイエンスを新規検討	Astro-Gと異なるサイエンス

将来のスペースVLBI計画に影響を与えるプロジェクト

project	freq. (GHz)	Baseline (km)	λ / D (arcsec)	when?	sen sitiv ity	ima ging	comments
ASTRO-G	8, 22, 43	35,000	4×10^{-5}	Cancelled	Low	○	
Chinese Space VLBI	6-8, 22, 43	72,000	1.4×10^{-5}	2020 launch?	Low	○	Concept study in 2012-2014
Ground sub-mm VLBI	230, 350	9,000	2×10^{-5}	On going 2020? + ALMA phase-up	Low	△- ×	Resolution is save as ASTRO-G Low sensitivity Phase-up ALMA
ALMA	31.5 - 950	18.5	4×10^{-3}	2012 initial scence	High	◎	Lower resolution for AGN in VLBI
Radioastron	0.4, 1.6, 5, 22	350,000	8×10^{-6}	July 2011	Low	△- ×	How high Tb is?
SKA	0.07 - 10	3,000	2×10^{-3}	2019 initial 2024 Full	High	◎	Low frequency SVLBI

低周波の電波天文学

地球近傍で観測される、最も強力な低周波電波の一つは**木星からのデカメートル波(DAM)**であるが、にも関わらずDAMの電波放射機構は未知の部分が多く、電波放射機構を解明することによって、宇宙空間プラズマ物理学の重要な本質に迫ることが可能になると考えられている。木星電波の期限として、例えばサーチライト状のビーム構造(Imai *et al.*, 2008)が提唱されているが、その検証には地球サイズを超える長基線による分解能が必要であり、かつ木星探査機によるin-situ観測では得られない、木星全体の同時モニタが必要である。このような方法で木星電波の理解が進展すれば、将来より高感度な観測により、**太陽系外木星型惑星電波**の観測によって、恒星系の普遍的な理解につながることを期待される。

太陽系外の強力な電波源は、**我々の銀河系(Our Galaxy)**である。これまでのUHF帯での全天サーベイはIRASの赤外線サーベイ等と比べて、銀河面より広がった構造が確認されており、より低周波の観測は銀河系を低温・低密度領域まで理解する上で重要である。特に、銀河中心付近の観測では、従来の高い周波数では観測の網に掛からなかった多くの**超新星残骸(SNR)**が検出されており(La Rosa, *et al.*, 2000)、SNRの存在確率が従来の予測を大きく上回ることが明らかになった。このことは低周波電波の**無バイアスサーベイ**によって、より低エネルギーのSNRが検出され、銀河と星の進化に対する大きな制約を与えるものと期待される。

低周波で観測される電波には大きな赤方偏移を受けた電波源も含まれており、即ち宇宙初期の姿を表していると考えられる。ビッグバン直後の初期宇宙では、 $z \sim 1000$ の時に電子の再結合によって宇宙が晴れ上がり、その後 $z=20 \sim 10$ の時に最初の星の誕生、再電離によるHII領域の誕生、そして最初のクエーサの誕生が起きたと考えられる。物質の分布をよく表す1.4GHz中性水素線は、赤方偏移によって $z \sim 10$ の時140MHz帯、 $z \sim 14$ の時10MHz帯で観測される。従って高い z の水素線の観測から、宇宙初期の**大規模構造の生成過程**や**銀河・銀河団の起源**が明らかになることが期待される。

電波望遠鏡の historical streams

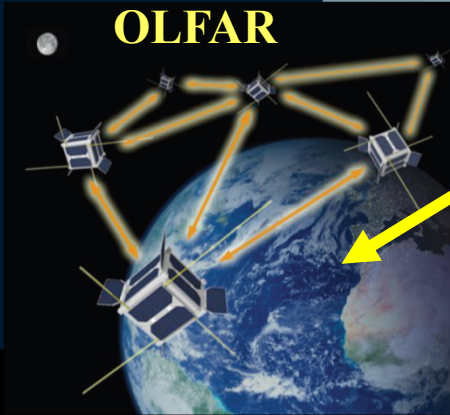
higher resolution
 $\delta\theta \sim \lambda/D$

higher frequency

Jansky's antenna (replica) $\Delta E = h \nu$



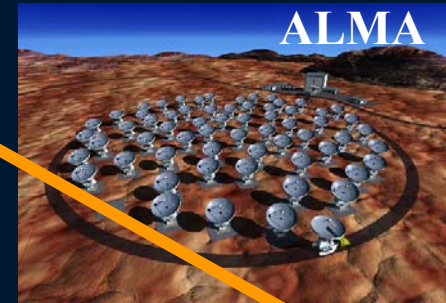
RRL(現NICT)鹿島 30mφ
(Japan's 1st radio telescope)



