Next Generation Very Large Array

次世代大型電波干渉計 ngVLA

国立天文台 ngVLA 検討グループ



Next Generation Very Large Array

次世代大型電波干涉計 ngVLA

国立天文台 ngVLA 検討グループ



第1章 はじめに

- 003 1.1 ngVLAの何がすごいのか?
- 005 1.2 ngVLAの科学目標
- 006 1.3 ngVLAの科学要求と装置仕様
- 009 1.4 ngVLAの設置場所と観測装置
- 012 1.5 共同利用に供する観測装置
- 012 1.6 Square Kilometer Array-1 (SKA1) との関係
- 013 1.7 米国における検討状況
- 014 1.8 日本の参画に向けての活動と今後の展望
- 017 参考文献

第2章 科学的背景

- 021 2.1 現代天文学が確立した宇宙像と人類の立ち位置
- 021 2.2 ngVLAが捉える宇宙
- 022 2.3 我が国がngVLAの実現に向けて取り組む必然性
- 023 参考文献

第3章 ngVLAの科学的展望

027	3.1 惑星形成と惑星系円盤:アルマ望遠鏡のさらに先へ
027	3.1.1 形成途上の惑星を捉える
028	3.1.2 円盤温度構造とスノーライン
031	3.1.3 円盤ダスト放射の精密測定とダスト粒径の推定
033	3.1.4 星間ガスの化学進化と惑星系円盤への輸送
036	参考文献

- 037 3.2 様々な天体階層における星形成と星間化学
- 037 3.2.1 はじめに
- 037 3.2.2 ngVLAで目指す星間化学
- 040 3.2.3 銀河系内の星形成
- 041 3.2.4 近傍銀河における星形成
- 045 参考文献

- 047 3.3 宇宙史の中での銀河進化
- 047 **3.3.1***k*Ubc
- 049 3.3.2 ngVLAで観測する冷たい分子ガス
- 054 3.3.3 その他の星間物質に対する観測的研究
- 056 参考文献
- 057 3.4 大型電波干渉計による中性子星の研究
- 057 3.4.1 中性子星の重要性
- 058 3.4.2 中性子星を用いた長波長重力波の検出
- 061 参考文献
- 063 3.5 ブラックホールの進化とマルチメッセンジャー天文学
- 063 3.5.1巨大質量ブラックホールの形成進化
- 068 3.5.2 活動銀河核ジェットと核周領域
- 072 3.5.3 タイムドメイン・マルチメッセンジャー天文学
- 075 参考文献
- 077 3.6 ngVLAで探る恒星活動
- 080 参考文献

第4章 技術開発

- 083 4.1 反射型電波望遠鏡
- 085 4.2 受信機と冷却システム
- 087 4.3 デジタル技術
- 089 4.4 時刻·周波数配信
- 093 4.5 ソフトウェア
- 097 参考文献

第5章 結論

101 執筆者一覧

第1章 はじめに

次世代大型電波干渉計(next generation Very Large Array: 略称ngVLA)は、合 計263台の高精度アンテナを北米に設置し、最大で約9000 kmの口径に相当する望 遠鏡を実現する次世代の大型電波望遠鏡計画である。2015年頃より、アメリカ国立 電波天文台(National Radio Astronomy Observatory:略称NRAO)主導のもと, ngVLAの目指す科学目標が本格的に議論され、具体的な装置の仕様が検討されて きた。口径18 mのアンテナ214台, 口径6 mのアンテナ19台を米国ニューメキシコ 州ソコロを中心に設置。加えて、周辺諸島にも口径18 mのアンテナを30台設置す ることにより、最大で0.0001秒角(視力60万)の解像度を実現する画期的な計画で ある。ミリ波(波長3 mm)からセンチ波帯(波長20 cm)までの比較的長い波長 の電波を高感度・高解像度でとらえることにより、荷電粒子が磁力線の影響を受 けて放つ電波や、星々の間に浮かぶ低温の塵やガスが放つ電波を観測する。これ により、惑星形成と惑星系円盤、星形成と星間化学、宇宙史の中での銀河進化、中 性子星を用いた重力理論の検証、ブラックホールの形成進化とタイムドメイン・マ ルチメッセンジャー天文学などの分野において大きな進展が見込まれる。特に、さ まざまな大型有機分子が放つ電波をとらえることにより、138億年の宇宙の歴史の 中で、生命が存在する条件がどのように整えられ進化してきたのか、という人類の 究極的な問いに対する新たな知見が得られることが期待される。2026年頃に建設 開始,2030年代中盤の本格運用を目指す。NRAOは,建設と運用において25%の国 際貢献を想定しており、現在国際パートナーを募集している。日本国内の研究者コ ミュニティーからもngVLAプロジェクト参画に対する高い支持を得ており、天文 学分野外への広範な波及効果も期待される。国立天文台ngVLA検討グループが中 心となり、今後の日本の参画を検討している段階である。



1.1 ngVLAの何がすごいのか?

比類ない感度と解像度

ngVLAの稼働波長帯であるセンチ波からミリ波帯の一部(約20 cmから3 mm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Jasnky Verry Large Array (JVLA)およ びアルマ望遠鏡 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA)の約10倍高い集光力(電 波を集める能力:図1.1)と解像度(天体を細かくみる能力:図1.2)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むずか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写し出したりすることができるのである。また,解像度 が向上すると画像がより鮮明に描かれるため,天体構造の詳細を調べたり,同じ領域に存在する複 数の天体を見分けたりすることができるようになる。最大で約9000 km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倍高い解像度が実現する。



図1.1:縦軸に同じ周波数帯で現在稼働中もしくは建設中の装置の分光感度(有効集光面積/システム雑音温度),横軸 に稼働周波数帯域を示す。同じ周波数帯で稼働する既存装置の約10倍の感度が得られることがわかる。なお,50-70 GHz帯は大気の吸収により,地上から観測することができない。(NRAO提供。Bulter et al. ngVLA Memo #21)



図1.2:縦軸に解像度,横軸に稼働周波数帯域および波長を表す。既存の電波望遠鏡の10-100倍以上の解像度が実現 する。(NRAO提供)

センチ波ミリ波で観測する宇宙

この波長帯では、荷電粒子が磁力線の影響を受けて加速する際に放つシンクロトロン放射や星々 の間に浮かぶ塵が温められた際に放つ熱的放射、分子や原子が放つ輝線や吸収線スペクトルを効率 よく観測することができる。シンクロトロン放射は、銀河、活動銀河核から噴き出すジェット、超 新星残骸、パルサー、太陽フレアなどの高エネルギー現象に付随する電波である。一方、塵が放つ 熱的放射は多くの天体にみられ、星・惑星系、降着円盤、星形成の現場、暗黒星雲、銀河形成など の調査に適する。また、波長21 cm (周波数1.4 GHz)で観測できる中性水素原子の超微細構造線 は、宇宙空間に広がった低密度ガスの良い指標であることが知られている。さらに、波長約1 cm (20 GHz帯)で輝き、星間空間における窒素の重要な存在形態の一つであるアンモニア分子や、 波長3 mm (115 GHz)の電波を放つ一酸化炭素分子も観測でき、私たちの宇宙物理の理解が飛躍 的に向上することが期待される。ngVLAによって観測可能なスペクトル線の一部を表1.1に示す。

	ngVLA バンド	周波数帯域	主要スペクトル線
センチ波ミリ波	1	1.2 - 3.5	H, H ₂ CO, H ₂ CS, OH
	2	3.5 - 12.3	CH, H ₂ CS, SO ₂
	3	12.3 - 20.5	CH ₃ CN, CH ₃ OH, H ₂ CO, H ₂ CS, NH ₃ , SO
	4	20.5 - 34.0	H ₂ CS, HC ₃ N, HNCO, H ₂ CO, H ₂ O, NH ₃ , NHD ₂ , SO
	5	30.5 - 50.5	c-HCCCH, CH ₃ OH, CH ₃ CN, CS, H ₂ CO, HNCO, NHD ₂ , SiO
	6	70.0 - 116	CO, CS, CN, CH ₃ OH, c-HCCCH, CH ₃ CN, HDO, HNCO, HCN, HNC, H ₂ CO, HCO ⁺ , N ₂ H ⁺ , NHD ₂ , N2D ⁺ , SiO, SO ₂ , SO

表1:ngVLAの観測波長帯・周波数帯、および各バンドで観測可能な主要なスペクトル線。

アルマ望遠鏡の技術を活かした国際共同開発

日本はアルマ望遠鏡の建設運用において大きな成功を収め,現在も第一線の天文学研究を推進し ている。装置面においては、12台の7 mアンテナと4台の12 mアンテナからなるアタカマコンパク トアレイを建設し、3種類の受信機バンド(Band 4, 8, 10)を製造した。受信機はアルマ望遠鏡66 台全てのアンテナに搭載されている。ソフト面においては、アタカマコンパクトアレイのためのソ フトウェアを開発し、現在も機能向上のための開発を継続している。ngVLAの建設では、アルマ望 遠鏡で開発したソフトや装置技術を再利用できるとともに、これまでに蓄積された開発ノウハウを 存分に活用できることが期待される。また、運用面においても、ngVLAはアルマ望遠鏡と同様の運 用モデルを想定しており、二つの望遠鏡を統合的に管理できる部分では組織を一体化し、高い生産 性を達成できるものと期待される。

1.2 ngVLAの科学目標

138億年の宇宙の歴史において、いかにしてこの地球上に豊かな生命世界が誕生し得たのか。生 命誕生に至る基本的な環境は、太陽系以外でどの程度普遍的であるのか。宇宙における物質の大循 環の変遷の理解とともに、惑星形成に至る各階層を探究し、多種多様な有機物の起源を辿ること は、これら究極的な問いに答えるために不可欠であり、ngVLAは私達の生命観や宇宙における地球 の価値の把握に大きなインパクトを与えるであろう。

ngVLAの稼働により、以下に挙げる5つの分野において特に大きな進展が期待される。なお、 ngVLAの科学目標の詳細に関しては、3章を参照されたい。

私たちが住む太陽系のような「惑星系」の形成過程の探究

誕生したばかりの「惑星系」はガスや塵でできた円盤を作ることが知られている。その円盤内を 誕生したばかりの若い惑星が通過することにより,円環状の「すき間」ができることをアルマ望遠 鏡が実証した。しかし,円盤の中心付近,特に地球のような岩石惑星が生成される場所では,ガス や塵などの物質が密集しており,これまでの望遠鏡では中心付近の「すき間」の観測が困難であっ た。ngVLAが観測する波長帯では,ガスや塵の密度の高い領域の内部を写し出すことが可能とな り,そこで形成された岩石惑星が作る「すき間」の様子を描き出すことができる。「惑星系」形成 の初期段階の「すき間」の存在と,その特性を精確に捉えることにより,地球のような岩石惑星の 起源,惑星の多様性の理解が大きく前進するであろう。

生命・惑星系・星の誕生の初期条件の探究

ngVLAが観測する波長帯では、星間空間における窒素の重要な存在形態の一つであるアンモニ アをはじめ、さまざまな大型有機分子からの電波を検出することができる。特に、窒素は、DNAを 構成する塩基やアミノ酸に含まれており、生命に深く関係している。これらの分子を、ngVLAの高 い感度と解像度を使って調べ、生命誕生のための初期化学条件、いいかえれば生命の「種」の探究 を行う。

宇宙のベビーブーム期から現在に至る銀河内での物質循環と進化の探究

宇宙における星の形成は今から約100億年前(ビッグバンから約40億年後)の宇宙でピークを迎 え,現在の宇宙まで進化してきたことが知られている。銀河が激しい星形成活動を開始するために は,その材料である冷たい分子ガスが必要である。ngVLAを使って,星の材料となる低温の分子ガ スから放たれる電波を検出し,宇宙誕生後,数十億年から現在に至るまでの星形成の初期条件およ び物質の大循環の変遷を探究する。

銀河系中心領域のパルサーを使った重力理論の検証

強い磁場を持つ中性子星は、回転する時に周期的な電波を放つことが知られている。このよう な天体をパルサーとよぶ。パルサーは極めて正確な信号を放射するが、銀河中心の大質量ブラック ホールの重力場によって信号間隔にズレが起こると考えられている。このズレを測定することで、 重力理論の検証ができるのである。パルサーは、天の川銀河の中心付近にたくさん存在することが 予想されているにも関わらず、これまでの望遠鏡では感度不足のため10個程度しか見つかっていな い。ngVLAを使って新しいパルサーをたくさん発見することにより、パルサーについての理解が深 まるだけでなく、重力理論の検証や星の進化についての知見が得られることが期待される。

ブラックホールの形成・進化とマルチメッセンジャー天文学

宇宙に存在するブラックホールは、太陽と同程度の質量をもつものから、太陽の10億倍の質量 をもつものまで、さまざまな種類が存在する。宇宙の歴史の中で、ブラックホールがどのように形 成・進化してきたかを探るため、ブラックホールに落ち込むガスや放出されるガスの様子、それら が銀河の進化にどのように影響してきたのかをngVLAで探る。また、ブラックホールや中性子星の 合体のような重力波放出を伴う激しい現象の正確な位置をngVLAで特定し、他の観測装置で得られ たデータと比較することにより、そこで起きている現象を詳しく調べることができる。

1.3 ngVLAの科学要求と装置仕様

上述の科学目標を達成するために必要な科学要求が検討され,その科学要求を満たすための装置 仕様が米国コミュニティを中心に時間をかけて丁寧に議論されてきた。科学要求を表1.2に,装置 仕様を表1.3に示す。なお,この表はやや専門的であり,詳細な解説は本冊子のスコープ外である ためここでは省略したい。科学要求と装置仕様を要約すると以下のようにまとめられる。

- ・既存の類似する観測装置よりも10倍以上高い感度を実現すること
- ・1.2-116 GHzの周波数帯域を6つの周波数バンドで観測し、20 GHzの瞬時帯域幅を実現すること
- ・様々な天体現象の観測に対応できるように、多様な観測モードを整備すること
- 低い表面輝度を持つ天体に対して十分な感度で観測するための望遠鏡を実装すること
- ・1000 km以上の基線長を各地に配置することによって、超高解像度撮像を実現すること

以上の装置要求を受け、観測装置の具体的な検討が進んだ。そして、以下に説明するngVLAの概念設計がまとめられたのである。詳細については ngVLA Reference Design Volume 1-3

