

2022 年度 学士卒業論文

原始惑星系円盤モデルを用いた
ngVLA の観測シミュレーションーション

茨城大学理学部理学科
物理学コース

電波天文観測研究室

19S2008N 岩瀬慶亮

目次

1	序論	4
1.1	ngVLA とは	4
1.2	アルマ望遠鏡でみた原始惑星系円盤	7
2	原始惑星系円盤モデル	8
2.1	流体力学シミュレーション	8
2.2	93GHz の円盤モデル	9
3	ngVLA 観測シミュレーション	10
3.1	周波数に合わせたモデルの作成	10
3.2	ngVLA による観測シミュレーション	11
4	考察	16
5	まとめ, 今後の展望	19
付録 A	イメージング	21
付録 B	数式	24
付録 C	Main Array の主要なパフォーマンス指標	26
付録 D	ngVLA 観測シミュレーションのスクリプト	28

概要

主系列星より前の進化段階である前主系列星の星周円盤は惑星形成の場であると考えられており、原始惑星系円盤と呼ばれる。円盤は主に水素分子からなるガスと固体微粒子(ダスト)で構成されている。近年の ALMA による高分解能の連続波観測によってリング/ギャップ構造などの軸対称構造や三日月構造、渦状の構造などの非対称性構造が発見された。特に、原始惑星系円盤にある環状のギャップは生まれたばかりの惑星と円盤ガスとの相互作用によるものであると考えられる。(ここでリングとは、ある程度の幅を持ち、ある半径で輻射強度が極大となっている軸対称構造を指す。一方、ギャップは輻射強度が極小となっている構造を指す。) また、惑星形成の理論モデルとの比較から、これらの構造は数十 au で中心星の周りをまわる土星や木星と同程度の質量を持つ惑星と星周円盤との重力相互作用によるものである可能性が示唆されました。もしこれらを確認できれば現在の惑星形成モデルで想定されているよりもはるかに大きな軌道半径で巨大惑星が形成されることを意味する。

しかし ALMA による観測から、円盤内側領域である比較的質量の大きい若い円盤では、星から 10-30au の範囲ではミリ波のダスト連続波は光学的に厚いことも明らかになった。また、ダスト密度を測定することができず、惑星による密度擾乱を画像化することができない。そのためアルマ望遠鏡の観測では、そこでの形成途上の惑星検出は原理的に困難である。

この問題を解決するためには、原始惑星系円盤を 10-100GHz の周波数で撮像する必要がある。この周波数では円盤内側領域は光学的に薄く、検出できるほど十分明るい。現在この周波数帯は VLA によってカバーされているが、角度分解能と感度が不十分であるため円盤内部の惑星の検出が困難となっている。しかし、現在提案されている ngVLA は 10-100GHz の周波数で円盤内側を見通す感度を持つため、軌道半径 5au で恒星の周りを公転する土星程度の質量を持つ惑星からの擾乱を検出する可能性がある。したがって、これを用いた観測は原始惑星系円盤での惑星系の理解を一変させる可能性がある。

本研究では、原始惑星系円盤の内側領域における形成途上の惑星を考慮した最先端の理論モデルを用いて ngVLA の観測シミュレーションを行うことで、高精度な観測によるマッピング能力を調査する。観測周波数などのシミュレーションに関するパラメータをいくつか変え、観測したときの見え方の違いや観測に適している周波数を明らかにすることを本研究の目的とする。

第 1 章では ngVLA とこれまでの ALMA による原始惑星系円盤の見え方について記述する。第 2 章では ngVLA の観測シミュレーションに用いたダスト連続波モデルとその作成に用いた流体力学コードについて、第 3 章では、ngVLA 観測のシミュレーション方法などの手法を説明する。第 4 章で本研究の結果の概要について、考察とまとめは 5 章に記述する。

1 序論

1.1 ngVLA とは

ngVLA (next generation Very Large Array : 次世代型電波干渉計) は合計 263 台のパラボラアンテナを北米全域に分散させて設置し、最大で約 9000 キロメートルの口径の電波望遠鏡を実現しようという次世代の大型電波望遠鏡計画である。1.2-116GHz の周波数で動作予定で、この電波干渉計は 2mm 以下の波長における ALMA の優れた性能と、将来のデジメートルからメートルまでの波長における SKA1 の間のギャップを埋めることができる。熱線や連続放射をミリ秒角 (mas) の分解能で超高感度撮像し、前例のない広帯域連続放射撮像や非熱的放射の polarimetry によって、宇宙への新しい窓を開くものである。

ngVLA の科学目標

ngVLA は、New Words, New Horizons Astro2010 Decadal Survey に記載された科学的優先順位を含む現代の天体物理学の高い優先順位の目標の多くに対応するものである。以下に記述する 5 つの主要科学目標 (KSG) を達成するために必要な質の高い観測を提供できるように設計されている。

- KSG1 : 太陽系に類似した惑星形成と惑星系円盤
- KSG2 : 宇宙化学で惑星系と生命の初期条件
- KSG3 : 宇宙時間スケールにおける銀河の構造と進化
- KSG4 : 我々の銀河系中心に潜むパルサーを用いた重力理論の検証
- KSG5 : 星質量から超巨大質量に至るブラックホールの形成進化の解明

特に本研究の対象である原始惑星系円盤は KSG1 と関係している。ngVLA が観測する波長帯では、ガスやダストの密度の高い領域の内部を映し出すことが可能であり、そこで形成された岩石惑星が作るギャップの様子を描き出すことができる。惑星形成の初期段階のギャップの存在を捉えることにより、地球のような岩石惑星の起源の理解が前進すると考えられている。

感度と解像度

ngVLA で稼働予定の波長帯であるセンチ波からミリ波帯の一部 (約 20cm から 3mm 帯) において比類ない感度と解像度を達成する。具体的には、現在稼働中の JVLA 及び ALMA の約 10 倍高い集光力 (電波を集める能力) と解像度 (天体を細かくみる能力) を実現する。集光力は天体観測の感度に直結している、つまり、既存の装置では検出することが難しい暗い天体を探索したり、天体に付随する淡い構造をより明るく映し出したりすることができる。また、解像度が向上すると画像をより鮮明に描写でき、天体構造の詳細を調べることができる。最大で約 9000km の基線長を実現するアンテナ 30 台を設置することにより、さらに 10 倍高い解像度を実現する。また、この波長帯では星々の間に浮かぶ塵が温められた際に放たれる熱的放射、原子や分子が放つ輝線や吸収線を効率よく観測することができる。ダストが放つ熱的放射は多くの天体にみられ、星・惑星系、降着円盤、星形成、銀河形成などの調査に適する。

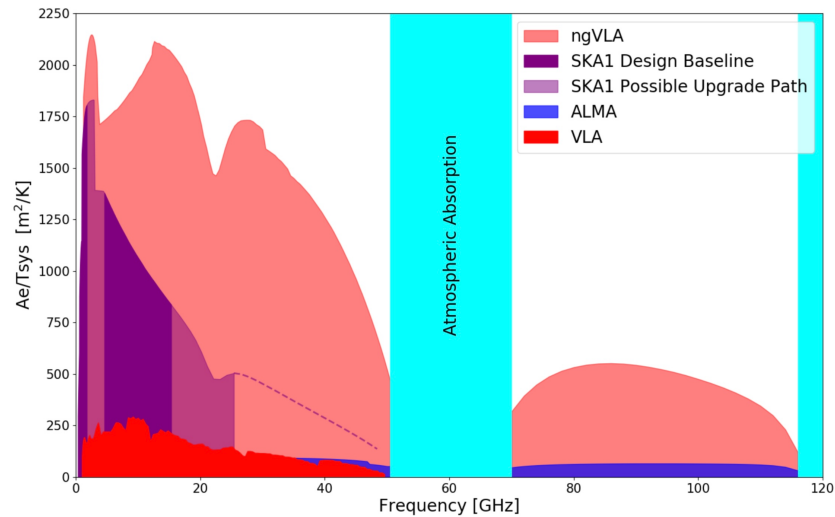


図 1: 縦軸に同じ周波数帯の分光感度（有効集光面積/システム雑音温度），横軸に稼働周波数帯を示す。[1]

メインアレイ (Main Array)

ngVLA は 3 種類の望遠鏡群（アレイ）が計画されている。ngVLA の中心的な役割を担うのが、口径 18 メートルのアンテナ 214 台で構成される「メインアレイ (Main Array)」である。米国ニューメキシコ州ソコロにある VLA サイトを中心に最大約 1005.4 キロメートルの範囲にメインアレイのアンテナを配置する予定である。電波干渉計の解像度は、アンテナの基線長に比例して向上する。つまり、アンテナ間隔を長くすればするほど解像度が向上し、天体の細かい構造を見ることができる。

ショートベースラインアレイ (Short Baseline Array)

メインアレイのほぼ中心の位置に、口径 6 m のアンテナ 19 台で構成されるアレイである。比較的口径の小さなアンテナを短い間隔でコンパクトに設置する。これにより、近傍の銀河や天の川銀河の星雲のように大きく広がった天体の観測に対して有効である。

ロングベースラインアレイ (Long Baseline Array)

これら二つのアレイに加え、超高解像度を実現するためのアレイの設置が計画されている。口径 18 m のアンテナ 30 台を、北米全域だけでなくハワイ州やプエルトリコなどに 3 台ずつ 10 局に配置する。これにより、8,860km の口径を持つ巨大な電波望遠鏡が実現し、0.1mas の解像度が実現できる。（ハワイ、ワシントン、カリフォルニア、アイオワ、ウェストバージニア、プエルトリコ、バージン諸島、カナダ、ニューハンプシャーなど。）最近になって赤外線やミリ波の周波数帯での観測によって原始惑星系円盤の円盤内側領域を中心星から約 10-30au の距離まで空間的に分解することができるようになった。これらの波長での高分解能観測により 20au 以上の大きさを持つ円盤の形態的特徴が円盤周囲のガスやダスト放射によって明らかにされた。