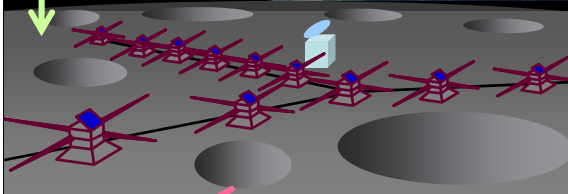
<http://www.lofar.org/>



ASTRO-G



ALMA



LLFAST-X

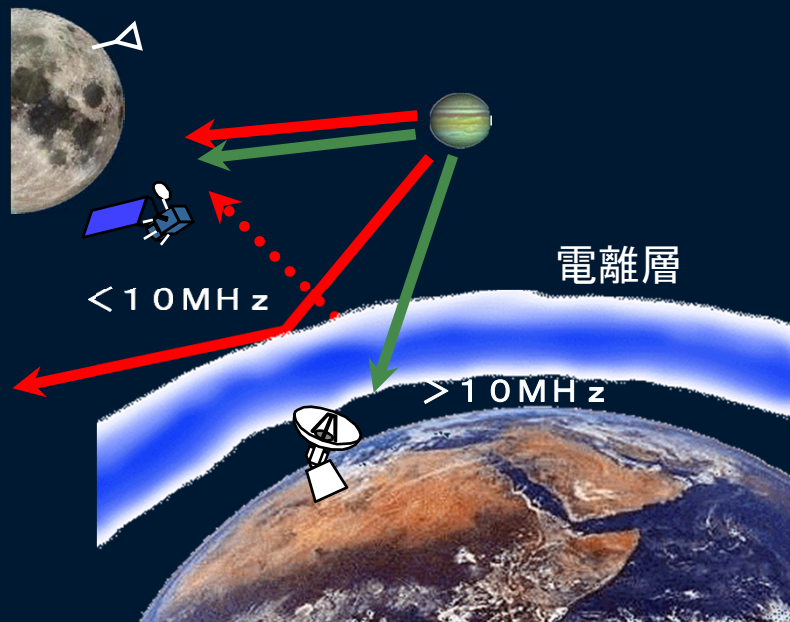
lower frequency

低周波電波の観測的制約



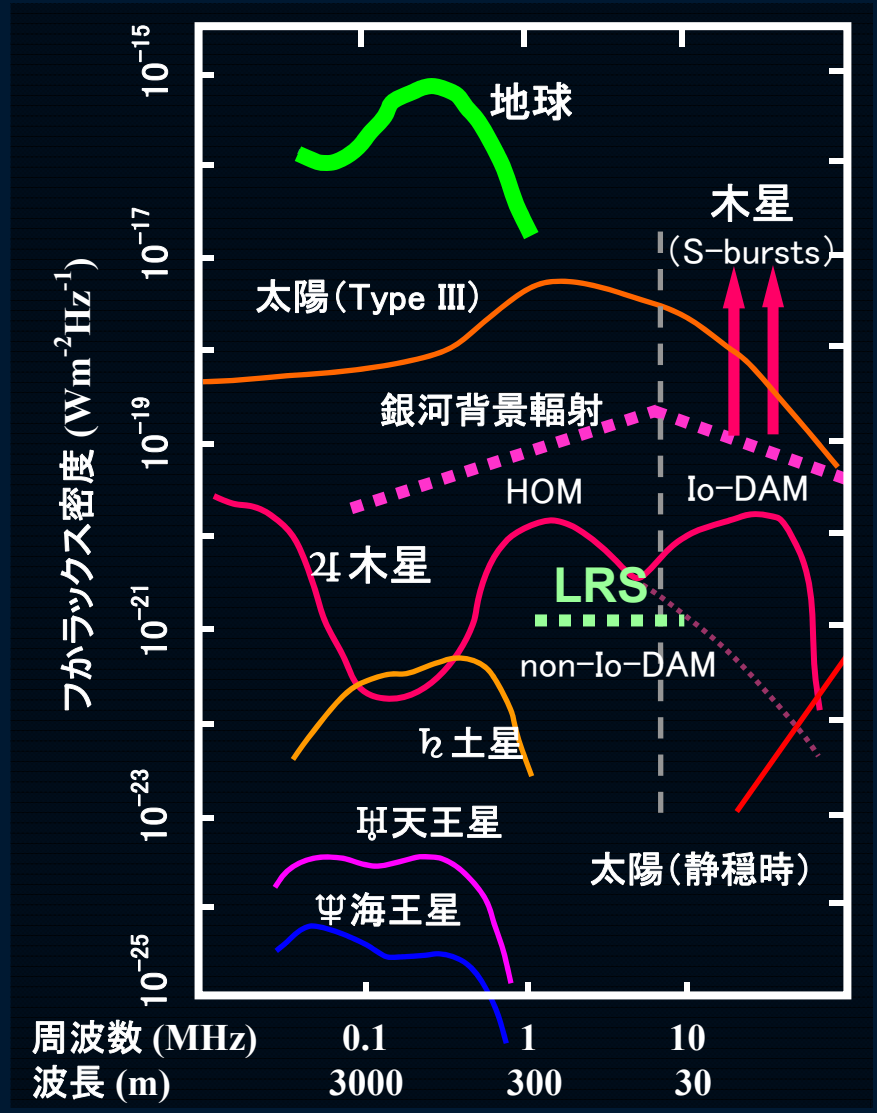
観測天文学：最後の未開拓地

低周波電波； $\nu < 10\text{MHz}$ ($\lambda > 30\text{m}$)



- ・電離層の遮蔽効果
 - 地上：大気を透過しない