(https://ngvla.nrao.edu/page/projdoc) を参照されたい。

要求項目	科学要求
周波数帯域	1.2 GHz から116 GHzの大気窓を連続的にカバーすること。これにより、低周波では中性 水素を、高周波では一酸化炭素分子を観測できる。
バンド端	z=0-0.1の天体からの輝線がバンド端に発現しないように,近接したバンド端は1%の重複が あること。
周波数選択	各受信機のIF帯域を余すことなく全て観測できること。バンド間隔は、必要であれば離散的 であってもよい。また、精確な物理診断ができるように、複数輝線の観測においては、全て の輝線が同一バンドで観測できることが望ましい。
モザイク観測, On-the-fly 観測	観測視野よりも広い天域撮像のために、モザイクとOn-the-fly観測を実装すること。このと き、全ての分光性能が利用できると共に、サーベイ速度について定めた要求を満たすこと。
トリガー観測	観測トリガーに即座に対応できること。突発天体に対するトリガータイムは10分を超えては ならない(3分以内が望ましい)。
観測モード	狭帯域(スペクトル線観測)と広帯域(連続波観測)の両方を同時に観測できること。両観 測モードの感度を最大化し、かつフレキシブルに運用することが目標である。
フェイズドアレイ機能	フェイズドアレイ機能を有すること。
ビームフォーミング機能	-つのサブアレイに対し, 複数ビーム(少なくとも10ビーム)が構成できること。複数のサ ブアレイにまたがってもよい。
サブアレイ機能	科学観測およびキャリブレーション観測のために、少なくとも10サブアレイが使えること。 この表に示す全ての観測機能がサブアレイで利用できることが望ましい。
サブアレイの 同時使用	複数のサブアレイが同時に使用できること。また,異なる観測モードが各サブアレイで同時 に使用できること。特に,全帯域幅を使った相互相関,フェイズドアレイ,タイムドメイン 観測が複数のサブアレイで同時にできること。
パルサータイミング機能	単一の視野において, 複数(少なくとも5つ)のパルサー信号を検出できること。1マイクロ 秒の時間分解能を有すること。
タイムドメイン機能	突発天体の検出を目的として、100マイクロ秒(20マイクロ秒が望ましい)のサーチ機能を 有すること。さらに高い時間分解能に将来拡張できるように、インターフェースを整備して おくことが望ましい。
偏波機能	全偏波を観測できること。
太陽観測機能	全周波数帯域において太陽を観測できること。
VLBI 機能	全周波数帯域において,単一のアンテナもしくはフェイズドアレイの出力を用いたVLBI観測 ができること。少なくとも3ビーム分(10ビームが望ましい)のデータ記録装置を実装する こと。
マルチバンド観測	マルチバンド観測または高速バンドスイッチングを実装すること。スイッチング時間は 10-20秒が望ましい。
観測可能赤緯	赤緯-40度から90度を観測できること。
データレイテンシ	トリガー観測における積分時間が1時間以内の場合,観測終了の1時間以内にクイックルック 連続波画像を観測者に提供すること。

表2:Murphy, E. J. et. al. 2020, "ngVLA Science Requirements" Next Generation VLA Document No. 020.10.15.00-0001-B より

要求項目	装置要求		
連続波感度	~0.07 μJy/bm@30 GHz, 0.5 μJy/bm@100 GHz(原始惑星系円盤観測から の要求)		
分光感度	10-50 GHzの周波数帯域において30 µJy/bm/km/sを達成すること。70-116 GHzの周波数帯域において、5-0.1秒角の角度分解能および1-5 km/sの速度分解 能で1-750 mKの分光感度を達成すること。		
空間分解能	30-100 GHzの周波数帯域において, Uniform weightで半値幅5 masの合成ビームが達成できること。		
最大空間スケール	116 GHz以下の周波数帯域において、>20秒角×(116 GHz/v)の空間スケー ルが観測できること。(より厳しい要求として)1分角の空間スケールにおいて、 精度の高い合成画像が得られることが望ましい。		
周波数分解能	速度分解能 < 0.1 km/sを実現すること。広帯域(4 GHz以上)において、この 速度分解能が実現することが望ましい。		
サーベイ速度	10時間の観測において,7平方度の天域を~1 µJy/bm@2.5 GHz,10平方度の 天域を~10 µJy/bm@28 GHzで撮像できること。		
合成ビームの質	合成ビームは、全空間スケールおよび周波数帯域において、最初のサイドローブま で楕円形を保ち、かつビーム効率 > 90%であること。同時に連続波感度の要求を 満たす必要がある。		
画像フィデリティ	数分角から数masの角度分解能において、画像フィデリティ>0.9が得られること。		
スナップショット 画像フィデリティ	>100 mas@20 GHzの角度分解能において,高輝度天体に対して高い画像フィデリティが得られること。		
測光誤差	フラックス密度が精度よく求まっている点源に対して,測光誤差は1%以下である こと。		
相対位置誤差	S/N~100以上の点源観測における位置誤差は、合成ビームの<1%であること。		
タイミング誤差	30分から10年周期のパルサーの観測に対して,タイミング誤差は10 ns以下(1 ns以下が望ましい)であること。		
輝度ダイナミックレンジ	輝度ダイナミックレンジは, > 45 dB @8 GH, >35 dB @27 GHzであること。		
偏波ダイナミックレンジ	偏波ダイナミックレンジは,視野中心において> 35 dB @8 GH,>25 dB @27 GHzであること。		
分光ダイナミックレンジ(放射)	分光ダイナミックレンジ(放射)は >50 dBであること。		
スプリアス規格	16-50 GHzの周波数帯域において,キャリブレーション後のデータでは,0.1 km/sのチャネルに出現するスプリアス強度は~95 μJy/bm以下であること。		
VLB 連続波感度	VLB連続波感度は, < ~0.23 μJy/bm @10 GHzであること。		
VLB 空間分解能	VLB空間分解能は、0.7 mas@10 GHzであること。		
分光ダイナミックレンジ(吸収線)	分光ダイナミックレンジ(吸収線)は>40 dBであること。		

表3:Murphy, E. J. et. al. 2020, "ngVLA Science Requirements" Next Generation VLA Document No. 020.10.15.00-0001-B より。要求項目の定義は, Murphy, E. J. et. al. 2020 1.3章を参照されたい。

1.4 ngVLAの設置場所と観測装置

ngVLAは,複数のアンテナで検出した天体からの電波を記録し,それらを干渉させることで 一つの望遠鏡として動作させる「干渉計」と呼ばれる望遠鏡を建設する計画である。本章では, ngVLAの設置場所と基本構成を紹介する。

設置場所

米国ニューメキシコ州サン・アグスティン平原がngVLAメインアレイ(以下参照)の中心地 として選定されている。ここは、1980年に運用を開始し、現在もなお稼働中のJansky Very Large Arrayのサイトとしてよく知られている場所である。比較的アクセスが良く、平坦な地形が何十km にもわたって広がっており、かつ標高2000 mの高原という電波干渉計観測に大変適した場所であ る。加えて、Jansky Very Large Arrayのインフラをほぼそのまま活用でき、コスト面においても大 きな利点がある。

メインアレイ (Main Array)

ngVLAでは3種類の望遠鏡群(アレイ)が計画されている。その中心的な役割を担うのが、口径 18 mの高精度アンテナ214台で構成される「メインアレイ(Main Array)」(図1.3)。米国ニュー メキシコ州を中心に北米大陸の南西部各地に設置され、その基線長(アンテナ間の距離)は短くて 数十m,最大基線長は1000 kmにも及ぶ(図1.4)。214台のアンテナのうち約45%を半径約1 kmの 範囲内に、約35%を半径1-36 kmの範囲内に、残りの約20%のアンテナを36-1000 kmの範囲に設置 する予定である。では、なぜ様々な長さの基線が必要なのだろう。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していく。つまり、アンテナ間隔を長くすれば長くするほど解像度が向 上し、天体の細かい構造が見えてくるのである。このことから、より多くのアンテナをより遠くに 配置することが望まれるのだが、インフラやメンテナンス、データ転送等の問題があるため、実際 は、何百kmも離れた遠隔地に設置できるアンテナの台数は限定的である。また、ngVLAでは、観 測者が希望する解像度に応じて、実際に観測に使用するアンテナを適宜選択する運用方法(サブア レイ運用)を想定している。このため、運用が続く限り、全てのアンテナは設置した場所に固定さ れ、アルマ望遠鏡のように都度配列を変えることは想定されていない。



図1.3:メインアレイアンテナの想像図(クレジット:NRAO/AUI/NSF)



図1.4.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設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。メインアレイにおいては、東はテキサス州、西はアリゾナ州、南は メキシコまで延びている。対照的に、ショートベースラインアレイは、非常にコンパクトに配置されていることがこの図から わかるであろう。(クレジット:NRAO/AUI/NSF)

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を設置する予定 である。これを「ショートベースラインアレイ (Short Baseline Array)」と呼ぶ。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し、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威力を発揮する。また、18 mアンテナ4台を単一鏡の役割として利用す る予定であり、これを「トータルパワーアレイ (Total Power Array)」と呼ぶ。

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。「ロ ングベースラインアレイ(Long Baseline Array)」と呼び,口径18 mのアンテナ30台を,北米大陸 だけでなくハワイ州やプエルトリコなどの遠隔地に配置する予定である(図1.5)。これにより, 8,860 kmの口径をもつ巨大な電波望遠鏡が実現し,0.0001秒角の解像度が実現する。ちなみに, 8,860 kmは,月の約2.6倍の大きさに相当する。いかに巨大な望遠鏡であるかわかるであろう。



図1.5: ロングベースラインアレイも含めた, ngVLAの全体図。北米大陸だけでなくハワイ州やプエルトリコにもアンテナを設置する予定である。(クレジット:NRAO/AUI/NSF)

ngVLAの受信機と相関器

ngVLAのアンテナには6つの受信機が搭載され,それぞれ違う周波数の電波を観測する。各受信 機が担う周波数範囲については表1を参照されたい。バンド5(30.5-50.5 GHz)と6(70-116 GHz) は、アルマ望遠鏡のバンド1(35-50 GHz)とバンド2(67-116 GHz)の周波数範囲と非常に近く, アルマ望遠鏡で培った経験や知見が活用できるという利点がある。アンテナで集められた電波は, フィードホーンを通り低雑音増幅器で増幅され、必要に応じて扱いやすい周波数に変換される。デ ジタル化した後、光ファイバーを通してデータ結合するための大規模計算機(相関器)に伝送され る。詳しくは5章参照。

観測装置の運用と保守は、米国内に設置された各センターで行われる。メインアレイの中心付近 にメンテナンスセンターが設置され、常駐する技術者によってアンテナや関連装置のメンテナンス が適宜実施される。また、ニューメキシコ州に設置されるアレイ運用修理センターにおいて、故障 したシステムの修理、システム診断、エンジニアリングサポートを行い、ngVLAの運用・管理を行 う予定である。ロングベースラインアレイのアンテナ保守においては、遠隔サポートステーション に技術者が常駐する方法を想定している。

1.5 共同利用に供する観測装置

ngVLAは,共同利用施設としてコミュニティーに観測時間を供する予定である。まず,1年に1 回程度の頻度で世界に広く観測提案が募集され,ngVLAの観測時間を希望する研究者によって観 測提案が提出される。研究者は,科学的意義とともに,要求観測時間や要求解像度などの技術的正 当性を説明した提案書類を締め切り日までに提出することが求められる。なお,アルマ望遠鏡では 「画像の感度」を要求する方法を採用しているが,ngVLAでは「観測時間」を要求する方法を検討 している。提出された観測提案は世界中の研究者によって審査され,科学的メリットと技術的実現 性に基づいたランク付けを経て,観測提案の採否が決定する。採択された提案は,さまざまな条件 (天体の座標,天体の大きさ,要求解像度,気象等)を考慮に入れた観測実行リストに順番に並べ られ,当番観測者によってリスト上位より実行されていく予定である。

ngVLAで取得された観測データは、観測所スタッフによる品質保証、データ較正や画像処理を 経て「科学的整備済データ」(Science Ready Data Product)として観測者に電子的に提供される 予定である。この際、データ較正や画像処理は、自動化されたパイプラインが使用されることとな る。また、提供されたデータは、一定の占有期間後、アーカイブを通じて広く公開され世界中の誰 でも利用できるものとなる。このように、品質が保証された画像データを提供することで、電波 干渉計の専門家だけでなく、幅広い科学者コミュニティをサポートし、多波長・マルチメッセン ジャー天文学を促進することが可能となる。また、パイプラインでは処理できない特殊な観測モー ドにおいても、科学的な目標が十分に達成されると判断された場合には、観測所が適宜サポートす る予定である。

科学運用センターおよびデータセンターは、米国の大都市圏に設置され、科学運用およびデータ アーカイブの運用、ユーザーからの問い合わせ対応等の拠点となる予定である。また、研究開発活 動は、必要に応じてこれらのセンターにおいて行われる。

1.6 Square Kilometer Array-1 (SKA1)との関係

ngVLAと並行して計画が進捗している大型の電波干渉計として, Square Kilometer Array-1 (SKA1)がある。SKA1は、オーストラリアをサイトとし50-350 MHzを観測するSKA1-lowと、南 アフリカ共和国をサイトとし350 MHz-15.3 GHzを観測するSKA1-midから構成される。

ngVLAは「個々の天体をみる」望遠鏡としての性格が顕著であるのに対し,SKA1は「広く場を みる」望遠鏡としての性格に特徴がある。SKA1にはないngVLAの特徴としては,20 GHz帯以上の 周波数を幅広く観測できる点と,10ミリ秒角スケール以下の高い解像度の達成が挙げられる。20 GHz帯以上の周波数帯では、ダスト熱放射や様々な分子の回転遷移を捉えられ、それに対応して対 象天体・テーマが広がる。それに対しSKA1は、より低い周波数帯で観測される非熱的世界や超遠 方の輻射場を探索するのに威力を発揮し、ngVLAと相補性がある。またタイムドメイン天文学を推 進する観点からは、天体の明るさの変化を測る観測(測光観測)の面ではSKA1と天域を分ける相 補性がある。さらに,ngVLA ロングベースラインアレイが提供する高い解像度での撮像観測は, その構造の時間変化まで捉えられるというユニークな特徴がある。

1.7 米国における検討状況

運用開始から40年が経過するJansky Very Large Array。今もなお多くの科学成果を創出し続け ている一方、科学的機能の限界も明らかになってきた。そうしたなか、米国の科学コミュニティ 内においても次世代の低周波干渉計装置の要望が高まり、新たな観測装置の実現可能性と科学的 意義についての議論が2015年頃より始まった。次世代の装置に要求される科学機能や関連技術の 検討のキックオフとして、2015年4月「ngVLA Technical Workshop」が開催された。翌2016年, NRAOにngVLA project officeが設置されると共に、世界の関連研究者によって構成される科学諮 問評議会(「ngVLA Science Advisory Council」)が設置され、ngVLAの科学検討が本格的にス タートした。なお、2021年現在、科学諮問評議会には日本の大学・研究機関に所属する研究者3名 が参加している。2017年には,技術諮問評議会(「ngVLA Technical Advisory Council」)が設立 され,JVLAやアルマ望遠鏡の建設経験を踏まえた技術検討が加速した。技術諮問評議会において も国立天文台の研究者2名が参加している。また、科学検討グループやワークショップでの議論を 経て, ngVLA Key Science Goals MemoおよびReference Design MemoがNRAOのウェブサイトに 掲載された。2018年6月には、科学ワークショップ(「Astrophysical Frontiers in the Next Decade and Beyond: Planets, Galaxies, Black Holes, & Transient Universe」) が米国ポートランドで開催 された。そして、科学検討の集大成として、285名以上の著者によって執筆された合計850ページ (90章)の冊子 ngVLA Science Bookが出版された。これを受け,翌2019年に開催された科学ワー クショップ(「Radio/Millimeter Astrophysical Frontiers in the Next Decade」)には米国にとどま らず、世界各国の参加者が米国シャーロッツビルに集結し、深遠な科学議論が展開された。また、 科学要求を満たすための装置仕様をまとめた Reference System Designが同年公開された。2020年 -2021年には、COVID-19感染拡大による制限が広がる中、オンライン形式のワークショップや一般 向けの講演会が開催された。 図1.6にこれまでのイベントの概要をまとめた。