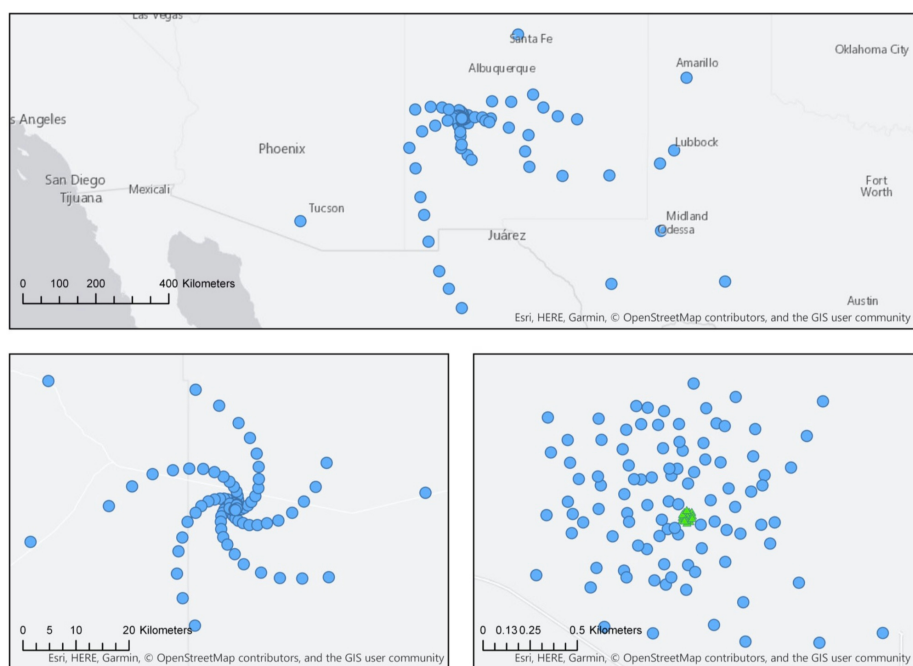


図 2: メインアレイとショートベースラインアレイのアンテナ配置。青丸がメインアレイのアンテナが配置される場所を表し、緑丸がショートベースラインアレイのアンテナを示す。 [1]

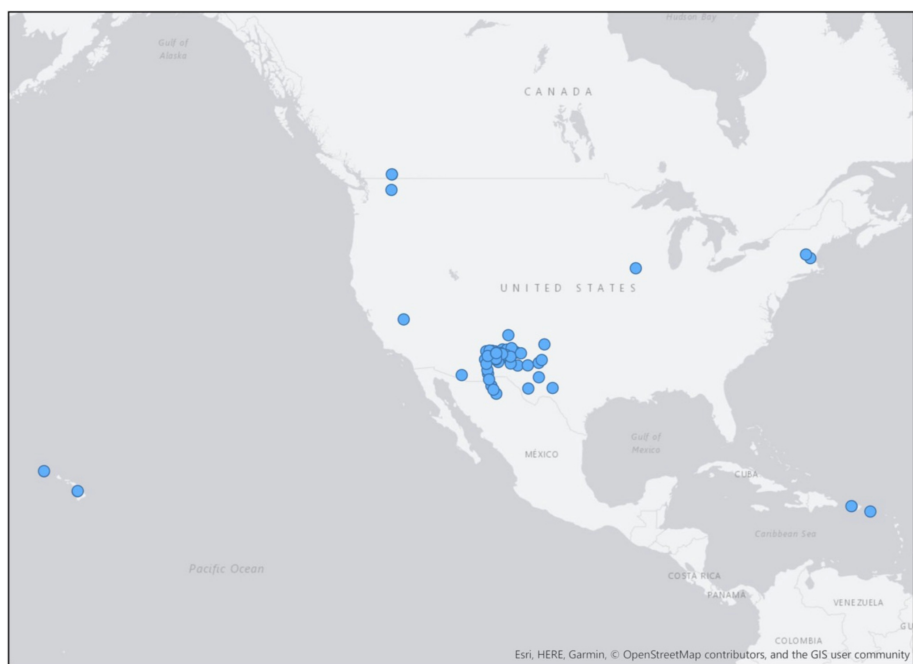


図 3: ロングベースラインアレイも含めた ngVLA のアンテナ配置 [1]

1.2 アルマ望遠鏡でみた原始惑星系円盤

先ほど述べたように、ALMA による高解像度での観測により、同心円状の明暗パターン（リング/ギャップ構造）が多くの円盤内に存在することが明らかになった。一方で、ALMA 以前に受け入れられていた理論的枠組みによると、惑星形成が進展するのは星・円盤系への物質供給が収まった T タウリ型星段階であると考えられてきたことを踏まえると、円盤内のリング/ギャップ構造が T タウリ型星より前の進化段階に当たる原始星段階でも見られたことは ALMA の大きな成果である。

図 4(左) は原始星段階に近い若い星 HL Tau の例である。このようなリング/ギャップ構造の成因については、惑星の公転運動に伴う円盤物質の掃きよせや、スノーラインの近傍で生じるダスト粒径の急激な変化に伴う滞留、ダストとガスからなる二流体中で起こる永年不安定など様々な機構が提案されている。それぞれの円盤でどの機構が働いているかを決定することは難しい。しかし、いずれの機構も惑星存在の間接的証拠、または惑星形成の素過程であるダストの合体成長と関連している点で重要である。

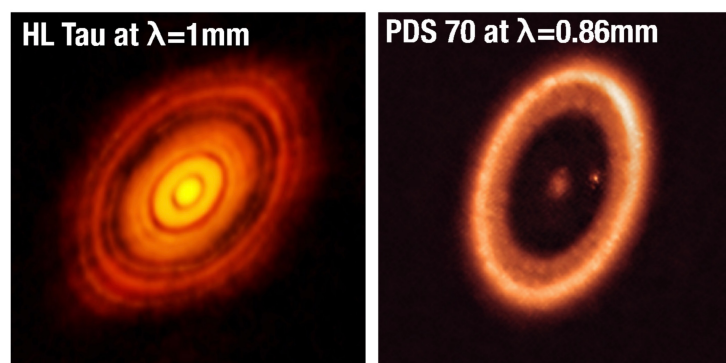


図 4: (左)ALMA で観測した HL Tau に付随する円盤からの波長 1mm でのダスト熱放射。(右)ALMA で観測した PDS70 に付随する円盤からの波長 0.86mm でのダスト熱放射 [1]

しかし、円盤内部の細かい構造を検出するには、ALMA の観測波長帯ではダスト円盤が光学的に厚いことや、角分解能と感度が不十分であることにより困難であることがわかった。そのため、原始惑星系円盤の理解を高めるためには ALMA より長い波長帯での観測を可能とする ngVLA のような施設が必要となる。

2 原始惑星系円盤モデル

原始惑星系円盤モデルは [8]Ricci et al.(2018b)('Imaging Planetary Systems in the Act of Forming with the ngVLA') で用いられたものと同じモデル (ppmodel_image_93GHz.fits[12] より取得) を採用する。ここでは円盤モデルの作成方法, それによって得られた円盤について記述する。

2.1 流体力学シミュレーション

モデルは形成途上の惑星系を検出して, その特徴を調べるために 2D- LA-COMPASS 二流体力学コードを用いた数値シミュレーションによって作成された。このコードは, ガスと大きさの異なるダストの力学相互作用を考慮し, 複数の波長におけるダスト連続波を導き出すことができる。そのため, 質量と軌道半径の異なる惑星と円盤内側のガスとダストの重力相互作用をモデル化するために使用された。ダストの物理状態は Laibe & Prince(2014) で説明されている一流体アルゴリズムを採用している。流体力学シミュレーションの出力は, モンテカルロ輻射輸送コード RADMC-3D(Dullemond 2012) により合成して, 惑星によって擾乱された 93GHz(3mm) の合成画像を出力し生成した。以下にこの流れを記す。

ガスの初期表面輝度は次のような動径方向のプロファイルが使用された。

$$\Sigma_{\text{gas}}(r, t = 0) = \Sigma_c \left(\frac{r}{r_c} \right)^{-\gamma} \exp \left[- \left(\frac{r}{r_c} \right)^{2-\gamma} \right] \quad (1)$$

これは, 粘性 $\nu(r) \propto r^\gamma$ (Lynden-Bell & Pringle 1974) のときの粘性降着円盤の進化に関する自己相似解である。ここで, $\gamma = 0.8$ $r_c = 17 \text{ au}$ が採用されている。正規化定数 Σ_c は以後説明する円盤内のガス初期質量を考慮している。

ダストの初期柱 (表面) 密度については,

$$\Sigma_{\text{dust}}(r, t = 0) = 0.01 \times \Sigma_{\text{gas}}(r, t = 0), \quad (2)$$

ここで, 0.01 は星間物質中のダストとガスの質量比である。ガスの力学相互作用はダスト粒子のサイズに依存するため, ダストの柱密度は 0.007mm から 1cm の間で 11 種類のサイズに分配した。各サイズのダスト質量は $n(a) \propto a^{-q}$ を用いて, べき乗指数は $q = 3.5$ を仮定した。ダストの体積密度はダストモデルと整合するように, $\rho_{\text{solid}} = 1.2 \text{ g cm}^{-3}$ を仮定しました。

ガス粘性は Shakura & Sunyaev(1973) の α が採用された。ガス粘性はガス分布の方位角非対称性を滑らかにするとともに, 惑星があけた隙間を塞ぎ, その隙間にダストを拡散させる効果がある。本研究では $\alpha = 10^{-5}$ の値のモデルを使用する。

中心星の質量は $M = 1M_\odot$, 円盤の圧力スケールハイトは $h/r = 0.05 \times (r/5\text{au})^{0.25}$ で与える。惑星と円盤との相互作用を検証するために惑星の質量は $M = 300M_{\text{Earth}} (\approx 1M_{\text{Jupiter}})$, 軌道半径を 5au として円盤内に埋め込まれた。地球から円盤までの距離は 140pc, 赤緯を $+24^\circ$ とした。これは Taurus の近傍星形成領域を仮定している。シミュレーションは 1500 惑星公転周期で実行され, 約 16,700 年に相当する。