 - 軌道上：地球が雑音源
- ・空間分解能 $\sim \lambda/D$ (D ; 口径・基線長)
 - 長い基線長を要する
 - ex. 100GHz, $\phi 3\text{m}$ 単一鏡
 - = 10MHz, 30km 干渉計

低周波電波のスペクトル



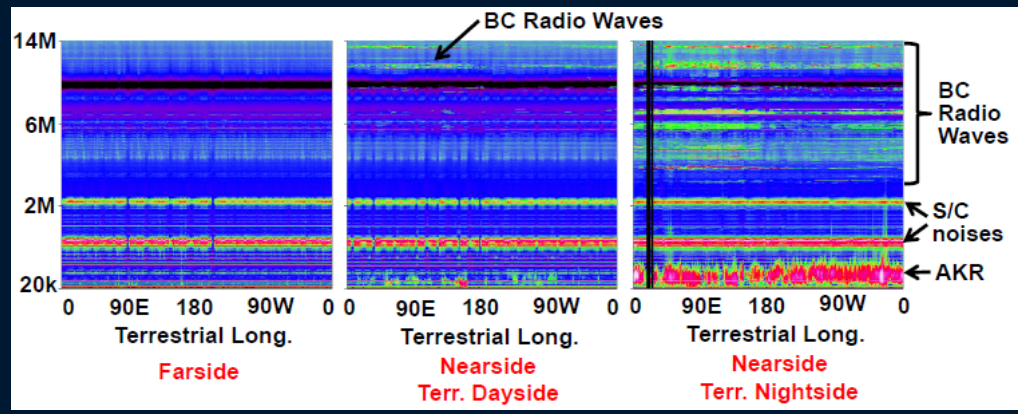
(after Zarka et al, 1997)

← 月で観測される低周波電波

- ・ 月の表側では地球からの放射が卓越

「かぐや」月レーダサウンダ (LRS) データに見る地球からの放射の影響 (Kumamoto et al. 2008)