図1.6: 日米におけるタイムライン

1.8日本の参画に向けての活動と今後の展望

NRAOは、ngVLA計画の確実な実現へ向け、建設費用の約25%の分担を米国外に求めており、現 在国際パートナーを募集中である。ngVLAの観測時間は、建設貢献に応じて配分される見込みであ るため、建設の早期から実質的な貢献を果たしていくことが望まれる。現在までに日本のほか、カ ナダやメキシコの研究チームが参画を検討している段階である。特に、日本はアルマ望遠鏡の建設 運用を通じてNRAOと強力な信頼関係を構築しており、プロジェクトの発案当初から有力なパート ナー候補として期待されている。

ここで、日本の参画に向けての過去の活動を振り返りたい。2019年4月、ngVLA検討グループが 国立天文台に発足し、日本の参画に向けての検討やngVLAの科学的・技術的検討を本格的に開始し た。また、2019年9月には、ngVLAとして初の国際研究会となる「ngVLA Workshop」を国立天文 台三鷹キャンパスにて開催し、NRAOのngVLAプロジェクトメンバー3名を含む合計約100名の参加 があった。太陽系天体、原始惑星系円盤、星形成と星間化学、銀河や高エネルギー現象、遠方銀河 などの分野から合計38件の講演があり、日本の得意分野における日本独自のサイエンスケースも認 められた。

2020年4月,国立天文台とNRAOとの間で科学および技術協力のための協定を締結した。この協 定はngVLAの建設に向けた初期検討を対象としており,今後の強力な協力体制の維持が確認され た。この協定に基づき,望遠鏡,受信機,冷却システム,マイクロ波フォトニクスなどの技術設計 について,今後の貢献や共同研究のための具体的な議論が活発に行われている。

また、同じく2020年には、日本のコミュニティーにおけるngVLAの科学目標を策定し、ngVLA で実現する2030年代の科学研究を検討することを目的として、以下の5つのサイエンスワーキング

グループが国内の研究者を中心に結成された(1. 惑星形成と惑星系円盤, 2. 様々な天体階層にお ける星形成と星間化学, 3. 宇宙史の中での銀河進化, 4. 銀河中心パルサーを用いた重力理論の検証, 5. ブラックホールの形成・進化とタイムドメイン・マルチメッセンジャー天文学)。2020年度内 に, それぞれのワーキンググループが複数回の会合を開催し議論を深めていった。合計14回, 延べ 650名が会合に参加した。そして, 2021年3月, ワーキンググループの成果として29編の英文記事 がngVLA-J memo としてngVLA-J ウェブサイトに公開され(表1.4), 日本におけるngVLAの科学 的な検討が大きく前進した。また, 2021年3月の日本天文学会春季年会においては, 「次世代Very Large Array (ngVLA) で切り拓く新しい天文学の地平」がオンラインで開催され,約160名の参加 者があった。合計22名の研究者がngVLAの科学的展望について発表し,近傍宇宙の観測から宇宙初 期の銀河までの幅広い分野における講演と議論が展開された。

技術面においては、3Dプリンターを用いた35-50 GHz帯のコルゲートホーンの試作および検証、 67-116 GHz帯における一体型のコルゲートホーン・transition・OMTを製造し詳細検証を行った。 また、アルマ望遠鏡 Band 2のOMTデザインを基にngVLA Band 3-6のOMTデザインを行った。 フォトニクスの分野においては、100 GHzの信号を100 kmファイバーの伝送に成功するなどの成果 をあげている(詳しくは5章参照)。また、概念設計審査会(2022年2月)や基本設計審査会(2023 年2月)に向けたシステムの技術要件の策定にも取り組んでいる。さらに、アンテナや単一鏡観測 モードなどの仕様策定に向けた議論にも日本の研究者が参加している。

将来の展望についても述べておこう。今後米国では大規模な予算要求に進み,その後2028年の初 期科学運用に向けて建設が開始される予定である。並行して、日本国内の活動も加速していく。科 学的な検討を引き続き強化していくことはもちろんのこと、技術的な検討や検証実験にも本格的に 着手していく予定である。建設期においては、国立天文台から以下の技術的貢献が考えられる(詳 しくは5章参照)。(1)ショートベースラインアレイ,ロングベースラインアレイ 及びトータル パワーアレイを構成するアンテナの設計や製造, (2)広帯域な光学系の設計と 3D プリンターな どの独自手法を用いた安価で性能も安定した光学部品の大量生産,(3)フロントエンド製造や, 高精度な周波数標準の分配への貢献。アンテナや受信機等は国立天文台と産業界の連携の中で製 造され、アンテナの指向精度や熱変形などの仕様検証試験が実施される予定である。また、量産 された受信機等の構成要素は、アレイ統合検証(Array Integration and Verification)を経てアンテ ナに搭載され、システム全体としての検証を行うこととなる。その後、科学較正検証(Calibration and Science Verification)において、実際に天体に向けた観測試験を行い、較正精度や位置精度の 確認、画像の再現性等を検証することになるだろう。アレイ統合検証および科学較正検証、特に、 ショートベースラインアレイの一部として想定される単一鏡観測, 100 km を超える超長基線観測 の科学較正検証においては、日本がアルマ望遠鏡の建設運用で培った経験がおおいに役立つことが 期待される。また,ソフト面においても,アルマ望遠鏡アタカマコンパクトアレイのソフト開発を 主導した経験から、ショートベースラインアレイのソフト開発が建設貢献の候補として考えられる だろう。並行して、国内における共同利用サポート体制の構築も進めていく予定である。国立天文 台三鷹キャンパスを国内共同利用サービスの拠点と想定した場合、アルマ望遠鏡の運用で構築した インフラ、計算機環境資産やサポート経験、および人材を最大限活用することが合理的であると考 えられる。

ngVLA計画は,日本学術会議 第24期学術の大型研究計画に関するマスタープラン(通称:マス タープラン2020)において学術大型研究計画(区分I)として掲載され,その学術的意義や社会的 価値が広く共有された。一方,本計画にメジャーパートナーとして参加し建設運用に貢献するため には,日本の研究者コミュニティからの強い支持を獲得し,日本学術会議 第25期学術の大型研究 計画に関するマスタープランにおいて重点大型研究計画として掲載されることが極めて重要であ る。

Unveiling the Formation of Solar System Analogues on Terrestrial Scales				
Hydrogen Radio Recombination Lines from Accreting Planets	Hashimoto, J.			
Possibility of giant planet formation by pebble accretion in Class 0/I phases	Tanaka, Y.			
Ring Structures by Coagulation of Dust Aggregates in Protostellar Disks observed by ngVLA	Ohashi, S.			
Substructures in the Protostellar Phase: Connection to Planet Formation	Nakatani, R.			
Grain Growth Probed by ngVLA Polarimetric Observations	Ueda. T.			
Thermal Tomography of the Inner Regions of Protoplanetary Disks with the ngVLA and ALMA	Okuzumi, S.			
Observations of Circumplanetary Disks with ngVLA	Hu, B.			
Prospects of High Spatial Resolution Observations with ngVLA	Muto, T.			
Probing the Initial Conditions for Planetary Systems and Life with Astrochemistry				
The Hot and Dynamic Birth of Massive Stars from the ngVLA Perspective	Tanaka,K.			
Towards a comprehensive understanding of molecular cloud life cycle based on HI observations with the ngVLA	Kobayashi, M.			
Carbon-Chain Chemistry around Massive Young Stellar Objects - Revealing the Origins of Chemical Diversity -	Taniguchi, K.			
Chemical Diversity in Young Protoplanetary Disk	Sakai, N.			
Investigating the impact of X-rays on the molecular abundances of inner envelopes and disks around low-mass protostars with ngVLA	Notsu, S.			
Observing the NH3 snowline in protoplanetary disks with ngVLA	Furuya, K.			
Charting the Assembly, Structure, and Evolution of Galaxies Over Cosmic Time				
Constraining the Nature of Superluminous Supernovae and their Host Galaxies with ngVLA	Hatsukade, B.			
Cold Molecular Gas Halo at z \sim 6 with ngVLA	Fujimoto, S.			
Unveiling Dusty Starbursts by ngVLA Observations of Radio Recombination Lines	Michiyama, T.			
Characterizing the physical conditions of cold/warm gas in submillimeter bright galaxies at $z > 3$	Tadaki, K.			
Obscured Growth of Super Massive Black Holes at the Earliest Universe	Izumi, T.			
Mapping NH3 in nearby U/LIRGs using the ngVLA	Ueda, J.			

Understanding the Formation and Evolution of Stellar and Supermassive BH's in the Era of Multi-Messenger Astronomy				
Understanding the mass growth of supermassive black holes in the universe	Imanishi, M.			
Hunting for wandering massive black holes with ngVLA	Inayoshi, K.			
ngVLA will spatially pin-down mBHs and jets in optically-faint radio-loud galaxies	lchikawa, K.			
Searching for intermediate-mass black holes in the Central Molecular Zone of our Galaxy	Takekawa, S.			
GRB and Transient Sciences	Urata, Y.			
Observing Relativistic Jets in Active Galactic Nuclei with ngVLA	Hada, K.			
Multiphase Gas Morphology and Dynamics in the Circumnuclear Region	Sawada-Satoh, S.			
Resolving the Parsec-scale Feeding and Feedback Flows of Ionized Gas around Active Galactic Nuclei	Izumi, T.			
Stellar Physics and the Sun				
Stellar Atmosphere and Magnetism Observing with the ngVLA	Shimojo, M.			

表1.4: ngVLA-J memo series. https://ngvla.nao.ac.jp/researcher/memo/.



Selina et al. 2019, ngVLA System Reference Design 020.10.20.00.00-0001-REP-B



第2章 科学的背景

近年の観測天文学の進展は、宇宙開闢の痕跡から近傍の惑星形成領域の詳細構造 に至るまで、様々な新たな情報をもたらしている。それらを基盤として我々は、こ の宇宙が辿ってきた歴史をさらに深く理解するだけでなく、生命誕生に至る過程や その必要条件の探究をも視野に入れた学際的研究へと踏み出そうとしている。この ような中でngVLAはどのような役割を果たしうるのかを、我々自身がngVLA実現 に取り組むべき必然性も含めて概観する。



2.1 現代天文学が確立した宇宙像と人類の立ち位置

宇宙は、高温・高密度な状態から膨張を始める「ビックバン」により幕を開けた。現時点で観測 的に遡ることができる宇宙最古の姿を反映するのは、宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background:CMB)である。21世紀に打ち上げられた2つのCMB観測衛星であるWilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)及びPlanck衛星は、天体の「種」となる密度揺らぎに対応 するパターンをCMBの中に明瞭に捉えた。その後の地上観測データも含めた解析により、ビック バンは約138億年前に起こったと推定されている(Planck Collaboration 2018, Choi et al. 2020)。

宇宙は膨張を続けたが、ある時点から星形成が始まり、多様性に満ちた世界を作る材料となる 重元素が合成された。アルマ望遠鏡による観測研究により、宇宙初期の星形成活動は少なくとも ビッグバンから3億年以内(赤方偏移量z≥14)にまで遡ることが示唆されている(Mawatari et al. 2020)。鉄より軽い元素が恒星内部で合成されることはかねてから知られていたが、それより 重い元素が中性子星連星の合体によって合成されることが判明した点は、つい最近の画期的成果 である。これは重力波検出に引き続いて行われた電磁波観測によって明らかになったものであり (Utsumi et al. 2017, Tanaka et al. 2017)、電磁波以外の手段も含めた天文学(マルチメッセン ジャー天文学)の嚆矢と位置付けられるだろう。

誕生した星々はお互いの万有引力によって結びついた集団(銀河)を作る。この銀河進化の全貌 を知ろうとする観測的努力も続けられている。宇宙史における星形成の活発さは、今から約100億 年前(z≈2)にピークを迎え、その後は徐々に減衰していることがわかってきているが(Madau & Dickinson 2014),これが銀河の形態を含む性質とどう関連しているかを理解することが一つの課 題である。また、太陽系が含まれる天の川銀河をはじめ、近傍宇宙にある銀河の中心核には超大質 量ブラックホールが存在するが、これが銀河進化の中でどのような役割を果たしてきたかについて も、活発な論争が続いている(Kormendy & Ho 2013)。

重元素が供給された後の星間物質からは第二世代以降の星々が誕生し、さらに地球をはじめ とする岩石惑星も作られた。恒星周囲に初めて系外惑星が発見された1995年以降、その探索は進 み、2021年8月現在で4800個を超える系外惑星の存在が確認されている。近傍の若い星の周りに は惑星系の母胎とみられる円盤(原始惑星系円盤)が遍く存在していることが明らかになり、さら に最近のアルマ望遠鏡による観測では、その中で惑星が誕生している兆候も捉えられ始めている (Andrews et al. 2018)。一方で星・惑星形成の場である分子雲中には、C(炭素)、N(窒素)、O (酸素)といった重元素を含む分子が多数確認されており、それらが原始惑星系円盤へと持ち込ま れていく様子も捉えられている(Jorgensen et al. 2012)。

2.2 ngVLAが捉える宇宙

このように現代の観測天文学は、天体形成、及び物質進化の両面から、宇宙開闢から生命の発現 に至るまでを記述する壮大な枠組みを提示しつつある。ngVLAは、他波長の電磁波望遠鏡はもちろ ん、非電磁波的手段(重力波や粒子線)による天体観測、さらには隣接分野の研究とも協調して、 この理解を飛躍的に深める。ngVLAはあらゆる手段の中で最高レベルの解像度を達成し、天体構造 <u>の核心部を攻め</u>る、天体構造の核心部に攻める。その詳細は第3章で述べるが、ここでは宇宙の時 1 Exoplanet.eu; http://exoplanet.eu 間の流れに沿って、すなわち遠いところから近くに向かって、その様子を概観する。

まず遠方宇宙からは、星の材料となる低温分子ガスや誕生直後の星からの紫外線によって電離さ れたガスからの放射が、赤方偏移して地球に到達する。ngVLAはアルマ望遠鏡より長い波長帯をカ バーすることにより、アルマ望遠鏡よりさらに遠方にある銀河からの放射を検出し、銀河スケール での星形成史の全貌を明らかにする。また、2030年代に感度を大幅に向上させる見込みの重力波望 遠鏡とも協調しながら、2017年のイベントよりも遥かに遠方で起こる重力波イベントに対するフォ ローアップ観測を行い、銀河進化にとって決定的役割を果たしうる超巨大ブラックホールの形成過 程や、重元素合成の歴史を明らかにする。