2.2 93GHz の円盤モデル

Ricci et al. (2018b)[8] は上記の流体力学シミュレーションの結果を出力して、ngVLA で観測可能な周波数の連続波放射の合成画像を作成するために使用した。LA-COMPASS シミュレーションで計算された密度と温度の構造を RADMC-3D のレイトレーシングアルゴリズムに入力して、画像の計算は行われている。特に、半径方向のダスト温度分布は次のように計算された [8]。

$$T_d(r) = 37\text{K} \times \left(\frac{r}{10\text{au}}\right)^{-0.5} \quad (3)$$

以上の流体力学シミュレーションによって作成されたモデルイメージを図 5 に示す。

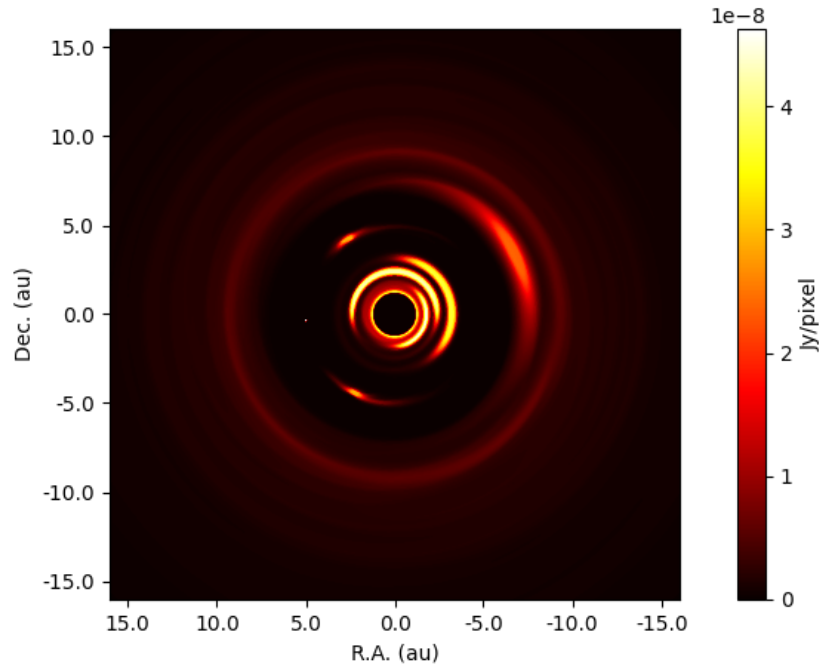


図 5: LA-COMPASS で作成された 93GHz のダスト連続波モデルイメージ

この結果、ダストの空間に強い方位角非対称性が確認できた。特に、ギャップの内側と外側に三日月型の構造がみられる。これは、ギャップ端のロスビー波不安定性によって生じるガス圧力の最大値に向かって漂うためである。

また、惑星と同じ軌道半径のギャップ内にダスト粒子の濃い部分が検出されている。これらの濃い領域は、星-惑星系のラグランジュポイント L_4 と L_5 にダストが滞留している。つまり、天体と天体の重力でつり合いがとれている点であることが分かる。

3 ngVLA 観測シミュレーション

この章では 2 章で説明した原始惑星系円盤モデルを用いた ngVLA の観測シミュレーションの手順や方法を説明する。さまざまな帯域幅での観測シミュレーションを行うことで観測に適した周波数を探ることが目的であるため、まず LA-COMPASS で作成された 93GHz モデルをもとに 16GHz, 27GHz, 41GHz のモデルへと作り変える。その後、各周波数のモデルに合わせた観測シミュレーションを実行する。

3.1 周波数に合わせたモデルの作成

流体力学シミュレーションで作られた 93GHz のモデルは表面輝度 I_ν で表された fits ファイルである。そこで、表面輝度から柱密度 Σ_{dust} のイメージを作成する。温度 T 、柱密度 Σ_{dust} のダスト層からの熱放射を空間分解した場合に観測量 I_ν が得られる。

$$I_\nu = B_\nu(T(r))[1 - \exp(-\tau)] \quad (4)$$

ここで、輻射強度で表したプランク関数 $B_\nu(T)$ はボルツマン定数 k_B 、光速 c をとして

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T} - 1\right) \right]^{-1} \quad (5)$$

となる。 τ は光学的厚みで、 $\tau = \kappa_{\text{abs}} \Sigma_{\text{dust}}$ です。観測データからダストの質量を見積もるために、ダストの単位質量 (1g) 当たりの吸収断面積は、

$$\kappa_{\text{abs}} = 10 \left(\frac{\nu}{10^{12} \text{Hz}} \right)^\beta \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}; (\beta = 0 - 2) \quad (6)$$

[2] を使用しました。

式 (1)-(3) に対して LA-COMPASS で得られたものや、本研究の観測条件を踏まえた仮定や近似をする。

- $\beta = 1$;
 κ_{abs} のべき指数である β は原始惑星系円盤では、 $\beta \leq 1$ の値をとることが 1990 年代より観測的に示唆されているため、 $\beta = 1$ と仮定した。
- $\tau \ll 1$;
 本研究で観測予定である ngVLA の周波数帯 16-93GHz は円盤に対して光学的に十分薄いことから、 $\tau \ll 1$ とする。
- 温度 T ;
 円盤のダスト温度分布は LA-COMPASS の計算で得られた (1) 式を用いる。
- レイリージーンズ近似;
 ダスト温度の動径方向分布 $T_d(r)$ に対して ngVLA の周波数帯は ν は、 $h\nu \ll k_B T$ を満たしているため (2) 式にレイリージーンズ近似を使用する。

式 (1), (2) に対してこれらの仮定や近似を用いると、柱密度と表面輝度の間には次の式が成り立つ。

$$I_\nu = \kappa_{\text{abs}} \Sigma_{\text{dust}} B_\nu \quad (7)$$

$$B_\nu \approx \frac{2k_B T}{c^2} \nu^2 \quad (8)$$

以上の (5), (6) 式から柱密度分布を作成した。その柱密度分布から観測に用いる周波数を代入することで目的の周波数の表面輝度分布を表す fits ファイルを作成した。下の図は、基となるのモデルから任意の周波数の表面輝度分布の作成過程の概略を表している。

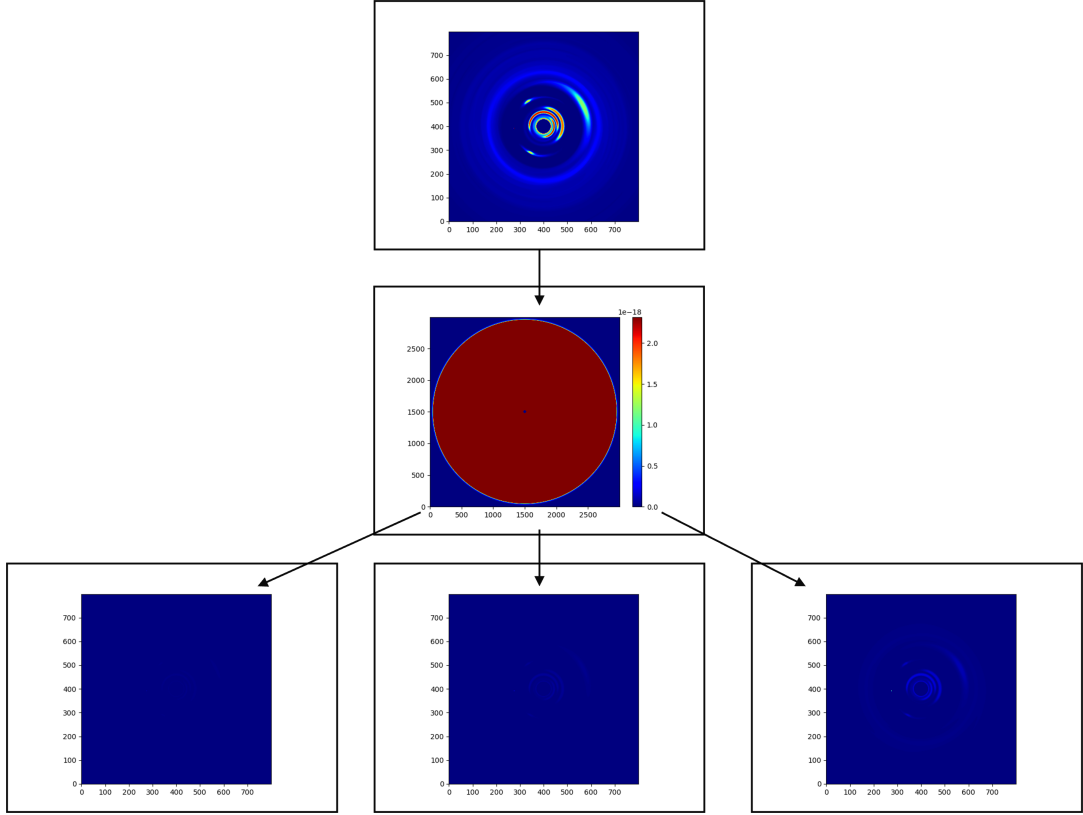


図 6: 93GHz のモデルの変換の概略図; 一番上の画像が LA-COMPASS で作成された 93GHz の円盤モデルを表している (表面輝度分布)。2 段目はいくつかの仮定をして 93GHz モデルから変換した柱密度 Σ_{dust} のイメージ画像。一番下の段は左から順番に 16GHz, 27GHz, 41GHz の表面輝度分布である。

3.2 ngVLA による観測シミュレーション

次に 93GHz の fits ファイルを用いた ngVLA の観測シミュレーションについて記述する。ngVLA 観測の配列の設定には, CASA パッケージにある ngvla-main-revC.cfg(メインレイ) というファイルを使用した。構成 (.cfg) ファイルには, 天文台の名前, アンテナの位置, アンテナの一の座標系, および各アンテナの直径と pad 名が含まれている。