↓ 裏 (掩蔽) ↓ 表・昼 ↓ 表・夜



低周波電波の太陽系科学 – 木星型惑星からの放射

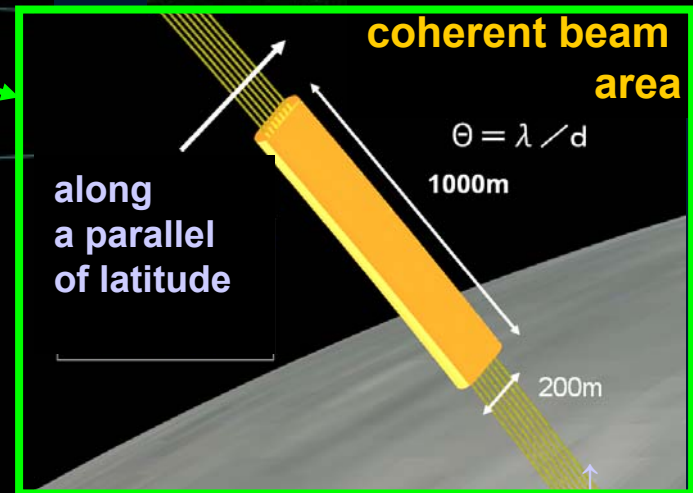
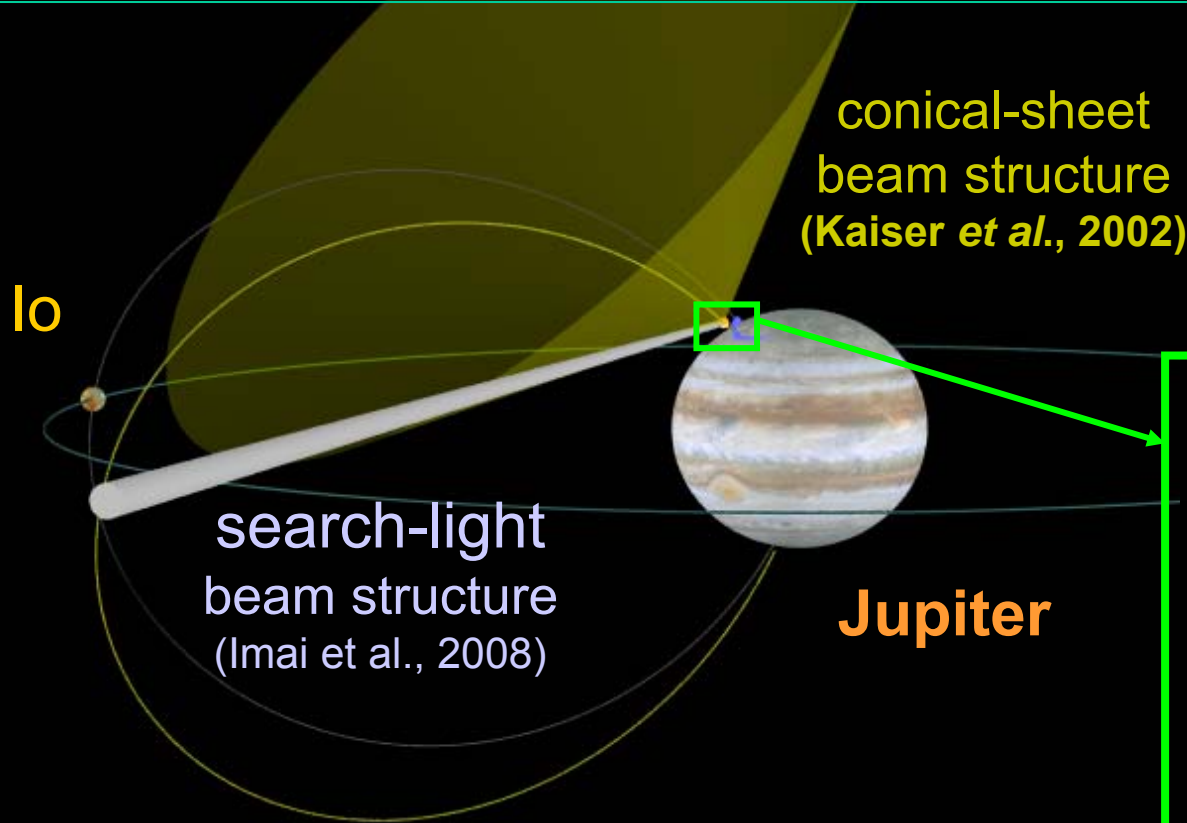
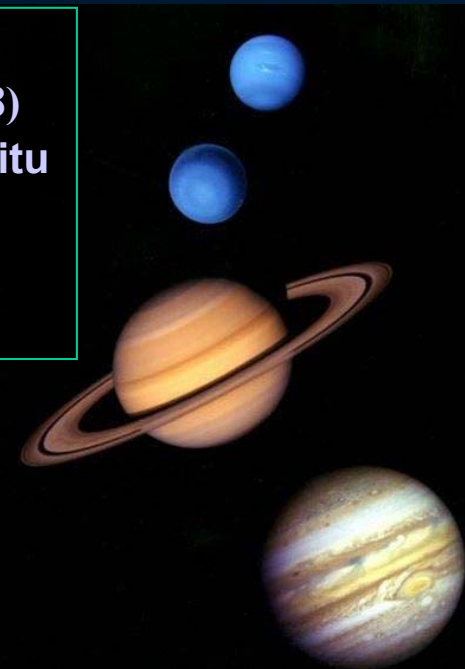
木星-Io系デカメートル波 (Io-DAM) の放射機構は未解明。

→ 地上観測結果からサーチライトビームモデルが提唱 (ex. Imai et al., 2008)