一方,近傍宇宙では,生命発現の必要条件とも密接に関わる様々な対象を調べる。近傍星形成 領域に存在する多数の原始惑星円盤に対し,岩石惑星領域にまで踏み込んで形成途上の惑星を直接 捉える。アルマ望遠鏡では物質分布が見通せないほどの高密度領域,具体的には円盤内域や星形成 初期段階にある円盤に対する観測に,ngVLAは大きな威力を発揮する。一方,物質科学の観点か らは,より大きな分子からの放射の検出が可能になる。特に生命関連物質に特徴的な窒素原子を含 む有機分子が,卓越した感度も相まって数多く検出されるはずである。これらは,系外惑星の形成 過程を明らかにするとともに,「どれくらい複雑な材料が星間空間で用意され,それらがどう惑星 形成領域に届けられるのか」という,生命発現のための条件を考える上で必須の情報を,隣接分野 (惑星科学や宇宙生命研究)へと提供する役割を果たす。

2.3 我が国がngVLAの実現に向けて取り組む必然性

ngVLAへの参画は、以下の3点から、我が国の電波天文分野の経験と実績で得られた強みを最大限発揮できる計画である。

第一に科学面でのアルマ望遠鏡との高い親和性が挙げられる。アルマ望遠鏡と共通する様々な対 象に対し、アルマ望遠鏡とは相補的な情報を得ることで、アルマ望遠鏡単独では得られない質的に 異なる理解が導かれる。また、ngVLAはアルマ望遠鏡と共通の共同利用モデルを持っており、ユー ザーにとっても運用者にとっても、アルマ望遠鏡で蓄積されたノウハウを最大限活用することがで きる。

第二に、アルマ望遠鏡の建設及び開発を通じて培われた技術を土台に、ngVLA実現に対して他 国では真似ができない貢献が可能である。具体的には、受信機のデザインと製造、時間周波数標準 信号の分配のほか、メインアレイ以外のアンテナ製造や冷凍機系、コミッショニングやソフトウェ ア開発などが挙げられる。

最後に、伝統的に我々が注力してきた周波数帯を観測する点が挙げられる。ngVLAは、野辺山 45 m電波望遠鏡はもちろん、名古屋大学で運用されてきた4 m望遠鏡やNANTEN、さらには超長基 線干渉法(VLBI)で利用されるアンテナが稼働する周波数帯における次世代装置である。これら で得られた成果を土台に、独自性の高いサイエンスケースが多数考案されている。また、この周波 数帯は日本からも観測可能であるため、国内の派生プロジェクト立案へとつなげていくことも期待 される。ngVLAのためにコミュニティが一体となって行う技術開発を通じて、国内での観測活動の 一層の発展とそこでの人材育成に、大きな波及効果が期待できる。

参考文献

Andrews et al. 2018, ApJ 869, L41 Choi et al. 2020, JCAP 12, 045 Jorgensen et al. 2012, ApJ 757, L4 Kormendy & Ho 2013, ARAA 51, 511 Madau & Dickinson 2014, ARAA 52,415 Mawatari et al. 2020, ApJ 889, 137 Planck Collaboration 2018, A&A 641, A1 Tanaka et al. 2017, PASJ 69, 102 Utsumi et al. 2017, PASJ 69, 101



第3章 ngVLAの科学的展望

ngVLAは, 波長2.6 mmから25 cmの範囲をカバーする汎用型の電波望遠鏡であ る。この波長帯には,非常に幅広い観測対象が含まれる。短波長側では熱的な電波 放射によって恒星の材料となる低温の星間物質が近傍宇宙・遠方宇宙を問わず捉え られるのに対し,長波長側では非熱的な電波放射によって様々な天体が示す活動的 現象が捉えられる。これらをngVLAが実現する極めて高い解像度・高い感度で撮 像することにより,放射領域の核心部を,その時間変化も含めて研究することが可 能となる。ここでは主要目標が設定されている5つの領域を中心に,ngVLAが切り 開くサイエンスを,同時代に稼働していると期待される他の大型装置との協調や隣 接分野への波及効果を含めて展望する。



3.1 惑星形成と惑星系円盤:アルマ望遠鏡のさらに先へ

3.1.1 形成途上の惑星を捉える

アルマ望遠鏡が捉えた惑星系円盤の詳細構造

若い星には,ガスと固体微粒子(ダスト)からなる星周円盤が普遍的に付随する。これらの円盤 は惑星形成の舞台であると考えられており,原始惑星系円盤と呼ばれる。

アルマ望遠鏡による高い解像度での観測により,ダスト量の濃淡に対応するとみられる同心円状 の明暗パターン(リング・ギャップ構造)が,非常に多くの円盤内に存在することが明らかになっ た(Andrews et al. 2019)。図3.1.1(左)は、原始星段階に近い若い星 HL Tauの例である(ALMA Partnership et al. 2015)。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寄せ(e.g., Kanagawa et al. 2015)や、次節で詳しく議論するスノーラインの 近傍で生じるダスト粒径の急激な変化に伴うダスト滞留(e.g., Okuzumi et al. 2016),ダストとガ スからなる二相流体中で起こる永年不安定(Takahashi & Inutsuka 2014)など、様々な機構が提案 されている。それぞれの円盤においてどの機構が働いているのかを決定するためにはさらに研究が 必要であるが、そのいずれの機構も、惑星存在の間接証拠、もしく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が重要である。

一方,アルマ望遠鏡以前に受け入れられていた理論的枠組みによれば,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。これを踏まえ 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あたる原始星段階でもみ られた点は特に注目に値する。すなわち,惑星形成理論でこれまで考えられていた以上に早い進化 段階から,惑星形成が進んでいることが強く示唆される。

2020年代には、惑星存在のより直接的な証拠が次々と得られる可能性が高い。すでに、惑星表 面への降着流により加熱された領域から放たれた赤外線源が確認されているPDS70では、サブミリ 波ダスト熱放射でも周惑星円盤とみられる放射源がアルマ望遠鏡によって見出されている(図3.1.1 右、Benisty et al. 2021)。また、ガス放射によって得られる円盤速度情報の中には、惑星の摂動に 伴う中心星を周る公転運動からの逸脱や、「子午線流」と呼ばれる円盤上空から円盤中心面にある 形成途上の惑星へと降り注ぐガスの流れによるものなど、特徴的な速度パターンの検出も主張され 始めている(Pinte et al. 2018; Teague et al. 2019)。このような事例は今後さらに増えるだろう。



図3.1.1:(左) ALMAが捉えたHL Tauに付随する円盤からの波長1 mmでのダスト熱放射(ALMA Partnership et al. 2015)。(右) ALMAが捉えたPDS70に付随する円盤からの波長0.86 mmでのダスト熱放射(Benisty et al. 2021)。 Credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)。

ngVLAが明らかにする岩石惑星の形成現場

このようにアルマ望遠鏡が最も威力を発揮する波長2 mm以下においては、円盤の低密度領域を 高い感度で探索できる。しかしその反面、中心星のごく近傍や原始星に付随する形成初期の円盤な どの高密度領域は輻射に対して不透明になっているため、円盤中心面を見通せない限界もある。 ngVLAは、ダスト不透明度が低下する波長帯での観測によって高密度領域に対しても円盤物質分 布を全て見通し、かつ、アルマ望遠鏡より一桁高い解像度で惑星形成に伴う円盤の微小構造を捉え る。具体的には、波長2.6 mmから10 mmにおいて、最近傍の星形成領域であるおうし座分子雲(距 離140 pc)で約0.5 au、より多くの円盤が存在するオリオン巨大分子雲(距離約400 pc)でも約1.5 auの解像度を実現し、ダストの質量分布を明らかにする。これらは、太陽系の岩石惑星が存在して いる領域を空間分解することに相当する。さらに惑星が存在する場合は、その公転運動に追随した 構造の時間変化も直接確認できるはずである。これは惑星存在の決定的証拠となる他、惑星移動と も関連が深い円盤・惑星相互作用の理解にも貢献するだろう(図3.1.2)。以上を通じてngVLAは、 岩石惑星を含む惑星形成過程の理解、及び、系外惑星が示す統計的性質の起源の理解を、飛躍的に 高めるものと期待される。



図3.1.2:ngVLAによる距離140 pcの惑星を持つ原始惑星系円盤に対する100 GHzダスト連続波イメージングシミュレーション。ビームサイズは5ミリ秒角。(左)木星質量の惑星が5 auにある場合,(中)10地球質量の惑星が5 auにある場合,(右)30地球質量の惑星が2.5 auにある場合(図はMurphy et al. 2018; 元はRicci et al. 2018)。

2030年代は、可視・赤外線領域における超大型地上望遠鏡や宇宙望遠鏡により、系外惑星の探 索が大幅に進むはずである。ngVLAはアルマ望遠鏡と相補的に異なる円盤領域での惑星の形成過程 を捉え、惑星系の起源を明らかにする。特に、深く埋れた状態にある原始星期の円盤については、 ngVLAが随一の観測装置となる。

3.1.2 円盤温度構造とスノーライン

スノーラインの重要性

星形成領域である分子雲の温度は典型的に10-30 Kであり、そこでのダスト粒子には、シリケイ トや炭素系化合物のような難揮発性物質だけではなく、様々な揮発性物質の固体成分、すなわち氷 が含まれる。円盤におけるダスト温度は、中心星からの輻射及び円盤物質の降着エネルギー解放に よる加熱効率とダスト自身の熱放射による冷却効率とが釣り合う熱平衡で決まり、中心星や円盤表 面に近い場所ほど高くなる。そのため、あらゆる物質が昇華してダストが完全に消滅するダスト円 盤内縁とは別に、特定の氷成分が昇華して気相へと放出される境界面が円盤内に存在する。これを スノーラインと呼ぶ。

古典的な太陽系起源論(Hayashi 1981)では,水のスノーラインが岩石惑星と巨大ガス惑星の形 成領域を分ける境界の役割を担った。これは,スノーラインの外側では水氷が固相(ダスト)に加 わるために固体面密度が内側より4倍以上高くなり,惑星の芯となる固体コアがガスを大量捕獲す る臨界質量を超えるだけの十分な材料を提供した,と考えたからである。

このように,惑星系の基本骨格を決める要因となりうるスノーラインであるが,その位置を理論 的考察だけから決定するのは難しい。Hayashi (1981) は中心星との輻射平衡下にある黒体温度を 参考に円盤温度構造を仮定したため,スノーラインの位置が円筒座標系の半径だけで決まるという 非現実的な設定となっていた。ダスト円盤は中心星輻射に対して不透明であるため,実際の円盤温 度は半径に加えて中心面からの距離にも依存する。さらにもう一つの加熱源である降着機構にも未 知な部分があるため,それが温度構造に与える影響にも不確定性が残る (Mori et al. 2019) 。むし ろ,観測によって円盤内の温度構造やスノーラインの位置を確定させた後に,数ある理論的考察の 中で実際に起こっている状況を決定していくべきであると言える。

アルマ望遠鏡からngVLAへ、そして太陽系との比較へ

これまでアルマ望遠鏡は、一酸化炭素(CO)のスノーライン検出で成果を挙げてきた。 HD163296に付随する円盤のCOガス観測では、COが凍結した中心面より上層にある手前側と向こ う側のガス成分を空間分解した状況で説明できる放射分布が得られ、これらの「影」としてCO凍 結領域が捉えられた(Gregorio-Monsalvo et al. 2013)。またTW Hyaでは、気相ではCOと共存し にくい化学的性質を持つN₂H⁺の輝線分布との反相関から、やはりCO凍結領域が特定された(Qi et al. 2013)。一方、水のスノーラインを直接検出した例はないが、一時的に高い降着活動を示す FU Ori型星の一つであるV883 Oriに付随するダスト円盤構造にその兆候がみられるとの議論がある (Cieza et al. 2016)。具体的には、水スノーラインの内側でダスト柱密度が不連続に高くなる段差 を捉えたというものである。円盤内のダストはガス抵抗によって中心へと落下中であるが、スノー ラインを横切ると水氷の昇華に伴う粒径の減少によりこの落下スピードが低下するはずである。こ れで生じるダストの渋滞が、段差の起源だという主張である。

ngVLAが実現する高い解像度, さらに円盤の高柱密度領域でさえ見通してダスト連続波を捉 える点は,水のスノーラインに付随するダスト柱密度の段差を検出する上でも威力を発揮する (Okuzumi et al. 2021)。図3.1.3は,半径2.7 auに水のスノーラインをもつモデル円盤が距離140 pcにある場合を想定したイメージング・シミュレーションである。ngVLAが実現する1 auを切る解 像度は,スノーラインに伴うダスト柱密度の段差を鮮明に捉える。さらにアルマ望遠鏡で得られる 高周波数イメージとも比較しながら,円盤温度構造と柱密度分布を完全に切り分けて導出すること も可能とする。

¹ 慣習に従い「スノーライン」と呼ぶが、円盤には厚みがあるため、本来は3次元空間の中にある境界面である。



図3.1.3:ngVLAによる距離140 pcの原始惑星系円盤に対する93 GHzダスト連続波イメージングシミュレーション。ス ノーラインが2.7 auにあり、それに伴い柱密度の段差がある設定。ビームサイズは4ミリ秒角で0.56 auに相当する。左 側がモデル円盤の輝度の天球面上での分布(上)と動径分布(下)、右側が4時間ngVLAで観測をした場合に得られると想 定されるイメージ(上)とその輝度分布。

スノーラインの位置,あるいは円盤温度構造を決める上で,ngVLAにとってもう一つ特徴的な 手段となるのが、23 GHzにあるアンモニア (NH₃)の反転遷移である。氷の状態にあるNH₃は水 と同様に分子間に水素結合が働き、そのスノーラインの位置は水のスノーラインの位置推定にも手 がかりを与える。さらに、複数の異なる回転準位に対する反転遷移が23 GHz付近に隣接している ことから、それらの強度比がガス温度の良い指標を与える。降着円盤の進化を考慮したモデル計算 によると、ngVLAは太陽質量程度の星に付随する円盤からのNH₃輝線を検出するのは難しいとみら れる一方、2 M_☉のHerbig Ae型星に付随する円盤からの輝線は簡単に検出できそうなことが示され ている(図3.1.4、Furuya et al. 2021)。



図3.1.4: (左) 2太陽質量のHerbig Ae型星に付随するモデル円盤のNH₃ (5,5) 反転遷移の輝度分布を0.1"ビームで観 測したときに得られると期待される輝度分布。(右) 同じ円盤を全体で積分したときに得られるNH₃ (1,1) スペクトル(青) とNH₃ (5,5) スペクトル(赤) (Furuya et al. 2021)。

これら円盤温度構造やスノーラインの場所の導出は,系外惑星の配置の起源を考える際だけで なく,太陽系探査で得られた結果の解釈に対しても重要な情報を与える。近年の探査機ミッショ ンにより,チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星や準惑星ケレスにおいて,アンモニウム塩やアンモ ニア化層状ケイ酸塩が含まれていることが明らかになった(Altwegg et al. 2020, De Sanctis et al. 2015)。これらの結果は、この二つの天体の形成場所がアンモニアのスノーラインより外側である ことを示す。しかし探査機で得られる情報だけでは、それが「どの年代の、円盤中のどの場所にあ たるのか」という疑問には答えられない。より深い理解を得るためには、観測によって得られる円 盤温度構造とその進化に関する理論とも比較しながら、年代と場所を同時に制約していく必要があ る。ngVLAは観測手段としてその一翼を担い、2030年代に発展すると見込まれる探査を含む太陽系 内科学との相乗効果を発揮するだろう。