Simulating ngVLA Data-CASA5.4.1-CASA Gides (nrao.edu) のコード [12] を用いて観測シミュレーションを行った。そのコードを以下に記す。

シミュレーションは解析ソフト CASA 内の simobserve タスクを用いた。この手法により測定セット (MS) を生成し, 熱雑音の追加, モデルのビジビリティを予測, そこから ngVLA のイメージング機能を調べることができる。93GHz, 単一チャンネルで 60 秒の相関器積分時間でランジットを中心に 4 時間の観測を実行する。シミュレーションの中心周波数は 93GHz で, 周波数分解能 10GHz, 帯域幅 10GHz, 積分時間 60 秒の単一チャンネルからなる連続波の観測シミュレー

ションを行う。シミュレーションに用いたコマンドは付録 C に記載した。以下には、コマンドの命令内容を記す。

モデル画像を用いた Simobserve によるシミュレーション例

simobserve タスクを使って、ノイズのない測定セット (MS) を作成する。これには構成ファイルとモデル画像を使用する。

- project: プロジェクトを作成する。プロジェクト名のフォルダを作成し、このフォルダにはノイズのない MS を含むすべての結果ファイルが格納される。
- skymodel: Jy/pixel 単位の入力モデル画像で、単一またはスペクトルキューブである。シミュレーションされた MS はこの入力モデルのチャンネル数、中心周波数、source direction、ピークフラックスを保持する。
- setpointings = True を選択し simobserve が独自のアルゴリズムとモデル画像のプロパティを用いてポインティング位置を導出するようにした。モデルのサイズは一次ビームよりはるかに小さいので (モザイクではなく) 単一ポインティングが生成される。
- obsmode: 干渉計データをシミュレートするためにパラメータを'int' に設定した。また、いくつかの拡張可能なパラメータに値を設定する。antennalist にはメインアレイの構成ファイルを設定する。totaltime を全観測時間に設定し、hourangle パラメータを使用して観測時間を transit に集中させ、その他の拡張パラメータはデフォルトのままとした。
- thermalnoise: ノイズのないシミュレーションを行うためにこのパラメータはからのままにしておく。ノイズは別のステップで追加する。
- graphics: これは画像にグラフィックを表示したり、png として保存したりするものである。ただし、現時点では数百 km 以上の基線長では正しく動作しないため'none'を使用する。

熱雑音

このセクションではシミュレーションにノイズを追加するために使用する手順と関連する計算手順について説明する。シミュレーションデータを乱す Simobserve のパラメータは熱雑音と呼ばれ、"simplenoise" というオプションを使用した。"simplenoise" はその名の通り簡単なスケールリングファクターに基づいたランダムなガウシアンノイズをビジビリティに付加する。sm.stenoise のパラメータ"simplenoise" のスケールリングファクターを推定するために以下の手順を使用する。テーパーなし、Natural weighting の StkesI 画像の RMS 雑音 (σ_{NA}) は次のようになる。

$$\sigma_{NA} \sim \frac{\sigma_{\text{simple}}}{\sqrt{n_{\text{ch}} n_{\text{pol}} n_{\text{baselines}} n_{\text{integrations}}}} \quad (9)$$

ここで、 σ_{simple} はビジビリティ当たりのノイズに相当し、 n_{ch} は全スペクトル窓にわたるチャンネル数、 n_{pol} は StokesI に用いる偏波数 (通常は 2)、 $n_{\text{integrations}}$ は MS における相関器積分時間 (観測時間/積分時間) である。今回のシミュレーションでは $n_{\text{ch}} = 1$ 、 $n_{\text{pol}} = 2$ とした。また、基線の数 $n_{\text{baselines}}$ は $N(N-1)/2$ で、 N はアレイのアンテナ数である。

(i)ngVLA 性能表 (付録 C, [11] から引用) を用いて、テーパーされてない naturally weighted の点源感度 (σ_{NA}) を計算する。ngVLA メモ # 55 [11] には、周波数と分解能の関数として表わされ

た6つのサブアレイの主要な性能指標がある。例えば、93GHzのメイン干渉計アレイのテーパなし、natural weightのpoint sourceは、1時間の観測で $0.83\mu\text{Jy}/\text{beam}$ であることがわかる。

(ii) その値を目的の観測長にスケーリングする。 $t_{\text{track}} = 4\text{h}$ 場合、 $\sigma_{\text{NA}} = 0.83/\sqrt{(t_{\text{track}}/1\text{hour})}$ 。

(iii) 上記の(1)式の画像雑音(σ_{NA})を用いて σ_{simple} を導く。この場合、 $\sigma_{\text{simple}} = 0.415 * \sqrt{1 * 2 * 22791 * 240} = 1.4\text{mJy}$ となる。

σ_{simple} を計算したら`sm.setnoise`を実行、ノイズのないMSのビジビリティにノイズを付加する。これらを行うことで、テーパされてないNatural weightの画像はRMSで予測する画像雑音とほぼ等しくなる。

イメージング

イメージングにはCASAの`tclean`を使用した。各サブアレイについて、以下のスキームでイメージングパラメータを決定した。

- `imsize = 3000`
- `cell = '0.3mas'`
- `specmode = 'mfs'`: 多波長合成, すなわち, 1つの出力画像チャンネルのみによる連続しているイメージング
- `gridder = 'standard'`: prolate 回転楕円体関数を使用した Gridding
- `deconvolver = 'hogbom'`: 天体構造が point source の集合で表現できることを仮定している。反復的に point source の位置と強度を決定し, 最終的に CLEAN ビームと point source の集合に畳み込むことで輝度分布を再現する。
- `weighting = 'natural'`: 格子内に含まれるデータ点に対してすべて同じ重みをかける。これにより輝度感度を最大にすることができる。

この一連のシミュレーションを16GHz, 27GHz, 41GHz 各周波数でも同様に行った。その際に変更したパラメータを表にまとめた。

parameters[units]	16GHz	27GHz	41GHz	93GHz
sigma_simple[mJy]	0.38	0.40	0.53	1.4
spwnmae	Band3	Band4	Band5	Band6
freq	16GHz	27GHz	41GHz	93GHz
deltafreq	4.1GHz	6.75GHz	10GHz	10GHz
freqresolution	4.1GHz	6.75GHz	10GHz	10GHz

ここで`sigma_simple`はビジビリティごとの熱雑音, `freq`は観測周波数, `deltafreq`は帯域幅, `freqresolution`は周波数分解能を表す。周波数窓(`spwnname`)はngVLAで定められたもので, Band3は12.3-20.5GHz, Band4は20.5-34.0GHz, Band5は30.5-50.5GHz, Band6は70.0-116.0GHzに対応している。これらの値はRosero et al.(2019b)[11]のAppendix Dを参照して使用し, 本研究の参照Cにまとめた。