→ 検証には、電波源サイズ (1km以下) を分解する高分解能と、探査機 in-situ (その場) 観測で不可能な南北半球同時観測が必要

→ **スペース基線 VLBI** により達成可能

⇒ 感度向上により、**太陽系外木星型惑星** の普遍的理解につなげる

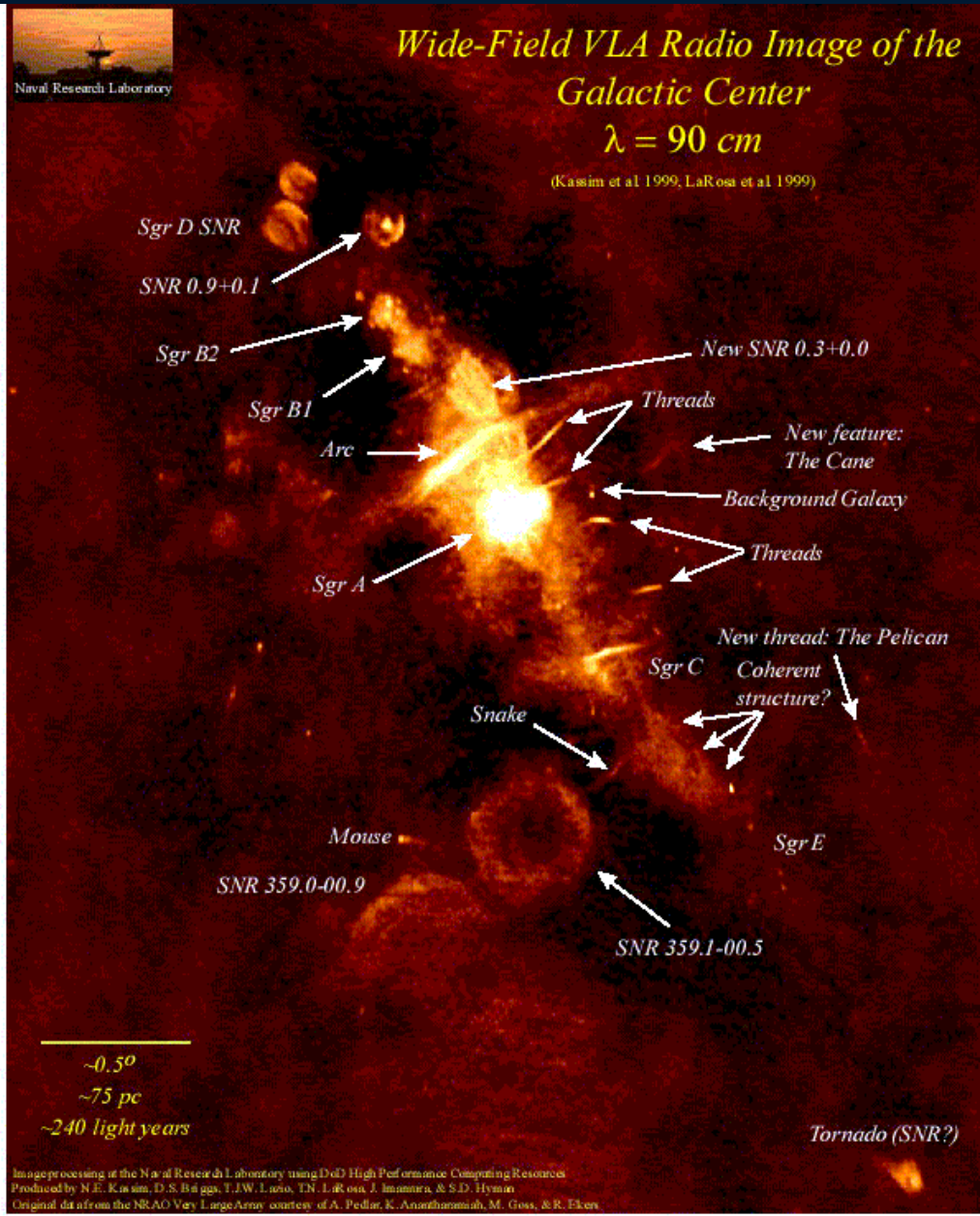


radio sources of km-size

低周波電波の天文学 – SNR: 超新星残骸



銀河中心付近の
 330MHz帯観測→
 (La Rosa et al. 2000)



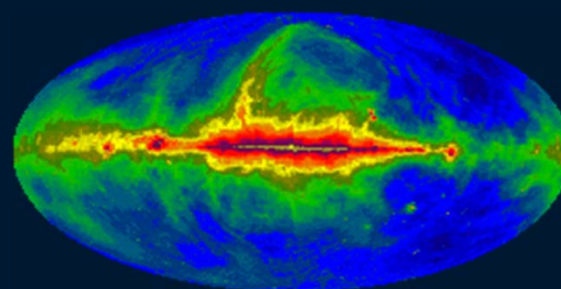
低周波電波の天文学 – 低温物質の分布 –

←高周波、高エネルギー→



IRAS Survey (Beichman *et al.* 1988)

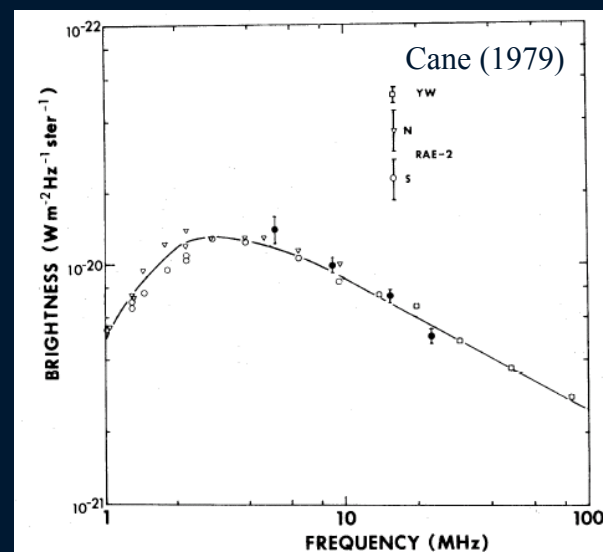
長波長→



Bonn 408 MHz Survey

- 低温・低密度
- free-free吸収
- シンクロトン自己吸収

- 銀河系から広がった低温・低密度のハロー
- 恒星系・星間空間・銀河間空間の境界
- 再電離後の熱輻射とSNRによるfree-free吸収
→**ダークマター**の手掛かり?