3.1.3 円盤ダスト放射の精密測定とダスト粒径の推定

円盤内ダスト粒径の観測的決定

一般的な星間物質に含まれているダストの典型的粒径は0.1 µmのオーダーである。一方,岩石惑 星の一つである地球の直径は約13,000 kmであり,両者のサイズには14桁の違いがある。原始惑星 系円盤内で起こると考えられるダストの成長は,この違いを乗り越える惑星形成において最も基本 的な素過程であり,その理解へと導く円盤内ダストの粒径に関する情報の取得は,円盤観測の大き な課題の一つである。

ダスト光学特性を支配している要素の一つは、ダストの粒径(a)と観測波長(λ)の比であ る。星間ダストを電波で観測する場合はa $\ll \lambda$ である。この条件が満たされる場合、ダスト吸収効 率の波長依存性を表すべき指数 β (ただし吸収効率が $\lambda^{-\beta}$ に比例する)は $\beta \approx 2$ であり、かつ、その 散乱効率は吸収効率に比べて圧倒的に小さい。ところが円盤内ではダストが成長しa $\geq \lambda$ を満たす ものも存在すると考えられ、そのときの β はより小さな値($\beta \leq 1$)を取る。実際、アルマ望遠鏡 以前の円盤観測では、ミリ波・サブミリ波帯における小さな β が、円盤内ダストの成長を示す間接 的証拠であると考えられてきた。

アルマ望遠鏡による円盤観測、及び、それと並行して進んだダスト粒子の光学特性に関する理
論研究の進展は、ダスト粒径に関する議論を大幅に前進させている。とりわけ大きな原動力になっ ているのが、円盤ダスト熱放射に含まれる偏光の検出と、それと並行して提唱されたダストの自己 散乱による偏光発生機構に関する理論研究である。アルマ望遠鏡は、ダスト熱放射場の異方性に よって生じる散乱偏光でよく説明される結果を次々ともたらしている(図3.1.5, Kataoka et al. 2016; Kataoka et al. 2017)。ここで重要なのは、散乱効率が高くなるのが非常に狭い波長範囲、具体的 には $\lambda \approx 2\pi a c$ 満たす近傍に限られる、という点である。このことから逆に、散乱の効果が顕著な 波長 λ を特定することによりダスト粒径を強く制限する新たな手法が開拓された(Kataoka et al. 2015)。



図3.1.5: (左) 若い星HD142527に付随する円盤で得られた波長0.87 mmでのダスト連続波偏光強度マップ (カラー) 及び直線偏光の向き (白線, Kataoka et al. 2016)。 (右) 異方性のあるダスト熱放射場における散乱によって直線偏光 が生じる仕組みの概念図。 Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

散乱の効果は、βの解釈にも重要な示唆を与える。吸収だけが寄与する場合と異なり、散乱が 大きく寄与する波長付近で得られるβは一定の値を取らず、限られた波長帯のダスト観測からだけ ではダスト質量を大幅に過小評価してしまう可能性が示された(Ueda et al. 2020)。以上の研究か ら、円盤ダストの粒径や質量を観測的に正確に見積もるためには、幅広い波長帯で円盤を空間分解 して観測し、さらに偏光の波長依存性に関する情報も得る必要があることが明らかになった。

ngVLAへの期待:より成長したダストの分布を捉える

ngVLAは波長2.6 mmよりも長い波長帯をアルマ望遠鏡に比べて約10倍の集光力でカバーするた め、アルマ望遠鏡単独の場合に比べてより精密なダスト粒径の決定を可能にする。とりわけ、円盤 のあらゆる領域を見通しつつ、波長の長さに比例してより大きな粒径のダストからの放射を捉えら れる点が重要である(図3.1.6, Ueda et al. 2021)。アルマ望遠鏡が最も威力を発揮する波長2 mm以 下ではダスト円盤自体の不透明度が大きくなるため、この波長帯の情報だけではβを導出できない 場合も多いが、ngVLAはこの問題を克服する。さらに、アルマ望遠鏡との比較も通じて散乱が効く 波長帯を空間分解しながら特定することにより、ダスト粒径、及びその空間変化に関しても豊富な 情報を提供するものと期待される。具体的には、HD142527で見られるようなダスト集積を起こす 高気圧性渦(Ohashi et al. 2018)におけるより精密なダスト粒径測定や、それを踏まえた微惑星形 成効率の定量的議論への展開などが想定される。



図3.1.6:ngVLAによる円盤ダスト連続波偏光イメージングシミュレーション。ダスト個数密度が粒径aの-3.5乗に比例するとして、様々な最大粒径と乱流強さを特徴付けるパラメータatに対して計算したもの。カラーが偏光度、白棒が偏光の向きを表す。左下の白い丸はビームサイズを表す(Ueda et al. 2021)。

3.1.4 星間ガスの化学進化と惑星系円盤への輸送

近年の星間化学の著しい進展

近年の星間化学は、2つの方向性で目覚ましい進展を見せている。第一の方向性は、アルマ望遠 鏡による原始星エンベロープや原始惑星系円盤に対する高解像度観測の目覚ましい進展である。例 えば原始星L1527に付随する円盤に対する多輝線観測は、「遠心力バリア」と呼ばれる形成途上の 原始惑星系円盤外縁に相当する場所の内外で、分子の存在比が劇的に変化する様子を捉えた(Sakai et al. 2014)。このようにアルマ望遠鏡は、物質が円盤へとどう持ち込まれるのかを考える際に、 降着衝撃波領域をはじめとする小スケールでの組成変化を捉えることの重要性を明らかにした。



図3.1.7:ALMAによるc-C₃H₂分子とSO分子の観測結果。電波が強い領域は赤や白で示されている。c-C₃H₂分子は原 始星の方向で電波が弱く、むしろその上下に電波の強い領域が分布しているのに対し、SO分子では原始星方向で最も電 波が強い(Sakai et al. 2014)。

第二の方向性は,ngVLA 周波数帯におけるラインサーベイの進展である。近年,口径100 mの Green Bank Telescope (米国) やYebes 40 m Telescope (スペイン) といった大口径単一鏡に搭載 された超広帯域受信システムにより,新分子が続々と発見されている。特に重要なのは,それらが 生命の材料とも深い関連性が考えられる点である。生体を構成する区画化された組織を包む半透膜 (細胞膜など)の材料となるエタノールアミン (NH₂CH₂CH₂OH) の発見 (Rivilla et al. 2021a) や,遺伝子を形作る核酸塩基に含まれるNCN骨格をもつ最も簡単なガス種であるシアノミジルラジ カル (HNCN)の発見 (Rivilla et al. 2021b) は,その象徴であろう。これらの分子は、ngVLAがカ バーする周波数帯を含む観測で複数の遷移が検出され、どちらもその強度比を用いた解析により, 水素分子に対し10⁻¹⁰という予想以上に高い存在比が確認された。

ngVLAが探る生命関連物質の原始惑星系円盤への輸送

このシアノミジルの他にも、より大型で生命発現とも関連が深そうな窒素原子を含む分子が既に いくつか検出されており、ngVLAの有力なターゲットになると考えられる。具体的には、シアノア ミド(NH₂CN)やカルボジイミド(HNCNH)は、高分子生体物質の形成と密接に関連すると考 えられている(Rivilla et al. 2021b)し、野辺山45 m望遠鏡で複数の分子雲で捉えられたメチルアミ ン(CH₃NH₂)は、アミノ酸の前駆体として有望視されている(図3.1.8, Ohishi et al. 2019)。そ の他にも窒素を含み生命関連分子とみなせる分子は様々あり、ngVLAによる高解像度観測の絶好の ターゲットである。さらに、スノーラインの節で紹介したNH₃は、この窒素原子を含む様々な分子 の基本材料という側面からも、重要な観測対象となる。



図3.1.8:野辺山45 m電波望遠鏡で捉えられたアミノ酸の有力な前駆体メチルアミンの79 GHz放射スペクトル (Ohishi et al. 2019)。

生命発現の初期条件の探究には、太陽系内試料のとの比較が不可欠である。例えば上述のエタ ノールアミンは、ユレイライトと呼ばれるグループの隕石でも検出されていたが、それが星間空間 から持ち込まれたのか、それとも隕石母天体における衝突現象で作られたのかは、良くわかってい なかった(Glavin et al. 2010)。このような疑問に答える上で、星間空間でどの程度複雑な材料が 用意されそれが円盤にどう届けられるのか、という点を明らかにすることが、天文観測の重要な使 命であると考えられる。ngVLAは上で議論したものをはじめ窒素を含む様々な分子の高分解能観測 を通じて、まさにその期待に応えることができると考えられる。

参考文献

ALMA Partnership et al. 2015, ApJ, 808, L3 Altwegg et al. 2020, Nature Astronomy, 4, 533 Andrews et al. 2019, ApJL, 869, L41 Benisty et al. 2021, ApJL, 916, L2 Cieza et al. 2016, Nature, 535, 258 De Sanctis et al. 2015, Nature 528, 241 Furuya et al. 2021, ngVLA-J memo series C005 Glavin et al. 2010, Meteoritic & Planetary Sciences, 45, 1695 Hayashi 1981, PThPS, 70, 35 Kanagawa et al. 2015, ApJL, 806, L15 Kataoka et al. 2015, ApJ, 809, 78 Kataoka et al. 2016, ApJ, 831, L12 Kataoka et al. 2017, ApJ, 844, L5 Mori et al. 2019, ApJ, 872, 98 Murphy et al. 2018, "Science with a Next-Generation Very Large Array", ASP Conference Series, Monograph 7 Ohashi et al. 2018, ApJ, 864, 81 Ohishi et al. 2019, PASJ, 71, 86 Okuzumi et al. 2016, ApJ, 821, 82 Okuzumi et al. 2021, ngVLA-J memo series P006 Pinte et al. 2018, ApJ, 860, L13 Qi et al. 2013, Science, 341, 630 Ricci et al. 2018, ApJ, 853, 110 Rivilla et al. 2021a, PNAS, 118 (22), e2101314118 Rivilla et al. 2021b, MNRAS, 506, L79 Sakai et al. 2014, Nature, 507, 78 Takahashi & Inutsuka 2014, ApJ, 794, 55 Teague et al. 2019, Nature, 574, 378 Ueda et al. 2020, ApJ, 893, 125 Ueda et al. 2021, ngVLA-J memo series P005

3.2 様々な天体階層における星形成と星間化学

3.2.1 はじめに

銀河の中に存在する物質の変化は、宇宙の進化において見られる、最も重要な指標の一つであ る。現在我々が享受している豊かな化学物質の多様性は、星の形成と死の循環により、様々な重元 素が合成されたことでもたらされている。特に近年において注目されているトピックとして、星間 空間において、多くの重元素を含む複雑な有機分子が発見され、生命の誕生に必要な材料物質の起 源を宇宙に求める、アストロバイオロジーの分野も注目を集めている。特に重元素合成にとって極 めて重要な生産工場と呼べる大質量星の形成過程は、未だ多くの謎を秘めており、銀河の進化段階 や銀河中の異なる環境下において、星形成の解明が待たれている。

3.2.2 ngVLAで目指す星間化学

Hot coreとHot corino

星間空間は実験室に比べ非常に低温・低密度なため、物質の化学変化は一般には起こりにく く、また長いタイムスケールを要する現象である。これまで、飽和した複雑な有機分子(Complex Organic Molecule, COMs)は主に、若い大質量原始星周囲の比較的暖かく高密度な、hot coreと呼 ばれる領域(もしくはその低質量星版であるhot corino)において検出されてきた。また化学進化 のモデルも、理論計算によって構築されてきたが、密度や温度などの物理状態、また気相反応やダ スト粒子上での反応など、様々な条件によって生成される分子の反応速度は大きく異なる。これら に観測的な制限を与えることは、星間化学の発展にとって、常に重要な課題である。

近年は観測される天体数も増え、原始星の化学的多様性が注目を集めている。例えば、同程度の 質量と進化段階にある低質量原始星であっても、COMsが卓越しているhot corinoとは異なり、不 飽和炭素鎖分子が豊富に存在する天体が発見されてきた(Warm Carbon Chain Chemistry, WCCC; Sakai & Yamamoto 2013)。これらの化学的多様性は、天体のおかれる環境や、その形成過程に起 源があるとの示唆もあり、またその後誕生する星・惑星系にも多様性を及ぼすと考えられ、興味深 い。Hot coreに対しても、同様な多様性の存在を示唆する結果が得られつつある(Taniguchi et al. 2021)。

hot core内部構造は、中心の大質量原始星からの強い輻射により、密度・温度の大きく異なる層 が存在していると予想される。大質量原始星の多くは比較的遠方に存在し、内部構造を分解して調 べるためには、高い空間分解能が必要であり、ngVLAの観測に期待が寄せられている。炭素鎖分 子のHC₅N, HC₇Nなどや、アンモニア分子、CH₃CN, CH₃CCHなどのCOMsなど、多くの輝線が ngVLAがカバーする周波数帯に存在しており、幅広い温度・密度レンジをカバーする観測が検討さ れている。これらの観測から、原始星の化学的多様性の起源に迫ることが期待される。

大質量円盤における星間化学

高い空間分解能で大質量原始星の周囲を分解することにより、大質量星周円盤についても、大き く理解が進むことが期待される。hot coreの収縮により、大質量原始星周囲に大質量の回転円盤が 形成されると期待される(hot disk, 図3.2.1; Tanaka et al. 2021)。これまでアルマ望遠鏡による観 測から、例えば G353.273+0.641 などからは、大質量円盤が検出され、重力的不安定な円盤の分裂 による連星系形成の可能性が示唆されている(Motogi et al. 2019)。

その構造については、中心部数auが電離し、数100 au程度にまで広がってhot coreにつながる回転円盤構造をなし、中心星からの紫外線輻射により、1000 K 程度の温度を持つと期待される。このような hot disk の中では、他では見られない化学的性質が現れる。中心部から数10 auの領域では、ダストの破壊により放出される SiOやNaCl、AlOなど、不揮発性分子(refractory molecule)の検出が期待される、すでにアルマ望遠鏡での観測から、高い励起温度のH₂O分子輝線や、NaCl、AlO分子などが hot disk から検出されている(Tanaka et al. 2020; Tachibana et al. 2019)。これらの高分解能観測から、円盤内縁部の運動を調べることが可能となり、中心星の力学的質量も推定される。また hot disk 内縁部の温度構造などの物理状態、質量降着やoutflowなどガスの運動に関する情報も得られると期待される。



図3.2.1: Hot diskの模式図。 Tanaka et al. (2021)より。 中心星周囲数100 auに広がった大質量円盤は, 数auの範囲まで電離されジェットを放出, また円盤からはwindが駆動されており, 外縁部ではhot coreと接続している。