観測シミュレーション結果

この章では ngVLA による干渉観測によるイメージングの予想結果を紹介する。ngVLA による各波長でのシミュレーション結果は以下ようになった。

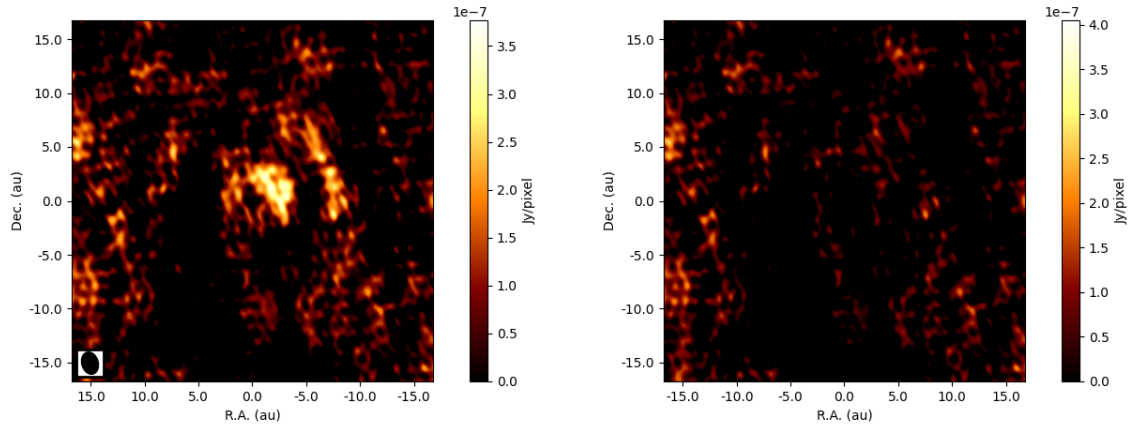


図 7: 16GHz の観測シミュレーション画像。左図が熱雑音を追加したモデル画像，右図は熱雑音のイメージ画像を表している。

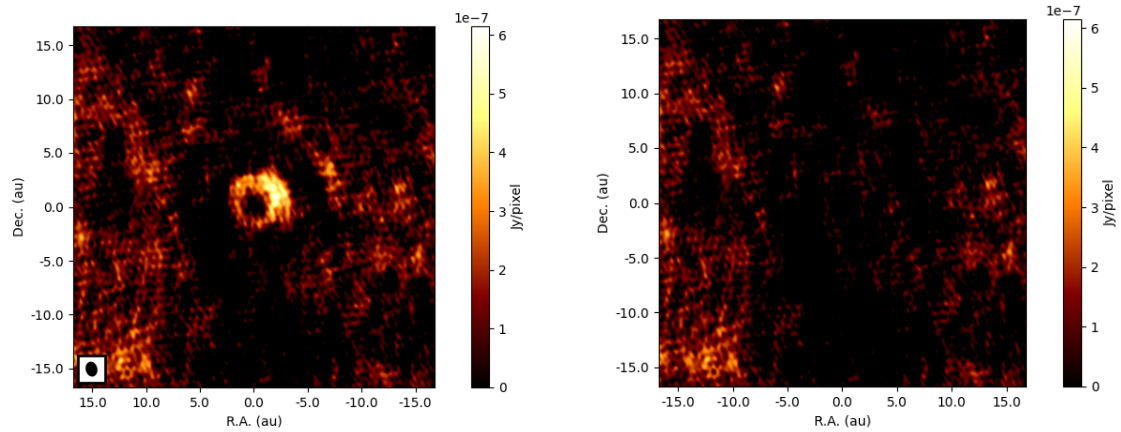


図 8: 27GHz の観測シミュレーション画像。左図が熱雑音を追加したモデル画像，右図は熱雑音のイメージ画像を表している。

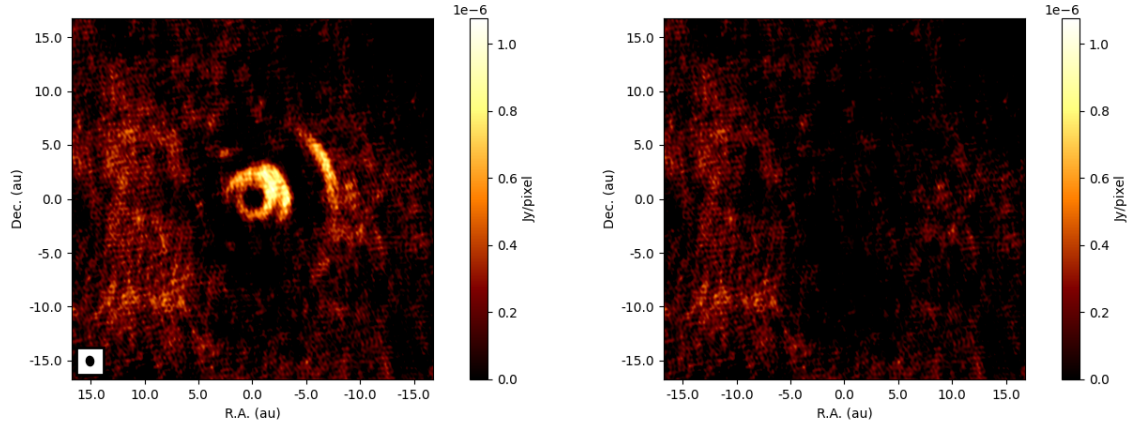


図 9: 41GHz の観測シミュレーション画像。左図が熱雑音を追加したモデル画像，右図は熱雑音のイメージ画像を表している。

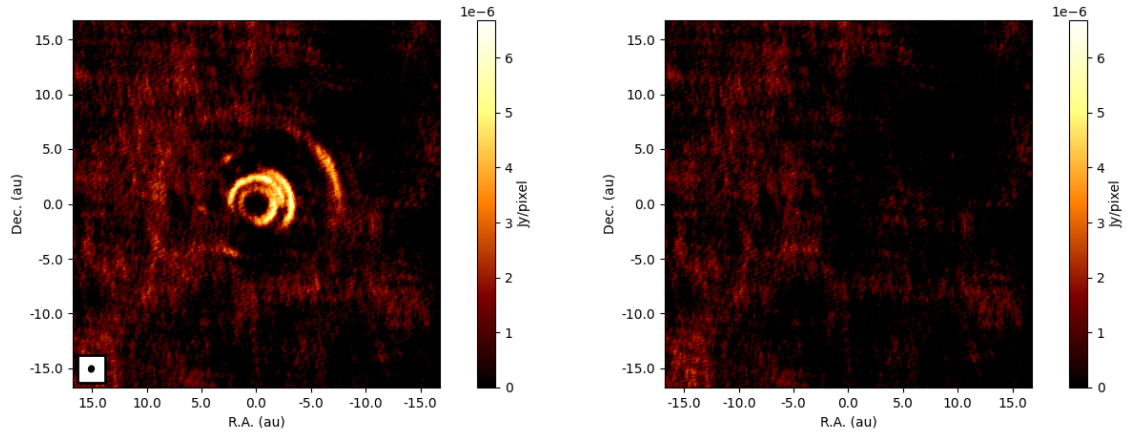


図 10: 93GHz の観測シミュレーション画像。左図が熱雑音を追加したモデル画像，右図は熱雑音のイメージ画像を表している。

16GHz では表面輝度が小さくなったことにより円盤の構造を見ることができない。27GHz の観測シミュレーションの結果では円盤の存在を検出することができた。しかし，中心から 5au の位置にある惑星の存在や円盤の非対称性などの構造は現れていない。次に 41GHz, 93GHz の観測結果を見てみる。これらの波長では低周波数では見ることができなかった円盤の非対称性や中心星から 5au の位置に存在する惑星の存在を確認することができた。

4 考察

低周波数帯に比べて高い周波数、特に 93GHz では円盤構造が顕著に現れた。このことから、今回のような中心近傍の円盤内に惑星が存在するような場合でも、ngVLA の高い周波数による観測は有効な手段であると考えられる。

高い周波数が円盤モデルの構造を検出できたのに対して、低い周波数、特に 16GHz では構造が淡くなってしまった。これは周波数に比例して表面輝度が小さくなったことにより熱雑音の値と近くなってることによるものと思われる。実際の観測では熱雑音のほかに位相雑音も含まれる。また、円盤構造を検出できなかった理由としてビームサイズ（分解能）が大きくなってしまったことも考えられる。ビームサイズ Δ は波長 λ 、口径（干渉計の場合、基線長） D を用いて $\Delta \approx \lambda/D$ の関係がある。ビームサイズが大きいと各ピクセルの値がビームサイズに合わせて伸ばされてしまい、のっぺりした構造となっている。以上の考えから今回のようなモデルを 16GHz で観測したとき、円盤構造を十分に分解することができない可能性がある。

次に 27GHz と 41GHz の比較を行う。これらのシミュレーション結果での大きな違いは、中心星から 5au の位置にある惑星を検出することができたかどうかという点だ。結果を見ると分かるように 41GHz での観測ではそれを検出できたが、27GHz ではできなかった。そこで 27GHz のシミュレーションを観測時間と積分時間を変えて観測をした。積分時間 60 秒でシミュレーションしたものに加え、10 秒、30 秒、120 秒の積分時間で観測シミュレーションを行った。その結果を以下の図に示す。

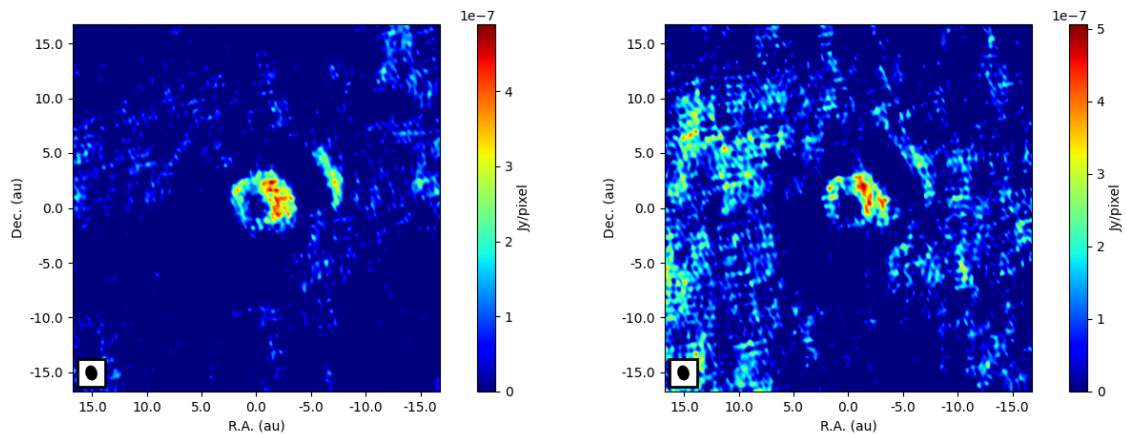


図 11: 27GHz のモデルを積分時間を変えたシミュレーション結果。左図が積分時間 10 秒、右図が積分時間 30 秒

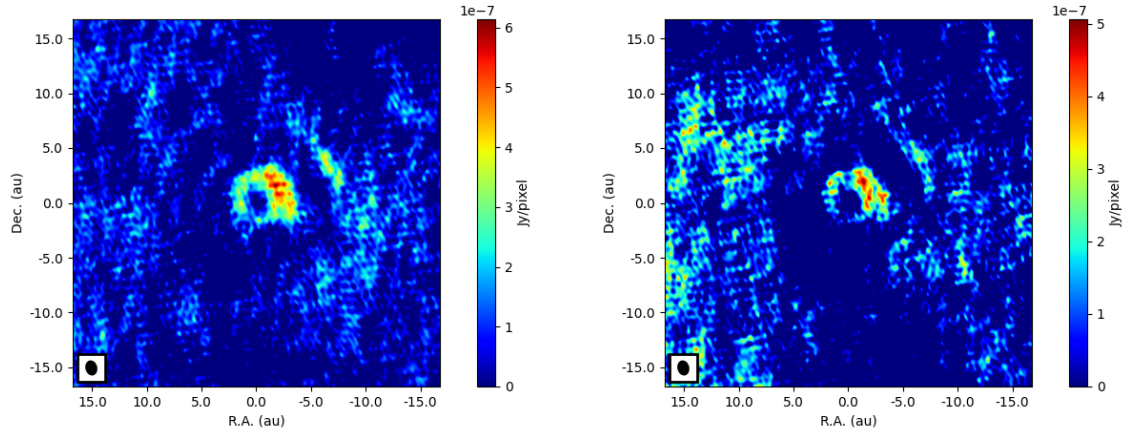
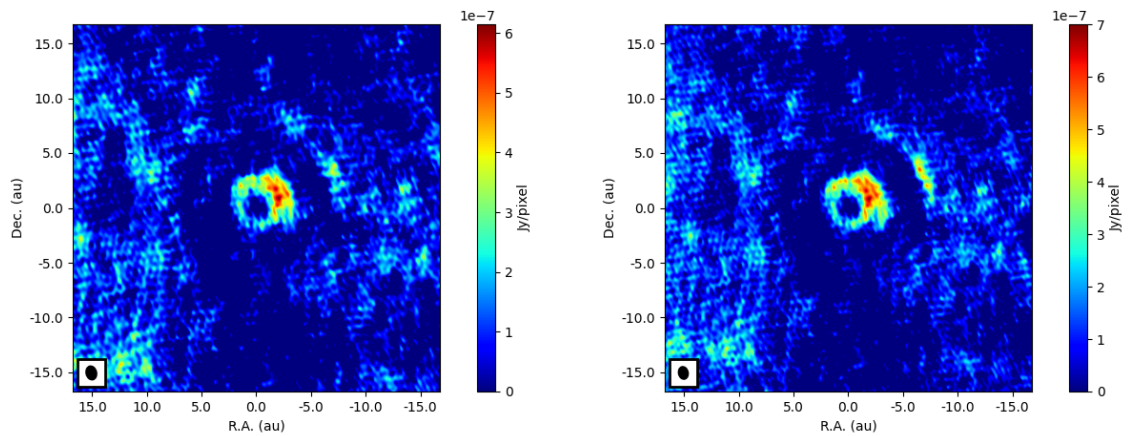