銀河背景輻射: 低温・低密度プラズマによるFree-free absorption?

↓
Te=6000 [K], Ne = 0.1 [cm⁻³] ?

低周波電波の天文学 – 宇宙初期の観測-

$z \sim 1000$

再結合・晴れ上がり

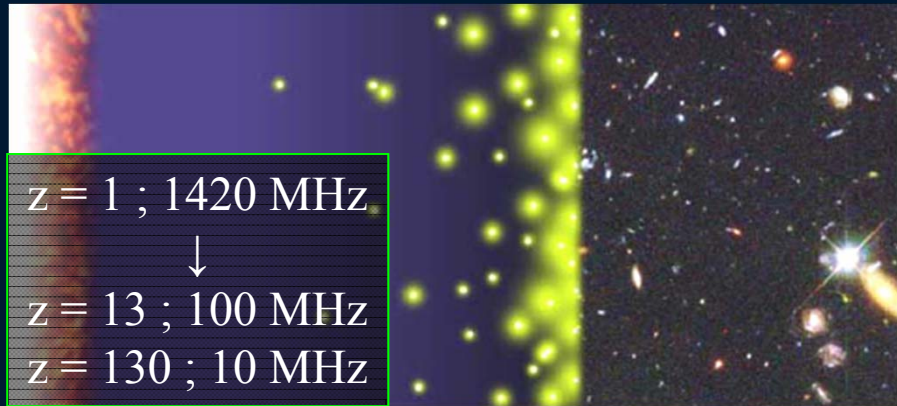


$z \sim 10$

再電離 (reionization)