複雑な有機分子とAstrobiology

上記のように,複雑な有機分子が星間空間で多数検出されるようになり,アミノ酸の前駆体の検 出も報告されるようになった。マーチソン隕石や彗星塵からのアミノ酸検出以降,星間空間からの アミノ酸検出の期待が高まり,アルマ望遠鏡でも検討されてきたが,未だ検出には至っていない。

ミリ波・サブミリ波帯のCOMsの探査において、ラインコンフュージョンの問題が指摘されてい る。アルマ望遠鏡による観測ではすでに、高い感度によって多くの分子輝線が狭い周波数帯域の中 で混ざり合い、それらを分離することが困難な状況が報告されている。この問題は、周波数を下げ ることで回避でき、例えば40 GHz帯におけるngVLA観測のシミュレーションでは、グリシンやア ラニンなどのアミノ酸からの輝線を分離し、かつ10時間程度の積分により十分な感度で検出可能で あることが示されている(図3.2.2; McGuire et al. 2018)。ngVLAによって,星間空間からのアミノ酸の初検出への期待が,大きく高まっていると言える。



図3.2.2:シミュレーションにより予想された40 GHz帯のアミノ酸のスペクトル。点線はngVLAによる10時間積分での到 達感度(McGuire et al. 2018)。

近傍銀河での星間化学

星間雲に見られる化学的多様性に対し,異なる環境が与える影響を調べる研究も進んでいる。特 に低重元素量(金属量)環境下における化学的性質は,銀河の物質進化が化学に及ぼす影響の観点 からも興味深いテーマである。特に強い星間輻射場にある星間雲に対しては,ダストやガスの自己 吸収による紫外線の遮蔽が,コアやクランプ内部の温度・電離度を決める重要な因子となり,化学 的性質の違いに現れると考えられる。これまで金属量が太陽系近傍の半分程度と知られている大マ ゼラン雲(LMC)では,hot core の観測が行われ,有機分子の存在度に大きなばらつきが見られて いる。また例えば有機分子が非常に欠乏した天体など,銀河系内とは異なる特徴を示すものも発見 されている(図3.2.3, Shimonishi et al. 2016; 2020)。星間ガス中の金属量を求める手法は,吸収線 の観測などに限られ,また場所による変化も大きいと示唆されているが,金属量による分子雲コア 中のダスト温度の違いが,上記の化学的性質の違いに現れているとの議論もある。分子雲コアの温 度は,NH₃の多輝線観測から推定され,ngVLAでは高い分解能でコアの温度分布を調べることがで きる。

南の天体であるLMCはngVLAでは観測不可能だが、同様に低金属量な環境にある領域として、 銀河系外縁部や、NGC 8622のような低金属量の矮小銀河にある分子雲コアなどは、ngVLAの重要 なターゲットとして考えられる。近傍銀河における星間化学は、ngVLAで切り開く科学のフロン ティアの1つとなろう。



図3.2.3:銀河系内とLMCにおけるhot coreの化学的性質の違い。金属量に比例した存在量を示すもの、天体により存在量が大きく異なるものなど、分子種によって異なる特徴を示す (Shimonishi private communication)。

3.2.3銀河系内の星形成

大質量星形成の現場に迫る

大質量星形成領域の観測には、多くの本質的な困難が存在している。現在知られている星の初期 質量分布関数から、誕生する大質量星の数は小質量星に比べ極端に少ないと予想され、さらに形成 のタイムスケールも短いことから、そもそも観測が期待されるサンプルの数が限られる。それに加 えて大質量星形成領域は典型的に数kpc以上の距離にあり、アルマ望遠鏡の登場前には十分な空間 分解能でその形成母体である大質量分子雲コアを分解することも不可能であった。また大質量星は 強力な紫外線輻射や星風などにより、周囲の星間物質に多大なフィードバック効果を及ぼし、電離 や散逸によって、星間ガスが持つ情報は失われてしまう。理論的には、小質量星の形成機構と同様 な星周円盤を作り、フィードバックの影響を回避することで、古典的なエディントン限界を超える 大質量星の形成に成功している(e.g., Krumholz et al. 2009)。しかしその観測的検証として、大質 量円盤の検出やフィードバックの素過程の解明は未だ成功しておらず、また初期条件としての大質 量高密度コアの形成や、大きな質量降着率を実現する機構は、未解明の問題として残されている。

これに対し、以下のようなngVLAを用いた、観測的研究が期待されている。大質量星のほとん どが近接連星系であることが示唆されているが、飛躍的に高い分解能により、10 au以下のスケー ルで大質量原始星連星を分解することで、短い公転周期の運動を直接撮像により示すことができ る。また再結合線を用いて速度を調べることが可能となり、3次元的な軌道運動を明らかすること ができる。質量や進化段階による違いから、大質量星形成の初期条件やその多様性の情報が得られ ると期待される。

さらに、ngVLAでは、電波帯における大質量原始星の光球そのものを分解観測可能であると期待される。大質量原始星は、その進化の段階で半径が100 R_☉程度にまで膨らみ、その後、数R_☉程度に収縮することが予想されている(図3.2.4; Hosokawa & Omukai 2009)。1 mas程度の分解能でこれらを分解でき、6000 K 程度の表面温度があれば1時間程度の観測で撮像が実現可能である。こ

れにより,表面温度のむらや自転速度など,多くの知見が得られることが期待される。また電離領 域からの自由-自由放射により,大質量原始星周囲に電離領域が広がっていく様子が目撃されるこ とであろう。原始星では未だ成功例はないが,VLA (Lim et al. 1998) や アルマ望遠鏡 (O'Gorman et al. 2017)では,太陽以外の恒星では唯一,ベテルギウスの光球の分解観測成功している。 ngVLAは,近傍の多くのAGB星や赤色巨星の電波光球のイメージングを可能にし,その時間変化も 克明に示すことができるを期待されている。



図3.2.4:質量降着率の違いによる大質量原始星の質量と半径の進化。質量降着率が10⁻³ M_{\odot} /yrを超えると、~10 M_{\odot} に成長した時点での半径が 200 R_{\odot} (~ 1 au)を超えることがわかる(Hosokawa & Omukai 2009)。

3.2.4近傍銀河における星形成

様々な環境下での星形成

銀河進化の文脈において、原子ガスからの巨大分子雲の形成、さらに大質量星形成、及び超新星 爆発によるフィードバックを理解し、銀河の進化を駆動する星間物質のライフサイクルを解明する ことが天文学の大きな目標の1つである。また銀河進化の歴史において、衝突合体による進化のパ ラダイムが提案され、広く受け入れられているが、それに伴って起きる間欠的もしくはバースト的 で活発な星形成は、現在銀河系内の星形成領域では見られない。それに対し巨大分子雲(GMC) や星形成領域を銀河全体にわたって網羅でき、かつ分解可能な近傍銀河は、非常に重要なターゲッ トである。NANTEN望遠鏡や野辺山45 m鏡, さらにIRAM 30 m鏡のサーベイ観測が行われ, 大マ ゼラン雲 (LMC; Fukui et al. 1999; 2008) やM33 (Tosaki et al. 2011; Onodera et al. 2012), M51 (Koda et al. 2009, 2011; Egusa et al. 2011) などの近傍銀河の分子雲の性質が, 網羅的に調べられ てきた。この研究はアルマ望遠鏡によって一層進展し、LMCにおける代表的な星形成領域である N159領域のフィラメント状分子雲の検出や(Fukui et al. 2019; Tokuda et al. 2019; 2019年 ALMA press release), M33における巨大HII領域NGC 604周囲の分子雲の研究(図3.2.5, Muraoka et al. 2020) などにより,銀河間相互作用による誘発的大質量星形成の過程が調べられてきている。さ らに低金属量環境にあることで知られる小マゼラン雲(SMC)でのALMA ACAの大規模サーベイ や、PHANGS ALMA Large Programによる近傍渦巻銀河の網羅的研究(Leroy et al. 2021; 2021年 ALMA press release)により、個々の分子雲を分解し、統計的な解析によって調べる分子雲進化の 研究が、多くの近傍銀河に対して可能となってきた。これにより、いわゆるKennicutt-Schmidt則の ような、銀河全体を積分もしくは平均化した量で特徴付ける手法から前進し、銀河の内部構造や領



域による環境の違いの影響を考慮した、巨大分子雲の進化モデルの構築が進められている。

図3.2.5:アルマ望遠鏡により得られた近傍銀河M33の巨大HII領域 NGC 604に付随する分子雲。ハブ・フィラメント 構造やシェル状の複雑な構造が見られる。(a)電離ガスからのHa放射(赤)と¹²CO(2-1)の積分強度(緑)の分布。(b) ¹²COの速度場の分布。HIガス流などとの力学的相互作用が示唆されている(Muraoka et al. 2020)。

興味深い結果として,星形成の兆候を示さないGMCの存在が挙げられる。 Kawamura et al. (2009)がLMCにおいてType Iと分類したこのようなGMCは,銀河系内ではほとんど見られないが,銀河全体を見渡せないことや観測バイアスの効果が排除できない。近傍銀河での高分解能観測から,同様な星なしGMCが多く検出されたことにより,GMC進化のタイムスケールが推定できる。さらに多くの銀河のサンプルから,銀河の形態分類や金属量の違い,相互作用の有無,スターバーストを含む星形成の活動性などのパラメータに対して,上記の特徴が比較が可能となりつつある。

ngVLAでは、アルマ望遠鏡の観測によって分解された近傍銀河の巨大分子雲に対し、内部構造 をさらに分解、星形成の直接の母体である分子雲コアを多数検出することが可能となる。特にNH₃ コアは高密度ガスの良いトレーサーであり、さらに複数輝線の観測から、ガスの温度の測定が可能 である。GMCの進化段階の指標として、付随するHII領域の有無だけでなく、内包される高密度ガ スの割合を求めることは有効なアプローチとなりうる。また分子雲コアの質量分布関数を求め、環 境の違いが星形成に及ぼす効果を議論することも可能となるだろう。ngVLAの高い感度は、CO輝 線強度の弱い矮小銀河や楕円銀河においても、同種の研究の道を開くものとなる。

銀河系内では、0.1 pc程度の幅を持つフィラメント状分子雲の分裂による分子雲コア形成のパラ ダイムが、星形成の初期段階を理解するモデルとして注目を集めている(e.g., Arzoumanian et al. 2011)。一方でその形成メカニズムについては議論が続いており、統一的な理解を得る研究が進め られている。diffuseな星間雲からのフィラメント状分子雲の形成(e.g., Shimajiri et al. 2019)を、 様々な環境下で調べることができれば、普遍的な星形成モデル構築に向けての大きな前進となると 期待される。近傍銀河においては、上述のLMCなどいくつかの大質量星形成GMCでフィラメント 状分子雲が検出されているが、ngVLAによる、さらに高い分解能で広範囲にわたるサーベイ観測が 待たれる。

高分解能HI観測で迫る銀河の活動性の起源

アルマ望遠鏡の観測により,飛躍的に高い分解能で分子雲の分布が明らかにされつつあるが,低密度原子ガスをトレースするHI 21 cm線の観測は,分解能と感度において大きな改善が求められている。一方,近傍銀河のHIサーベイについては,(e) VLAによるTHINGSプロジェクト,矮小銀河に対する LITTLE THINGSプロジェクトなどがあり,6秒角程度の分解能が達成され,レガシーデータとして公開されている。これらのデータは,銀河の構造のモデル化やダークマター分布,星形成率との相関など調べられている。LMCにおいてはこれまで,ATCA+Parkes望遠鏡が1分角ほどの分解能で全面観測を行い,Super Giant Shellが多数同定された(Kim et al. 2003)。また同データで得られた複数の速度成分の分布から,LMC-SMCの相互作用によるHIガスの衝突による大質量星形成のトリガーが示唆されている(Fukui et al. 2017; Tsuge et al. 2019)。またSKAの先行機であるASKAP望遠鏡によって,SMCの高分解能HI観測が行われ,その構造などが議論されている(McClure-Griffiths et al. 2018)。

巨大分子雲形成やその進化を調べるためには、アルマ望遠鏡に匹敵する1秒角を切る分解能での HIの観測が求められ、ngVLAにより多くの進展が期待される。これまでの銀河スケールでの星間物 質の進化は、例えば密度波理論のような定常的な衝撃波伝搬が駆動するモデルがなど提案されてい るが、個々の星間雲の進化を追うためには、数10 pc以下でそれらを分解する必要がある。また質 量分布関数は星間雲の進化を理解する重要な手がかりを与えるが、その質量には分子ガスだけでな く、原子ガスの寄与も考慮にいれる必要がある(e.g., Kobayashi et al. 2017)。

またバー構造など非軸対称ポテンシャルによる銀河中心にあるブラックホールへのガスの供給モ デル,磁気回転不安定性による大きな乱流運動の励起などの理論的な提案もある。これらの観測的 検証も,近傍銀河に対するHIの高分解能観測が威力を発揮するであろう。

また、LMC-SMCのシステムに見られるように、銀河間相互作用は銀河の進化に重要な影響を与 え、銀河衝突はスターバーストの発現を促すと考えられている。天の川銀河も過去にこのような衝 突を経験し、その名残はGAIAによる観測からも検出されている。このような大規模な銀河衝突で はないが、現在でもマゼラニックストリームに見られるように、矮小伴銀河やハローからの質量降 着は続いており、高速度雲・中間速度雲として観測される(図3.2.6、Fukui et al. 2021)。近年注目 を集めたSmith Cloudのような大質量のHI雲の銀河面への衝突は、銀河系においても活発な星団形 成を誘発しうると示唆されている。近傍銀河のハロー領域において、降着ガス質量を見積もること は、銀河進化の理解に対してngVLAがもたらすと期待される成果の一つである。



図3.2.6:銀河系内で検出された中間速度HI雲。特徴的なhead-tail構造を示す。銀河回転とは明らかに異なり、また近傍 HI雲と比べダスト放射が弱いことから、ハローから銀河面に落下していると示唆される(Fukui et al. 2021)。

参考文献

Sakai, N & Yamamoto, S. 2013, Chemical Reviews, 113, 8981 Taniguchi, K. et al. 2021, ngVLA-J memo series C003 Tanaka, K. et al. 2021, ngVLA-J memo series C001 Motogi, K. et al. 2019, ApJ, 877, L25 Tanaka, Kei E.I. et al. 2020, AjJ, 900, L2 Tachibana, S. et al. 2019, ApJ, 875, L29 McGuire, B.A. et al. 2018, Science with a Next Generation Very Large Array, 517, 245 Shimonishi, T. et al. 2016, ApJ, 827, 72 Shimonishi, T. et al. 2020, ApJ, 891, 164 Krumholz, M.R. et al. 2009, Science, 323, 754 Hosokawa, T. & Omukai, K. 2009, ApJ, 691, 823 Lim, J. et al. 1998, Nature, 392, 575 O'Gorman, E. et al. 2017, A&A, 602, L10 Fukui, Y. et al. 1999, PASJ, 51, 745 Fukui, Y. et al. 2008, ApJS, 178, 56 Tosaki, T. et al. 2011, PASJ, 63, 1171 Onodera, S. et al. 2012, PASJ, 64, 133 Koda, J. et al. 2009, ApJ, 700, L132 Egusa, F. et al. 2011, ApJ, 726, 85 Koda, J. et al. 2011, ApJS, 193, 19 Fukui, Y. et al. 2019, ApJ, 886, 14 Tokuda, K. et al. 2019, ApJ, 886, 15 Muraoka, K. et al. 2020, ApJ, 903, 94 Kawamura, A. et al. 2009, ApJS, 184, 1 Arzoumanian et al. 2011, A&A, 529, L6 Shimajiri, Y. et al. 2019, A&A, 623, A16 Kim, S. et al. 2003, ApJS, 148, 473 Fukui, Y. et al. 2017, APSJ, 69, L5 Tsuge, K. et al. 2019, ApJ, 871, 44 McClure-Griffiths et al. 2018, Nature Astronomy, 2, 901 Kobayashi, M.I.N. et al. 2017, ApJ, 836, 175 Fukui, Y. et al. 2021, PASJ, 73, S117