図 12: 27GHz のモデルを積分時間を変えたシミュレーション結果。左図が積分時間 60 秒 (図 8 と同様), 右図が積分時間 120 秒

結果を見ると、表面輝度の変化はあったものの、観測時間や積分時間を変えても構造の変化を見ることがない。このことから、これらの周波数の間には今回の円盤モデルの場合における ngVLA の検出限界があると推定できる。

そこで 27-41GHz の間の周波数をより細かく設定し、観測シミュレーションすることで今回の場合における ngVLA の検出限界を推測する。



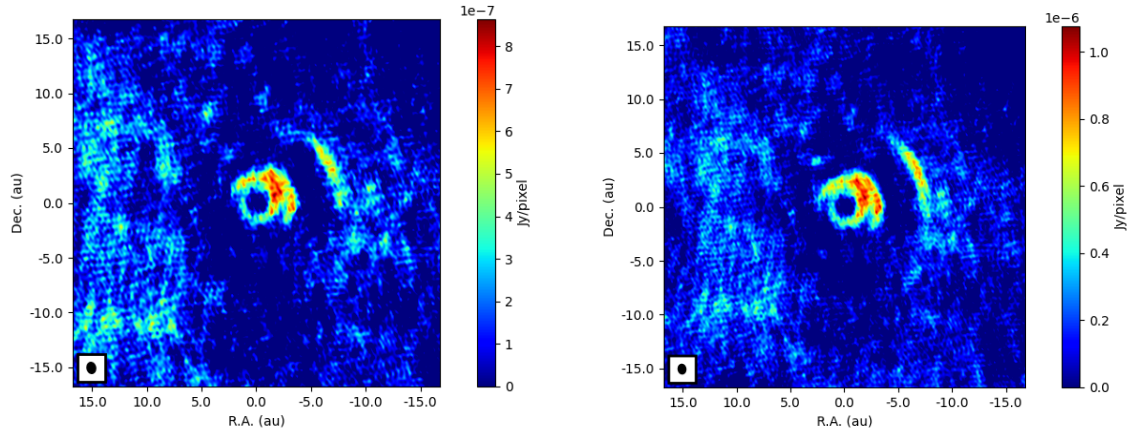


図 13: 27-41GHz の観測結果。左上が 27GHz, 右上が 30GHz, 左下が 35GHz, 右下が 41GHz

27-41GHz での観測結果を見ると 30GHz のシミュレーションは 27GHz との変化が見られないが、35GHz ではラグランジュポイントと思われる構造を見ることができる。このことから、今回用いたモデルに対する ngVLA の検出限界周波数は約 35GHz であると推測できる。

5 まとめ、今後の展望

まとめ

2D LA-COMPASS 流体力学シミュレーションを用いて作成された 93GHz の原始惑星系円盤モデルから 16GHz, 27GHz, 41GHz の円盤モデルを作成して, ngVLA の観測シミュレーションを行うことで円盤内部の惑星の検出可能性を検証した。

- 低周波数に比べて高い周波数, 特に 93GHz では円盤構造が顕著に現れた。
- 16GHz, 27GHz の低周波数では表面輝度の減少, ビームサイズが大きくなり画像が淡くなってしまったことにより円盤の細かい構造を検出することができなかった。
- 27GHz を境にモデルでは見られた三日月型の構造や, ラグランジュ点と思われる構造を検出できなかった。この点を踏まえ, 27GHz の観測シミュレーションを観測時間, 積分時間を変えることで時間との関係性を調べた。本研究で調べた時間では積分時間 60s, 観測時間 4hr の結果と円盤構造の変化を見ることはできず, 関係性の確認ができない。
- 時間を変えてシミュレーションしても円盤の細かい構造を検出できないことから 27-41GHz の周波数の間に, 本研究の円盤モデルの場合の ngVLA での検出限界があると推測した。27-41GHz で周波数を細かく変えてシミュレーションを行ったところ, 35GHz から惑星やラグランジュ点と思われる構造を検出できることがわかった。
- これらの結果から, ngVLA のような広い周波数を持っていても円盤と惑星の相互作用の様子を捉えるためには 41GHz や 93GHz の周波数帯が重要である。

今後の展望

本研究では積分時間や観測時間と ngVLA によるイメージングの関係性を見出すことができなかった。干渉計では基線長が長いほど視野が狭くなる。視野の広さを確保するために, より短い積分時間で観測シミュレーションを行うことで積分時間や観測時間との関係性を明らかにしていく。CLEAN も観測条件に合った設定で実行するように改善する。

また, 本研究では Ricci et al (2018b)[8] で作成された円盤モデルを用いて観測シミュレーションを行った。しかし, 原始惑星系円盤は他にも様々な構造が考えられるので, 理論や観測による結果に基づいた原始惑星系円盤のモデルを自ら作成する。それを用いた観測シミュレーションを ngVLA だけでなく, ALMA での観測シミュレーションを行い比較することで原始惑星系円盤に対する理解を深めたいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導、お力添えいただきました。この場を借りて感謝申し上げます。指導教員の百瀬宗武教授には研究を進めるにあたってさまざまな観点から助言をいただきました。ポスター発表の資料作成時には何度も添削していただきました。また、副指導教員の米倉覚則教授にはゼミで電波天文学の基礎を分かりやすく教えていただきました。大変感謝しております。研究員である田辺義浩さんにポスター発表の際に進歩を気にかけていただき、激励の品もいただきました。博士後期課程の折原龍太さんには研究で行き詰った際に質問すると、わかりやすく教えていただきました。そのおかげで研究を進めることができました。

一つ上の先輩方は研究室に温かく迎え入れてくださり、同期の4年生にも恵まれ、楽しく充実した生活を送ることができました。

研究に関わって下さったすべての方々に深く感謝いたします。ありがとうございました。

付録 A イメージング

重み付け

相関器でビジビリティを時間積分することで、 (u, v) の軌跡は (u_i, v_i) とれ離散的になる (i は基線・時刻で定まるビジビリティの番号)。 (u, v) 台においてビジビリティごとに重み W_i を調整できる。 W_i の設定として、誤差による重み w_i 、ビジビリティ密度 D_i 、およびテーパー T_i の3つを用い、 $W_i = w_i D_i T_i$ とする。

誤差と重みづけ

観測量には誤差がつきまとう。誤差がガウシアンであると仮定し、 i 番目のビジビリティの標準偏差を σ_i とする。 w_i を $w_i \approx \sigma^p$ とべき乗の形で書いたときの p を重み指数という。 $p = -2$ のとき電波像の信号雑音比 (SNR) は最大になる。基線ごとの感度がほぼ均一な決り合わせ型干渉計では $p = -2$ が最適である。

ビジビリティ密度の重み

(u, v) 面において取得されたビジビリティの密度は一様ではない。相関器からは一定の時間間隔でビジビリティが出力されるので、短い基線で得られるビジビリティは密に、長い基線で得られるビジビリティは疎になる。相関器の出力時間間隔が Δt のとき、ビジビリティの間隔は $(\dot{u}, \dot{v})\Delta t$ となる。

- Natural weight

$D_i = 1$ とすべてのビジビリティに同じ重み付けをすると、天体に関する輝度感度を最大にできる。 (u, v) 台は低空間周波数成分ほどビジビリティの密度が高く、高空間周波数成分の密度は低い。このためサイドロープレベルは低く抑えられる一方で、角分解能が悪くなる傾向がある。

- Uniform

(u, v) 面の面素 $(\Delta u, \Delta v)$ がビジビリティを N 点含んでいるときに $D_i = 1/N_i$ として、面素の重みを均一にする重み付けを uniform weight という。この場合、密度の重みが (u, v) 面内で一定で低空間周波数成分も高周波数成分も同じ重みで合成されるので、角分解能は高くなる。しかし輝度感度は低下し、サイドロープレベルも高くなる。

- briggs

robust パラメータを導入し、重み付けをより一般的にしたものである。密度の高い領域は Uniform に、低い領域では Natural に近くする。この特性を robust パラメータを $-2 - +2$ の間で動かして調整する。また、パラメータを 0.5 にすることで合成ビームの形状と感度の両方を最適化することができる。

グリッティングと視野

(u,v) 面の面素 ($\Delta u, \Delta v$) 毎にビジビリティをまとめる操作をグリッティング (gridding) という。グリッティングは、ビジビリティから 2 次元フーリエ変換で電波像を求める際に高速フーリエ変換 (FFT) する都合上、(u,v) 面におけるビジビリティを代表させるために必要な操作である。

格子点上のビジビリティを推定するには、格子点間隔と同じくらいの台を持つ畳み込み関数を観測で得られたビジビリティに対して畳み込み、それを格子点でもう一度サンプリングし直す

テーパー

テーパー T_i は (u,v) 面上での原点からの距離 $\sqrt{u_i^2 + v_i^2}$ に応じて重みを調整するもので、サイドローブレベルを低減させたり、角分解能をいろいろと変えて像合成をしたいときに用いられる。低空間周波数成分を強調すると、合成ビームより広がった天体の構造を描き出しやすくなる。