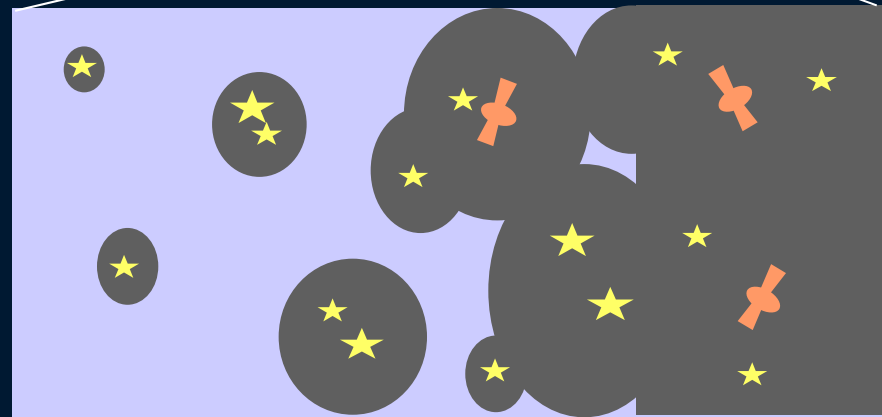
Djorgovski *et al.*



↑ビッグバン

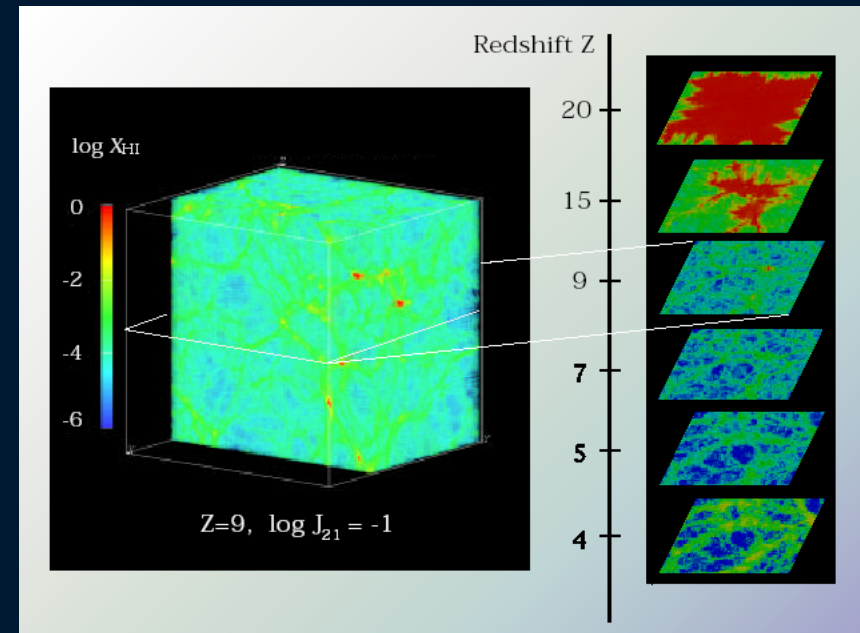
$z \sim 20$

$z \sim 7$



星の誕生

クエーサの誕生



再電離過程の3次元輻射輸送シミュレーション
→ 宇宙初期のweb構造

high-z(赤方偏移)の中性水素線

- 宇宙初期のweb構造の解明?
- 銀河団・銀河系の起源の解明?

LLFAST: 低周波電波観測のロードマップ

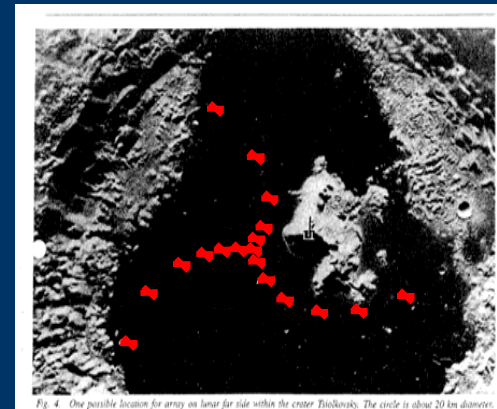
1st: LLFAST-1

月-地球
干渉計

月面小規模
干渉計

LLFAST-X

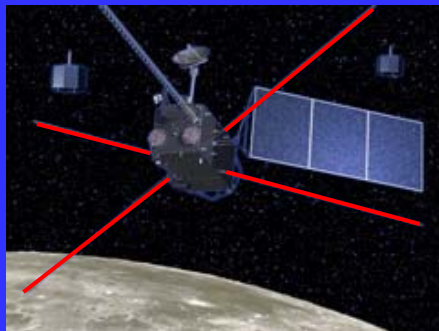
月面大規模干渉計



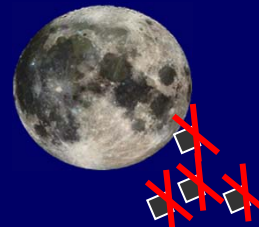
月面
↑

月周回軌道

「かぐや」LRS
自然電波観測
etc.



月周回編隊飛行

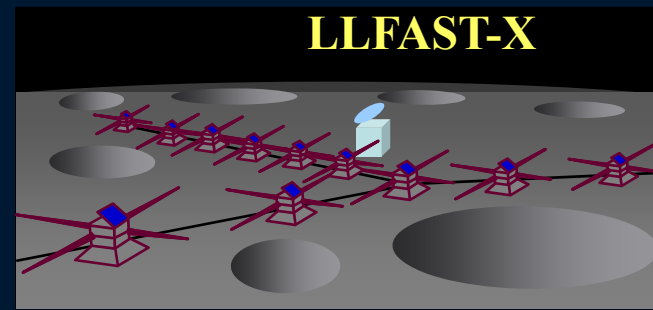


単一鏡 → 干渉計

after 岩田 他(2009)

軌道上 vs. 月面 比較

項目・要求	月面裏側	月周回軌道
配列	◎安定	△要維持
測位精度	◎安定	△要校正
環境	△熱、ダスト	◎安定
システム要求	△保温・発電方式	◎既存技術
運搬効率	△悪い	◎良い