3.3 宇宙史の中での銀河進化

3.3.1はじめに

宇宙における星形成の歴史の理解は、この20年で大幅に進んだ。約100億年前に星形成のピーグ が存在することがわかってきた(図3.3.1)。宇宙のベビーブーム期ともいえよう。一方、銀河や ダークマターが作り出す宇宙の大規模構造の形成の歴史は、すばる望遠鏡などによる広域銀河サー ベイや銀河進化シミュレーションの進展により理解が進んできた。大規模構造の形成には、小質量 銀河同士の衝突合体の繰り返しや大規模な質量降着が関係していると考えられている(図3.3.2)。 このように、宇宙の大局的な星形成や構造形成の描像はおおよそ見えてきたが、個々の銀河の成長 の根源である物理プロセスや質量獲得メカニズムは理解が進んでいない。この問題解決の鍵となる のが、星形成の材料である「冷たい分子ガス」である。



図3.3.1: 宇宙の星形成の歴史。約100億年前(赤方偏移2)の宇宙にピークがあり、その後現在の宇宙に至るまでに星形 成率が一桁下がる。Madau & Dickinson 2014, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 52, p.415-486の(15)式を元に作成。



図3.3.2: 宇宙の大規模構造のシミュレーション。ダークマターハローが形成され、その中で銀河が衝突合体を繰り返すと 考えられている。クレジット:lshiyama et al. (2015) https://www.cfca.nao.ac.jp/en/node/547

銀河を形作る星々は,水素分子などの冷たいガス雲から誕生する。ガスが重力によって集めら れ,温度と密度が高くなると,やがてそこに星が誕生する。従って,星形成の現場を直接捉えるた めには,ふたつの水素原子から成る水素分子の検出が重要である。しかし,水素分子は電気双極子 モーメントを持たず,それ自体が強い電磁波を放たないので,直接の観測は難しい。そこでよく観 測されるのが一酸化炭素分子である。一酸化炭素分子が放つ電磁波の強度と分子ガス質量には相関 関係があることが経験的に知られており,宇宙の一酸化炭素分子を観測することによって,水素の 質量やその空間分布を調査できるのである。

一酸化炭素分子は、回転エネルギーが量子化しているため、115 GHz(波長 3 mm)の整数倍 (115 GHz, 220 GHz, 345 GHz, …)の周波数において離散的に電磁波を放つ。分子のエネルギー 状態は周波数に比例することから、より高周波の電磁波を放つ一酸化炭素分子は、より高いエネル ギー状態として存在している。つまり、高い周波数の電磁波を放つ一酸化炭素分子の検出は、高 温・高密度ガスの存在を示す指標となる。一方、最もエネルギー状態が低い115 GHzの電磁波を放 つ一酸化炭素分子は、比較的低い温度・密度状態のガスの存在を示すといえよう。

では、どのように昔の宇宙の一酸化炭素分子を観測するのだろう。過去の宇宙において放たれた 電磁波は、宇宙膨張の影響により地球上では波長が長くなって観測される(周波数が低くなる)。 これは、遠ざかる救急車のサイレンが高音(高い周波数)から低音(低い周波数)に変化する現象 を考えるとわかりやすいだろう。つまり、過去の宇宙において115 GHzの周波数で放たれた電磁波 は、宇宙膨張によって波長が引き延ばされ、現在の宇宙においてはもっと低い周波数で受信され る。例えば、115 GHzの電磁波は、100億年前(赤方偏移=1.8)の銀河を観測すると約40 GHz、110 億年前(赤方偏移=3.7)の銀河だと約25 GHzの電磁波として受信される(図3.3.3)。ngVLAでは1 GHzから115 GHzまでの周波数帯域をほぼ連続的に観測する。つまり、原理的には、宇宙誕生直後 (赤方偏移=100)から現在の宇宙までに存在する一酸化炭素分子をほぼ網羅的に検出できるのであ る。もっとも,最初の星が超新星爆発をおこし,星間空間に炭素や酸素を放出するまで一酸化炭素 分子は存在せず,また距離が遠くなればなるほど電波強度が弱くなるため,初代銀河の一酸化炭素 の観測は難しいとされている。そのため,第2世代以降の銀河がngVLAの主な観測対象となるであ ろう。



図3.3.3: 観測周波数と赤方偏移の関係。ngVLAが観測する周波数帯では赤方偏移0から(原理的には)100までの一酸 化炭素分子を観測できる。赤方偏移15以上の炭素([CII])も観測可能である。

アルマ望遠鏡はより高い周波数である「サブミリ波」の観測を得意としているため、より高いエ ネルギー状態の一酸化炭素分子を観測することができる。アルマ望遠鏡で高温・高密度ガスを観測 し、ngVLAで低温・低密度ガスを観測する。双方のデータを統合的に解析し、冷たい分子ガスがど のように温められ、どのような条件下で星が誕生するのか。またそれぞれがどのような場所に存在 し運動をしているのか。ngVLAとアルマ望遠鏡を使った相補的な研究から、これらの問いに対する 知見が得られることが期待される。

3.3.2 ngVLAで観測する冷たい分子ガス

では,一酸化炭素などのガスの観測から,具体的にどのような科学成果が期待されるか解説していき たい。

138億年の宇宙の歴史における星形成過程の研究

先に述べたとおり,ngVLAでは,現在の宇宙(Leroy et al. 2018)から初期宇宙(Carilli et al., 2018, Emonts et al. 2018)にかけて存在する一酸化炭素分子を系統的に観測できる。初期宇宙においては,今から100億年以上前に存在する星形成主系列銀河にngVLAを向けることにより,現実的な観測時間(30時間程度)で非常に質の高い画像が得られる見込みである(図3.3.4)。ガスの分布

¹ その時代における「普通の銀河」と考えていただきたい。

を非常に高い解像度で描き出すことにより,これまでは難しかったさまざまな量的研究が切り開か れ、ベビーブーム期の銀河における星形成プロセスの理解が飛躍的に向上すると考えられる。その 一つに、ガス塊と星の分布の関係の研究が挙げられる。ngVLAが得意とする高解像度撮像により 分子ガス塊の位置を精度良く求め、すばる望遠鏡などによって得られた星の分布の画像と比較する ことにより、銀河のどのような場所にガス塊が集まり星が誕生しているのかを示すことが可能とな る。初期宇宙に誕生した巨大ガス塊が銀河中心に集積し、それが銀河のバルジ成分の成長に寄与す るという説(Tadaki et al. 2017)もあり、ガス塊の特性と星形成との位置関係を詳しく調査するこ とは、銀河の成長進化のシナリオの解明において極めて重要な意味を持つ。また、一つの銀河に対 して、エネルギー状態の低い一酸化炭素分子をngVLAで観測し、アルマ望遠鏡を用いて比較的エネ ルギー状態の高い一酸化炭素分子を観測することにより(図3.3.5)、ガスの温度密度などの物理量 を導出することができる。温度・密度が高い領域と銀河構造との関係を明らかにするのも興味深い 研究課題である。



図3.3.4: 赤方偏移2の星形成主系列銀河(星形成率=25 太陽質量/yr)の擬似観測。解像度は1キロパーセク。左図は積 分強度。右図は速度場を示す。30時間の観測で非常に質の高い画像が得られることがわかる(Carili & Shao 2018)。



図3.3.5: 現在の宇宙に存在する銀河NGC1614を複数の一酸化炭素分子で観測した例。輝線ごとに分布が異なり、こ の違いから星間空間の温度・密度を導出することができる。このような観測から星間空間の温度密度などの物理量を導 出することができる。 Saito et al. The Astrophysical Journal, Volume 835, Issue 2, article id. 174, 20 pp.(2017).

ngVLAの高解像度分光観測から、銀河の回転曲線が描ける。近傍宇宙に存在する多くの円盤銀 河においては、中心付近から回転速度が急上昇し、ある半径よりも外側は回転速度が一定であるこ とが知られている。回転速度が星の質量(重力)によって決まっているとすると、半径が大きくな るに従って回転速度が減少するはずである。しかし、実際の回転速度が減少することなく一定であ るのは、目には見えないダークマターが銀河よりも外側の空間に広がって分布しているからであ る。このように、近傍銀河の回転曲線は大変よく研究されているが、遠方銀河における回転曲線の 特徴やダークマターの分布と回転曲線の関係は未解明な部分が多く、近傍銀河との違いも明確では ない。また、銀河の回転曲線は、円盤中の分子ガスが外力によって乱されることがなければ、おお よそ円運動を示す。その反面、小質量銀河の衝突合体や相互作用、乱流などによって円盤中の分子 ガスの運動が大きくかき乱されると、非円運動成分が支配的になる場合もある。言い換えれば、回 転曲線の様子を調べることによって、ガス円盤中の乱流や棒状構造によって生じるガスの非円運 動、銀河衝突の痕跡を調査できるのである。ngVLAを使い、ベビーブーム期やそれ以前の銀河の回

² ガスの運動情報を基に、縦軸に回転速度、横軸に銀河中心からの距離を示した図。

転曲線をつぎつぎと描き出すことにより、円盤銀河における星の形成過程,ひいては銀河のダーク マターの分布を調べるような研究が進むと考えられる。

ここであげた遠方宇宙の研究の一例に加え,近傍の銀河に対しては,分子雲の生成・散逸過程と乱 流や渦状腕の影響,分子雲と星形成の関係,分子雲衝突の重要性など,銀河面で起こる様々な物理現 象に新たな理解が得られることが期待される。特に,これまでは天の川銀河の天体に対して行われて いた研究が,近傍の他の銀河でもできるようになるのは画期的である(詳しくは3.2章参照)。

銀河間空間の冷たい分子ガス

星は単独で生まれることはほとんどなく、主に集団(星団)として生まれる。星の集合体であ る銀河も、ときに集団で誕生し、現在の宇宙まで進化することがある。このような集団を銀河団と 呼ぶ。近傍宇宙の銀河団としてよく知られている「おとめ座銀河団」は、実に1000個以上の大小 さまざまな銀河が属しており、その中心には巨大な楕円銀河が存在する(後述のサブミリ波銀河参 照)。銀河団は、ベビーブーム期かそれ以前の時代に形成し始めたと考えられており、成長途中の 銀河団を「原始銀河団」と呼ぶ。ダークマターの大規模構造に沿ってガスが降着し、温度と密度が 上昇した場所において星や銀河が形成され,原始銀河団が成長・進化していくと考えられている。 一方、成長中の銀河から放出される星風や活動銀河核の影響によって、ガスが銀河間空間に吹き飛 ばされる現象が起こることが理論シミュレーションから予想されている。実際に、アルマ望遠鏡を 使った観測からその様子が確認されている(図3.3.6)。この時,銀河の脱出速度を超過する速度で 吹き飛ばされるガスもあれば、再び銀河に降着するガスもある。再度降着したガスが次世代の星の 材料となるため、そのガスの質量を定量化することができれば、将来形成される星質量が推定でき る。また、ガス放出の時間変化、ガス放出が星形成に与える影響の調査も重要な研究テーマである (Bolatto et al. 2018)。そのため、原始銀河団におけるガスの分布と運動を高い感度と解像度で描 き出し,成長途中の銀河との関係を調べることは極めて重要であるといえる。実際,4時間程度の ngVLAの観測で、赤方偏移6の銀河から銀河間空間に放出される一酸化炭素分子の輝線が検出でき る見込みである(Fujimoto et al, 2018)。



図3.3.6: アルマ望遠鏡で観測した18個の銀河の炭素ガスのデータを重ね合わせ (赤色で表示), ハッブル宇宙望遠鏡に よる銀河の星の分布画像 (青色で表示)と合成した画像。炭素ガスが星の分布に比べ, 大きく広がっていることがわかる。 Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NASA/ESA Hubble Space Telescope, Fujimoto et al.

サブミリ波銀河における冷たい分子ガスの分布

宇宙の初期にはサブミリ波で明るく輝く銀河「サブミリ波銀河」が存在する。銀河団の中心に 鎮座する巨大楕円銀河の祖先に相当する天体であると考えられている。ベビーブーム期の宇宙に多 く存在し,天の川銀河の数百倍から数千倍の速さで星を生成する,いわば「星の工場」である。現 在の宇宙で最も高い星形成活動を示している銀河よりも一桁高いスピードで星を生成している。ま た,多くのサブミリ波銀河がベビーブーム期においてすでに膨大な星質量を獲得していることか ら,サブミリ波銀河の存在は宇宙初期の急速な質量降着と爆発的な星形成を示唆している。このよ うに,サブミリ波銀河は宇宙の銀河進化という重要な問題に密接に関係しているが,その星形成の 詳細は未解明課題として残っている。

これまで、JVLA (図3.3.7) やアルマ望遠鏡 (図3.3.8) を用いた一酸化炭素分子の観測から、サ ブミリ波銀河のガスの研究は進められてきた。しかし、非常に明るいサブミリ波銀河の観測であっ ても、JVLAでは120時間もの膨大な時間を要するので、ngVLAの高感度・高解像度観測が鍵とな るのは間違いない。疑似観測シミュレーションによると、ベビーブーム期の銀河における一酸化炭 素分子の分布をほんの1時間程度の観測で描き出すことができると見積もられている (Casey et al. 2018) 。ngVLAによって分子ガスの重力安定度を定量化し、その分布を画像化することにより、今 後銀河のどの場所で星形成が起こり得るのか、爆発的な星形成の起源は銀河衝突なのか、あるいは 孤立銀河におけるガスの大規模流入とそれに付随する重力不安定性によるものなのか (Tadaki et al. 2018) といった物理現象の特徴の一面を解明できることが期待される。サブミリ波銀河の観測 効率が大幅に向上することで、巨大銀河形成のシナリオの理解が大きく前進すると期待される。