テーパーの例としてガウス関数

$$T_i = \exp \left[- \left(\frac{u_i^2 + v_i^2}{2F^2} \right) \right]$$

が用いられる。ここで、 F は T_i が $1/e$ に落ちる空間周波数である。ガウス関数のテーパーは合成ビームのサイドロープを低減する効果がある。

CLEAN

干渉計観測で得られるダーティマップは真の強度分布に合成ビームを畳み込んだものである。ダーティマップから合成ビームの影響を取り除いて真の強度分布を推定するにはデコンボリューション (deconvolution), すなわち畳み込みをほどこす操作が必要である。電波干渉計のデコンボリューションにはいくつかの手法があるが、干渉計の撮像でよく使用される CLEAN アルゴリズムを用いた。CLEAN の種類も様々であるが、今回は hogbom と呼ばれる手法を用いた。

hogbom では天体構造が point source の集合で表現できることを仮定している。反復的に point source の位置と強度を決定し、最終的に CLEAN ビームと point source の集合に畳み込むことで輝度分布を再現する。CLEAN ビームは合成ビームと同じと同じ半値幅を持つガウス関数が一般的に用いられる。

1. dirty image $\hat{I}(l, m)$ のなかで強度が最大値をとる場所 (l_0, m_0) を探し出す。
2. その最大値を CLEAN gain ($g < 1$) 倍した点源を CLEAN $C(l_0, m_0)$ として記録する。
3. CLEAN 成分に合成ビーム $B(l, m)$ を畳み込んだものを、dirty image から差し引く。これを残差マップ (residual) の最大値が閾値より小さくなるまで繰り返し反復する。(CLEAN が収束)
4. CLEAN 成分の集合に楕円ガウシアン (CLEAN beam) を畳み込み、滑らかなマップにする。CLEAN beam サイズは合成ビームの主なビームが適当。
5. 最後に残差マップを加えて、雑音レベルを適当なものにする。
6. CLEAN マップ

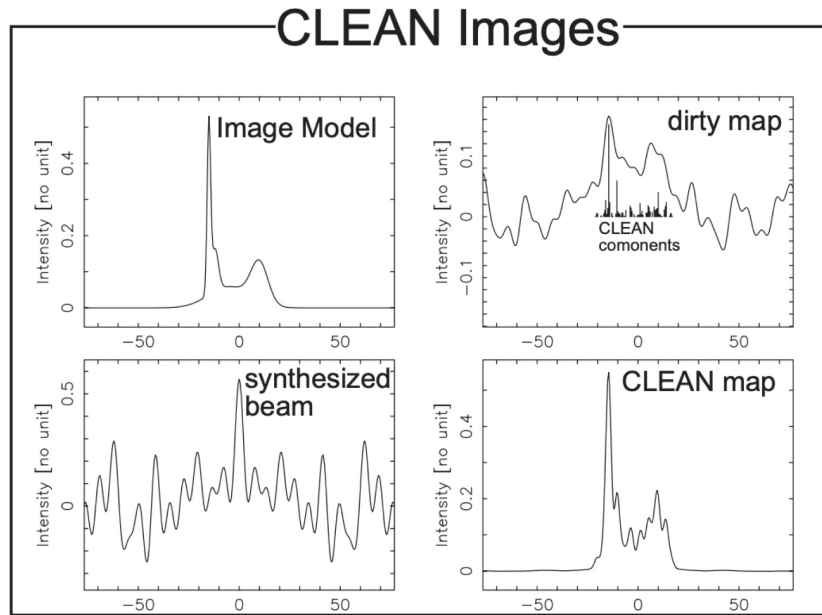


図 14: CLEAN(hogbom) の基礎 [3]

干渉計の視野

干渉計の視野は、素子アンテナの口径、最小アンテナ間隔、観測帯域幅、積分時間、グリッティングなど様々な要因で制限される。これらは (u, v) 面における空間周波数の精細さ（積分範囲とサンプリング間隔）に帰着される。 (u, v) 面における 1 個のビジビリティは、有限範囲 $(u \pm \Delta u, v \pm \Delta v)$ に連続的に分布するビジビリティを代表したものです。積分の結果その 1 点を求めたということは、畳み込みとサンプリングを実行したのと等価であり、畳み込み関数 $c(u, v)$ として積分範囲で 1, 外側で 0 となるような打ち切り関数を用いている。したがって東西方向の視野は $\sim \frac{1}{\Delta u}$, 南北方向は $\sim \frac{1}{\Delta v}$ で制限される。

積分時間

積分時間 Δt による (u, v) の積分範囲は $\Delta u = \dot{u} \Delta t$, $\Delta v = \dot{v} \Delta t$ となる。基線長が長いほど Δu は大きくなり、視野が狭くなる。視野の広さを確保するには、長基線のデータほど積分時間を短くする必要がある。

帯域幅と視野

帯域幅 B に対して $\Delta u = \frac{B}{\nu_0} u$ となるので、視野は $\sim c/(BD)$ に制限され、帯域幅と基線長 D に反比例する。

付録 B 数式

次の数式は観測シミュレーションのパラメータを設定するときに使われた。

Field of View(視野)

観測で一度に捉えることのできる天球面上の範囲を視野という。照度パターンが一様であると仮定した場合のアンテナのビーム半値幅（電波望遠鏡の主ビームの半値全幅のこと。電波望遠鏡の角分解能として扱うことが多い。）は、

$$\theta_{HPBW} \approx 1.02 \frac{\lambda}{D} [\text{rad}] \quad (10)$$

あるいは、より有用な単位での非常に大まかな見積もりは次の関係で与えられる：

$$\theta_{HPBW} \approx 1.02 \frac{206265}{60} \frac{c}{\nu D} \approx \frac{1.05 \times 10^3}{\nu_{[\text{GHz}]} b_{[\text{m}]}} [\text{arcmin}] \quad (11)$$

最大基線長の分解能 (合成ビーム)

分解能は合成ビームの半値幅で規定され、それは (u,v) での拡がりで決まる。

$$\theta_{\text{max}} \approx \frac{\lambda}{b_{\text{max}}} [\text{rad}] \approx \frac{6.2 \times 10^4}{\nu_{[\text{GHz}]} b_{\text{max}[\text{m}]}} [\text{arcmin}] \quad (12)$$

ここで b_{max} は干渉計の最大基線長である。

全有効開口面積

総集積面積は、アンテナ開口効率 η_A 、アンテナの直径 D 、およびアンテナの総数 N_{ant} と関係している。

$$A_{\text{eff}} = \eta_A N_{\text{ant}} A = \eta_A N_{\text{ant}} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 [\text{m}^2] \quad (13)$$

システム雑音等価フラックス密度 (SFED)

アンテナ 1 台当たりの SFED は：

$$SEFD = 10^{26} \frac{2k_B T_{\text{sys}}}{\eta_Q \eta_A A} [\text{Jy}] \quad (14)$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 η_Q は digitizer の量子化効率 (0.93)、 η_A はアンテナ効率、そして A はアンテナの幾何学的集光面積 (m^2) です。SEFD が小さいほど、すなわち有効開口面積が大きくてシステム雑音が低いほど、ビジビリティの信号雑音比が高くなる。

Naturally Weighted Point Source Sensitivity (σ_{NA})

uv データの自然な重み付けを使用して、予想される画像の理論的な熱雑音または点源の RMS は次のとおりである：

$$\sigma_{\text{NA}} = 10^6 \frac{SEFD}{\eta_c \sqrt{n_{\text{pol}} N_{\text{ant}} (N_{\text{ant}} - 1) t_{\text{int}} \Delta \nu}} [\mu\text{Jy beam}^{-1}] \quad (15)$$

ここで η_c は相関器効率 (0.98), n_{pol} は偏波の数, $\Delta\nu$ は Hz 単位のバンド幅, t_{int} は積分時間 [s], そして N_{ant} はアンテナ台数を表す。使用するバンド幅は連続波の場合 'Max inst. bandwidth', 線スペクトルの場合は '10 km/s channel width' を使用する。今回のダスト連続波の観測であるため前者を使用した。

なお、画像平均はゼロになると予想されるので、RMS と標準偏差は同じになると予想される。したがって、RMS と標準偏差は同じ意味で使われることが多い。

Line Width (線幅)

スペクトル線の線輪郭の幅のこと。

$$\Delta\nu = \nu \frac{\Delta v}{c}$$

ここで、速度分解能 Δv 、真空中の光速 c の単位はいずれも m/s、周波数 ν の単位は Hz である。

輝度温度

$$\sigma_{TB} = 1.216 \frac{\sigma_{\text{rms}}}{\nu^2 \theta_{1/2}^2} [\text{K}] \quad (16)$$

ここで、 $\theta_{1/2}$ は合成ビームの分解能 (FWHM) (単位: arcsec), そして ν は GHz 単位の中心周波数である。また、 σ_{rms} は $\mu\text{Jy beam}^{-1}$ 単位の点源感度で、次の式で表せる。

$$\sigma_{\text{rms}} = \eta_{\text{weight}} \sigma_{\text{NA}} [\mu\text{Jy beam}^{-1}] \quad (17)$$