観測からの要求：

◇感度 → アンテナ素子数に依存

◇マッピング（イメージング）の質 → アンテナ配列・測位精度に依存

位相誤差、アンテナビームの効率・パターン・サイドローブレベルを考慮する
最適アンテナ配列

$$(m\lambda)^{1.7}; m=1, \dots, n$$

→安定な配列： 基線長 < 17 km を維持する必要がある

→測位精度： 常時 < 1.5 m で推定する必要がある

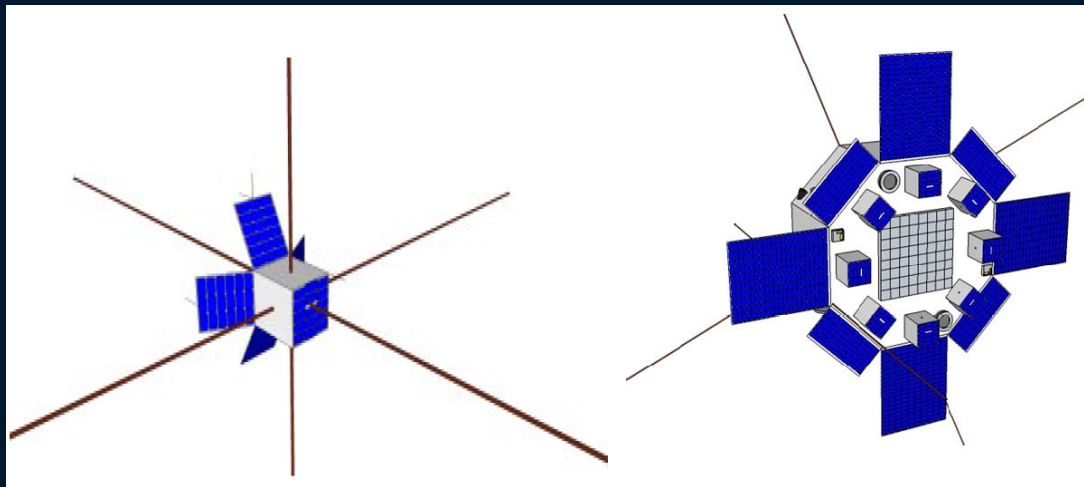
低周波スペース観測提案の比較

projects	freq. (MHz)	orbiter	antennas	main targets
DARIS	1-10	terrestrial small satellites (<100kg) within 100km	3 orthogonal dipoles	extragalactic survey, solar/planetary bursts
FIRST	<10	6 spacecraft at Sun-Earth L2	6 monopoles	all-sky survey
SURO	0.1-30	9 spacecraft on solar orbit	a tripole	extragalactic source populations, helio physics, planetary emissions
OLFAR	1-30	>10 (lunar) nano satellites (<10kg) within 100km	a dipole or tripole	cosmology, etc.
LLFAST	15-25	a lunar satellite	a cross dipole	planetary emissions
DARE	40-120	a lunar satellite	2 bi-conical dipoles	cosmology – the first stars and black holes, etc.

海外提案の宇宙機コンフィギュレーションと軌道例

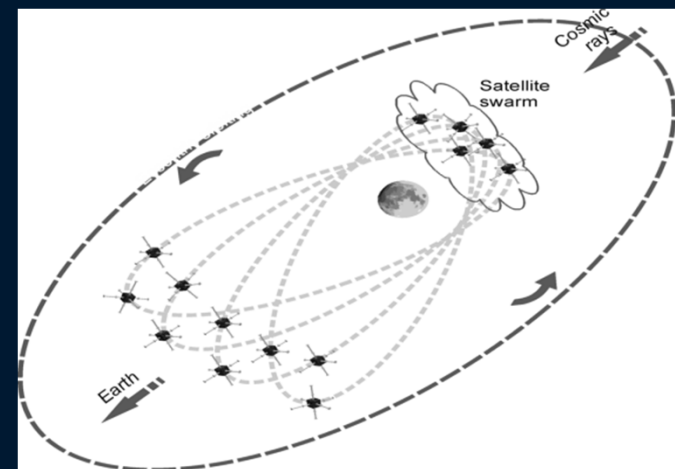
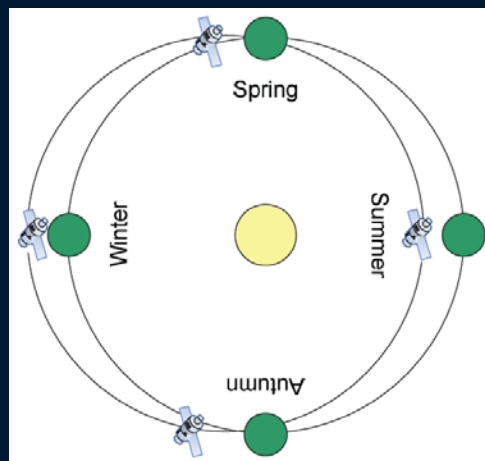
SURO (Space based Ultra long wavelength Radio Observatory):

上) 母船・子機、下) 太陽回軌道
(Baan, 2010)



OLFAR (Orbital Low Frequency ARray):

上) nano satellite、下) 月周回軌道
(Wolt, 2013)



参考文献

Baan, 2010, *a prpposal for ESA's Cosmic Vision*.

Djorgovski *et al.*, <http://www.astro.caltech.edu/~george/reion/>

Hong *et al.*, 2013; Status of the Chinese Space VLBI Array.

Imai *et al.*, 2008, AGU Fall Meeting.

岩田 他、2009, 宇科連, 1C05.

Kaiser *et al.*, 2002, *JGR*, **105**, A7, 16053.

Kumamoto *et al.*, 2008.

La Rosa, *et al.*, 2000, *Astron. J.*, **119**, 207.

Wolt, 2013, *DEX white paper 2013*.

Zarka *et al.*, 1997, *Planetary Radio Emission IV*.