付録 C Main Array の主要なパフォーマンス指標

Parameters [units]	2.4 GHz	8 GHz	16 GHz	27 GHz	41 GHz	93 GHz	Notes
Band Lower Frequency, f_L [GHz]	1.2	3.5	12.3	20.5	30.5	70.0	a
Band Upper Frequency, f_U [GHz]	3.5	12.3	20.5	34.0	50.5	116.0	a
Field of view [arcmin]	24.3	7.3	3.6	2.2	1.4	0.6	b
Aperture efficiency [%]	0.77	0.76	0.87	0.85	0.81	0.58	b
Total effective area, A_{eff} [10^3 m ²]	41.9	41.3	47.2	46.1	44.2	31.5	b
System temperature, T_{sys} [K]	25	27	28	35	56	103	a,f
Max. inst. bandwidth [GHz]	2.3	8.8	8.2	13.5	20.0	20.0	a
Antenna SEFD [Jy]	372.3	419.1	372.1	485.1	809.0	2080.5	a, b
Resolution of max. baseline (θ_{max}) [mas]	25.64	7.69	3.85	2.28	1.50	0.66	c
Natural Resolution							
Continuum rms, 1 hr [μ Jy/beam]	0.44	0.25	0.23	0.24	0.32	0.83	d
Line width, 10 km/s [kHz]	80.1	266.9	533.7	900.6	1367.6	3102.1	
Line rms, 1 hr, 10 km/s [μ Jy/beam]	74.1	45.7	28.7	28.8	39.0	66.5	d
1000 mas Resolution ($\theta_{1/2}$)							
Continuum rms, 1 hr, Robust [μ Jy/beam]	0.54	0.37	0.40	0.45	0.70	2.80	e
Line rms, 1 hr, 10 km/s, Robust [μ Jy/beam]	91.8	67.4	49.0	55.6	84.1	224.8	e
TB rms continuum, 1 hr, Robust [K]	0.1144	0.0071	0.0019	0.0008	0.0005	0.0004	e
TB rms line, 1 hr, 10 km/s, Robust [K]	19.38	1.28	0.23	0.09	0.06	0.03	e

100 mas Resolution ($\theta_{1/2}$)							
Continuum rms, 1 hr, Robust [μ Jy/beam]	0.44	0.28	0.28	0.29	0.42	1.26	e
Line rms, 1 hr, 10 km/s, Robust [μ Jy/beam]	73.89	51.08	34.24	36.06	50.85	101.33	e
TB rms continuum, 1 hr, Robust [K]	9.20	0.53	0.13	0.05	0.03	0.02	e
TB rms line, 1 hr, 10 km/s, Robust [K]	1559.81	97.05	16.26	6.01	3.68	1.42	e
10 mas Resolution ($\theta_{1/2}$)							
Continuum rms, 1 hr, Robust [μ Jy/beam]	-	0.86	0.29	0.24	0.34	0.94	e
Line rms, 1 hr, 10 km/s, Robust [μ Jy/beam]	-	156.70	36.40	28.87	40.84	75.43	e
TB rms continuum, 1 hr, Robust [K]	-	163.95	13.95	3.93	2.44	1.32	e
TB rms line, 1 hr, 10 km/s, Robust [K]	-	29773.06	1728.82	481.50	295.40	106.05	e

a – 6-band 'baseline' receiver configuration.

b – Reference design concept of 214 18m aperture antennas. Unblocked aperture with 160 μ m surface.

c – Current reference design configuration. Resolution in EW axis.

d – Point source sensitivity using natural imaging weights, dual polarization.

e – Using Weights as described in the text, scaled by frequency.

f – Average over band. Assumes 1 mm PWV at 93 GHz, 6 mm PWV for other bands, 45 deg elevation on sky.

For the latest performance estimates please visit the ngVLA website:

ngvla.nrao.edu/page/refdesign

Rosero ,(2019a), Appendix D(Key Performance Metrics), Tabel 10 [11]

付録 D ngVLA 観測シミュレーションのスクリプト

[12]Simulating ngVLA Data-CASA5.4.1 - CASA Gides (nrao.edu) のコードを用いて観測シミュレーションを行った。そのコードを以下に記す。

Listing 1: モデルイメージで Simobserve を使用したシミュレーションの例

```
1  simobserve(project = 'ngVLA_214_ant_60s_noise_free',
2              skymodel = 'ppmodel_mage_93GHz.fits',
3              setpointings = True,
4              integration = '60s',
5              obsmode = 'int',
6              antennalist = 'ngvla-main-revC.cfg',
7              hourangle = 'transit',
8              totaltime = '14400s',
9              thermalnoise = '',
10             graphics = 'none')
```

Listing 2: 熱雑音の追加

```
1  ## Adding noise using the 'simplenoise' parameter estimated in the section
    on Estimating the Scaling Parameter for Adding Thermal Noise:
2  sigma_simple = '1.4mJy'
3  os.system('cp -r ngVLA_214_ant_60s_noise_free.ms ngVLA_214_ant_60s_noisy.ms
    ')
4  sm.openfromms('ngVLA_214_ant_60s_noisy.ms')
5  sm.setnoise(mode = 'simplenoise', simplenoise = sigma_simple)
6  sm.corrupt()
7  sm.done()
```

Listing 3: sm ツールを使用したシミュレーションの例

```

1  ## Set the name of the configuration file for the ngVLA Main subarray:
2  conf_file = 'ngvla-main-revC.cfg'
3
4  ## Set the path to the configuration file within the CASA distribution.
5  ## If using CASA version older than 5.5, see the section on Obtaining the
6  ## Necessary Files for this Guide:
7  configdir = casa.values()[0]['data']+'/alma/simmos/'
8
9  ## Use simutil to read the .cfg file:
10 from simutil import simutil
11 u = simutil()
12
13 xx,yy,zz,diam,padnames,telescope,posobs = u.readantenna(configdir+
14     conf_file)
15
16
17 ## Simulate measurement set using the simulation utilities sm tool:
18 ms_name = 'ngVLA_214_ant_60s_noise_free.ms' ## Name of your measurement
19 set
20 sm.open( ms_name )
21
22 ## Get the position of the ngVLA using the measures utilities (me):
23 pos_ngVLA = me.observatory('ngvla')
24
25
26 ## Set the antenna configuration using the sm tool using the positions,
27 ## diameter, and names of the antennas as read from the configuration file
28 :
29 sm.setconfig(telescopename = telescope, x = xx, y = yy, z = zz,
30     dishdiameter = diam.tolist(), mount = 'alt-az',
31     antname = padnames, padname = padnames,
32     coordsystem = 'global', referencelocation = pos_ngVLA)
33
34
35 ## Set the spectral windows, in this case, as a single channel.
36 ## Simulation with a channel resolution of 10 GHz:
37 sm.setspwindow(spwname = 'Band6', freq = '93GHz', deltafreq = '10GHz',
38     freqresolution = '10GHz', nchannels = 1, stokes = 'RR RL LR LL')
39
40
41 ## Set feed parameters for the antennas:
42 sm.setfeed('perfect R L')
43
44
45 ## Set the field of observation that we are going to simulate
46 ## (where the telescope is pointing), in this example we are using
47 ## a Dec of +24deg.
48 sm.setfield(sourcename = 'My source',
49     sourcedirection = ['J2000','00h0m0.0','+24.0.0.000'])
50
51
52 ## Set the limit of the observation for the antennas:
53 sm.setlimits(shadowlimit = 0.001, elevationlimit = '8.0deg')

```

```

43     ## Weight to assign autocorrelation:
44     sm.setauto(autocorrwt = 0.0)
45
46     ## Integration time or how often the array writes one visibility
47     ## referencetime is the start date (today's date) and epoch measure ('utc
48         '):
49     integrationtime = '60s'
50     sm.settimes(integrationtime = integrationtime, usehourangle = True,
51         referencetime = me.epoch('utc', 'today'))
52
53     ## Setting the observation duration, which for our example is 4 hrs
54     ## because usehourangle=True above, these times are relative to HA=0:
55     starttime = '-2h'
56     stoptime = '2h'
57     sm.observe('My source', 'Band6', starttime = starttime, stoptime =
58         stoptime)
59
60     ## < steps for predicting model visibilities and adding noise can
61     ## optionally appear here in this order >
62     ## sm.predict...
63     ## sm.setnoise...
64     ## sm.corrupt...
65
66     ## Close the simulator tool:
67     sm.close()
68
69     ## fits ファイルをイメージとしてインポートする CASA:
70     model_file = 'ppmodel_image_93GHz'
71     importfits( fitsimage = model_file+'.fits', imagename = model_file+'.image
72         ')
73
74     ## モデルのビジビリティを予測する:
75     sm.openfromms('ngVLA_214_ant_60s_noise_free.ms')
76     sm.predict( imagename = model_file+'.image')
77
78     sm.close()

```

Listing 4: 結果と予想される雑音の比較

```

1     im.open('ngVLA_214_ant_60s_noisy.ms')
2     print( im.advise() )
3     im.close()
4
5     tclean(vis = 'ngVLA_214_ant_60s_noisy.ms', datacolumn = 'data', imagename
6         = 'sm_clean_noisy', imsize = 3000, cell = '0.3mas', startmodel = '
7         ppmodel_image_93GHz.image', specmode = 'mfs', gridder = 'standard',
8         deconvolver = 'hogbom', weighting = 'natural', niter = 0)

```

参考文献

- [1] 自然科学研究機構国立天文台, 2021, "Next Generation Very Large Array"
(https://ngvla.nao.ac.jp/researcher/resources/pdf/ngVLA_projectbook_2021v1.pdf)
- [2] 百瀬宗武, 2019, 遊・星・人, 28,213
- [3] 中井直正, 坪井昌人, 福井康雄. シリーズ現代の天文学 [第 2 版]16 宇宙の観測 II. 日本評論社, 2020
- [4]Murphy et al. 2018, ASP Conferense Sereies, Monograph 7, 3
- [5]Selina et al. 2018, ASP Conferense Sereies, Monograph 7, 15
- [6]Andrews et al. 2018, ASP Conferense Sereies, Monograph 7, 137
- [7]Ricci et al. (2018a) in "Science with Next-Generation Very Large Array", ASP Conferense Sereies, Monograph 7, 147
- [8]Ricci et al. (2018b) in "Investigating the Eraly Evolution of Planetary Systems with ALMA and the Next Generation Very"
- [9]Ricci et al. (2018c) in "Investigating the Eraly Evolution of Planetary Systems with ALMA and the Next Generation Very", The ngVLA Memo Series, 33
- [10]Rosero, (2019a), in "Sculpting of the Synthesized Beam and Imgae Fidelity Study of KSG1: Imaging of Protoplanetary Disks", The ngVLA Memo Series, 65
- [11]Rosero, (2019b), in "Taperability Study for the ngVLA and Performance Estimates", The ngVLA Memo Series, 55
- [12]Simulating ngVLA Data-CASA5.4.1 - CASA Gides (nrao.edu)