図3.3.7: サブミリ波銀河GN20におけるCO(2-1) 輝線画像。JVLAを使って取得された (Hodge et al. 2012)。



図3.3.8: アルマ望遠鏡で取得したサブミリ波銀河 AzTEC1におけるCO(4-3) 輝線画像(Tadaki et al. 2018)。

3.3.3 その他の星間物質に対する観測的研究

二つの銀河が衝突合体すると、角運動量を失ったガスが銀河中心核周辺に落ち込むことが知ら れている。中心に集積したガスの温度や密度が上昇し、やがて星形成や活動銀河核の材料として 消費される。 ngVLAが観測する周波数帯、特に20-30 GHz帯では、星間空間に浮かぶアンモニア 分子(化学式:NH₃)を検出できる。同じ領域から複数のアンモニア分子輝線を観測することに よって、星間空間の温度を計算できる。つまり、アンモニア分子は温度計として使えるのである。 ngVLAを用いて、銀河衝突によって集積したガスに含まれるアンモニア分子を複数検出し、その 解析から得られる温度の地図と、アルマ望遠鏡の観測によって得られる星形成の地図の比較によっ て、物質の循環プロセスの謎に迫ることができるであろう(Ueda et al. 2021)。

水素の再結合線の観測もngVLAで期待されている観測の一つである(Michiyama et al. 2021)。 星形成が盛んな場所では,若い星からの強烈な紫外線放射によって水素原子から電子がはぎ取ら れ,水素を電離状態にする。はぎ取られた自由電子が,電離状態の水素と再結合する際に再結合線 とよばれる電磁波を放つ。すなわち,再結合線が検出される場所は,星がたくさん誕生している場 所であると言える。そのうえ,再結合線の強度から星形成のスピード(星形成率)を計算すること もできる。ngVLAを使うと,銀河の再結合線を効率よく検出することでき,星形成と銀河構造,銀 河の衝突のような大規模な現象と星形成の関係を調査できる。

水素イオンに電子が再結合すると、低密度ガスの良い指標である中性水素の状態に戻る。銀河間 空間には中性水素ガスが浮遊していると考えられている。密度の低い銀河間ガスがどのように銀河 に降り積もり、中性水素から分子ガスに変遷するのか。また、その後、どのように星が誕生するの か。この謎を解決するためには、中性水素と水素分子(一酸化炭素)の両方を高い解像度で観測す る必要がある。中性水素は波長21 cm (周波数1.4 GHz)の電磁波を放つ。ngVLAは1 GHzから115 GHzまでの周波数帯をほぼ連続的に観測できるため、中性水素と一酸化炭素の両方を観測できるので ある。

ー酸化炭素分子で作られた星間空間は、「光学的に厚い」ことが知られている。光学的に厚い とガスの表面しか見えず、中まで見通すことができない。上空の雲が複数層重なっていた場合、手 前の雲が遮るため,雲の奥を見ることができないのと同じである。また,一酸化炭素は,銀河全体 に広がったガスの良い指標であるが,特に密度の高い場所ではシアン化水素(HCN)や炭酸水素 イオン(HCO⁺)などの臨界密度の高い分子のほうが有利な場合がある。光学的に薄く,中まで見 通すことができるからである。HCNやHCO⁺の分布を描き出し,一酸化炭素分子の分布との関係 を調べることにより,希薄なガスから高密度ガスへの遷移の描像を示せるであろう (Decarli et al. 2018)。

ngVLAは最初期の宇宙の観測においても活躍するであろう。アルマ望遠鏡では、赤方偏移4-10の 炭素や酸素の輝線の観測が盛んに行われているが(図3.3.9)、ngVLAを使うとさらに昔の宇宙で放 たれる炭素輝線の検出が期待される。例えば、赤方偏移15以上の炭素輝線、赤方偏移11以上の窒素 輝線などが有力候補である。特に炭素輝線は、ALMA望遠鏡によってその明るさや銀河の運動とし ての指標の有効性が示されている。数時間の観測で赤方偏移15.5の炭素が検出できる見込みである (Hashimoto private communication)。



図3.3.9: (左) アルマ望遠鏡で観測した赤方偏移4.4の銀河の炭素輝線。渦巻状の構造が発見された。 Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), T. Tsukui & S. Iguchi (右)赤方偏移9.1の銀河の酸素。アルマ望遠鏡を用いて,約 130億年前の宇宙から酸素を検出した。 Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NASA/ESA Hubble Space Telescope, W. Zheng (JHU), M. Postman (STScI), the CLASH Team, Hashimoto et al.

膨大な宇宙塵に包まれた場所では、塵が光を遮ってしまうため、光赤外線ではその詳しい様子を 観測することができない。ngVLAが観測する低周波電磁波は、光赤外線に比べて波長が長いため塵 の影響を受けにくいことが特徴である。ngVLAでは、シンクロトロン放射や自由ー自由放射のよう な電波連続波を観測することにより、赤方偏移1までの宇宙に存在する天の川銀河のようなごく普 通の銀河を24時間の観測で検出することが可能である(Murphy et al. 2018)。また、1平方度の領 域を観測することにより、1年間に25 太陽質量を生成する銀河が数千個見つかると見積もられてい る(Barger et al. 2018)。

参考文献

Barger et al. 2018, ASPCS, 517, 551 Boizelle et al. 2018, ASPCS, 517, 509 Bolatto et al. 2018, ASPCS, 517, 441 Carilli et al., 2018, ASPCS, 517, 535 Decarli et al. 2018, ASPCS, 517, 581 Emonts et al. 2018, ASPCS, 517, 567 Fujimoto et al. 2021, ngVLA-J memo series G002 Hodge et al. 2012, ApJ, 760, 11 Ishiyama et al., 2015, PASJ, 67, 61 Izumi et al. 2021, ngVLA-J memo series G005 Madau & Dickinson 2014, ARAA, 52, 415 Michiyama et al. 2021, ngVLA-J memo series G003 Murphy et al. 2018, ASPCS, 517, 3 Leroy et al. 2018, ASPCS, 517, 499 Tadaki et al. 2017, ApJ, 834, 135 Tadaki et al. 2018, Nature, 560, 613 Tadaki et al. 2021, ngVLA-J memo series G004 Ueda et al. 2021, ngVLA-J memo series G006

3.4 大型電波干渉計による中性子星の研究

3.4.1中性子星の重要性

中性子星は、ラザフォードの弟子であるチャドウィックが1932年に中性子を発見すると、その 2年後の1934年にバーデとツビッキが超新星爆発の後に中性子ばかりでできる高密度の星として予 言された。1939年にはオッペンハイマーとヴァルコフが中性子星の密度解(半径・質量)を計算 し、磁場や自転速度を推定した。1967年、ベルおよびヒューイッシュによって周期的な電波パル ス信号を放出するパルサーが発見され、これが最初に発見された中性子星となった(Hewish et al. 1968)。

最初の発見から半世紀以上が経過し,現在見つかっている中性子星は3000天体を超え,観測的 特徴が非常に多様であることが分かってきている。図3.4.1に示すように観測される自転の周期

(P[sec])と周期変化率($\dot{P}[sec/sec]$)の関係で分類すると、いくつかの集団に分かれることがわ かる。この Pと \dot{P} を用いると中性子星の年齢(特性年齢: $\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$)や中性子星表面の磁場 強度 $B(\propto \sqrt{P\dot{P}})$ を推定することも可能である(Lorimer & Kramer 2004)。

一方,ハルスとテイラーによって連星パルサーから重力波の存在を間接的に証明されるなど (Weisberg et al. 1981),中性子星は天体物理学的進化史としての興味に止まらず,重力理論の検 証や重力波の検出に用いられるなど物理学的にも重要な天体であることが広く知られている。



図3.4.1: これまでに発見されている中性子星 (パルサー)の回転周期 (横軸) および周期変化率 (縦軸)の図 (Teruaki Enoto et al 2019 Rep. Prog. Phys. 82 106901)。黄色および青色の斜線はそれぞれ特性年齢および中性子星の 表面磁場強度を表している。

SNR:親超新星残骸との対応付けができている中性子星, Binary:連星パルサー(ミリ秒パルサー), Pulsar:通常のパル サー, XINS:X線放射を伴う孤立系の中性子星, CCO:超新星残骸に付随し熱的X線放射が確認されている中性子星(ただ し, 周期的強度変動や電波放射は確認されていない), Magnetar/HBP:極めて強い磁場を持つ中性子星。

1 2021 年 8 月現在, ATNF が管理するパルサーカタログには 3177 天体が登録されている。(https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/)

3.4.2中性子星を用いた長波長重力波の検出

ミリ秒パルサーを用いた重力波検出

中性子星は,天体物理学的な興味が尽きない一方,観測的特徴であるその回転周期や周期変化率の安定性といった観点から,宇宙における非常に精度の高い時計としての役割も期待されている。 図3.4.1の左下の「ミリ秒」という非常に高速の周期性を示す集団はミリ秒パルサーと呼ばれ,周期 変化率も小さくパルスの到達タイミング精度が特に高いことで知られている。高いパルスタイミン グ精度は地上のレーザー干渉計では検出が困難な長波長重力波の検出器として最適であると考えら れ,ミリ秒パルサーを用いた「パルサータイミングアレイ(PTA)」としての観測が推進されて いる。

重力波が地球やパルサーを通過する際に、地上で測定するパルスの到達タイミングに「ずれ」 (=タイミング残差: $r_{\rm GW}(t)$)が生じる。この重力波によって生じるずれ $r_{\rm GW}(t)$ はミリ秒 パルサーにおける元のパルス周波数を ν_0 ,重力波の影響を受けたパルス周波数を $\nu(t)$ とすると、

$$r_{
m GW}(t) = \int^t rac{
u(t') -
u_0}{
u_0} dt' \propto \Delta s(t)$$
 (式3.4.1)

と表すことができる。ここで $\Delta s(t)$ は地球を通過する重力波とパルサーを通過する重力波の振幅の差を表し、重力波信号の強度に関係する量である(例えば日本SKAコンソーシアム科学検討班2020、Aggarwal et al. 2019など)。PTAが感度を持つ重力波の周波数はパルサーを観測する頻度と観測の継続期間で決まり、典型的にはナノヘルツ(nHz)程度のオーダーになる。このような非常に低い周波数帯の重力波は超巨大ブラックホール連星から放射されるものの重ね合わせとして観測されると期待されている。一方、重力波の振幅は非常に小さく、ミリ秒パルサーからのパルスが伝搬する際に星間物質から受ける影響と区別することが難しい。そこで様々な方向にある複数のパルサーの $r_{\rm GW}(t)$ の相関を取ることで、重力波特有の信号パターンを取り出す手法が用いられている。

PTA観測の現状

国際的にはヨーロッパ主導のEuropean PTA (EPTA),北米主導のNANOGrav,オーストラリ ア主導のParkes PTA (PPTA),インド主導のIndian PTA (InPTA) などのPTAプロジェクトがあ る。特に,EPTA, NANOGrav, PPTAの3グループが協働し国際PTA (IPTA)の枠組みも構築し ている。近くInPTAもIPTAの枠組みに加わる方向で議論が進んでいるところである。

現在知られているミリ秒パルサーは観測されている中性子星全体のおよそ1割程度であり,現 在のPTAでは特に安定なものを峻別して30天体程度を継続的にモニターしている。図3.4.2には NANOGravの11年間の観測で得られた全天における8 nHzの重力波信号の強度上限値が得られてい る(Aggarwal et al. 2019)。非常に強い上限値が付いている領域があるものの,観測可能なパル サーの数の違いにより全天で見ると場所によって2桁近い感度の差があることが分かる。



図3.4.2: 11年間のPTA観測による超巨大ブラックホール連星から放射される重力波 (波長8 nHz) 強度への上限値の全 天分布 (The NANOGrav Collaboration, Aggarwal et al. 2019)。観測対象のミリ秒パルサーを星印,最も感度の 良い領域を赤丸で示している。

SKA1の本格稼働によって、ミリ秒パルサーの数も1000天体程度に増えると期待されている。それに伴いPTAの観測対象になりうる天体数も100を超えると期待され、天球面上の分布も広がることから、全天を対象とした高感度PTA観測を実現できるようになる。

一方で、式3.4.1で示した重力波信号の振幅に関係する項 $\Delta s(t)$ は、重力波が空間を伝搬する 際のパルサーの系における空間の揺らぎ(パルサーターム)の影響と測定を行う地球周囲の空間の 揺らぎ(アースターム)の影響の両方が含まれていることに注意する必要がある。したがって、パ ルサーまでの距離の決定精度が悪いと $r_{\rm GW}(t)$ に非常に大きな系統誤差をもたらすことになる。 また、非常に安定したパルスタイミングを刻むはずのミリ秒パルサーにおいても、図3.4.3に示すよ うに突然パルス形状が変化し、それに伴ってパルスの到達タイミングにもずれが生じうることが分 かってきた(Singha et al. 2021)。



図3.4.3: ミリ秒パルサー PSR J1713+0747の2021年4月におけるパルスプロファイル(赤線)。2つの周波数帯(上 と下)で数ヶ月前の典型的なパルス形状(点線)に比べ有意に形状が変わっていることがわかる。 (Singha et al. 2021, arXiv: 2107.04607v1, MNRAS Letter accepted: doi:10.1093/mnrasl/slab098)

これらの系統誤差により $r_{\rm GW}(t)$ へ重力波信号と同程度かそれ以上のノイズが付加されてしまい,重力波の到来方向識別確度を著しく低下させる要因になる。これでは近い将来PTAによる重力 波検出が成功したとしても重力波源の特定が困難となってしまうため,系統誤差の低減は極めて重 要な課題となる。

長波長重力波天文学へ:ngVLAへの期待

近い将来,大規模なPTA観測が実施されることで超巨大ブラックホール連星起源の長波長重力波 の検出が期待されているが,検出にとどまらず「長波長重力波天文学」を開拓するためにはPTAの 位置決定精度の向上が本質的である。そのためには,パルサーまでの距離の測定精度の向上,およ びタイミング精度の劣化をもたらす突発的なパルス形状変化の原因の解明,により $r_{\rm GW}(t)$ 測定 時に生じる系統誤差の大幅な改善が最も直接的な方法となる。

位置決定精度への要求

たとえば、1 nHzの重力波の波長はおよそ10 pc程度となるため、パルサーまでの距離の不定性 はこの波長よりも十分に小さい必要があり、絶対精度として~1 pc程度で距離を決定する必要があ る。

観測量として得られる分散度から推定されるミリ秒パルサーまでの距離は地球から100 pcから数 kpc程度まで広く分布している。たとえば、距離1 kpcのパルサーの場合0.1 %の精度に相当し、年 周視差であれば1マイクロ秒角の精度で距離を決定する必要があるということである。パルサーの 電波強度は典型的には周波数に対し冪乗で暗くなるため、高い角度分解能を実現できる従来の超長 基線電波干渉法(VLBI)を用いた高周波数帯の観測では検出そのものが困難であった。したがって、パルサーの年周視差計測における位置決定精度は限定的であるものの、感度が良い1 GHz付近の低周波帯で実施されてきた。

しかし、ngVLAが本格稼働すれば、ミリ秒パルサーにおける電波スペクトルの特性を考慮して も20 GHz以上の高周波数帯で十分な感度での検出が可能²であり、要求される距離の測定精度を達 成することができると期待される。

広帯域スペクトルの取得と放射機構の理解

パルサーまでの距離の測定精度と同様,パルスの形状変化やパルスタイミングずれなどの系統 誤差は非常に大きな問題になる。これらの現象はミリ秒パルサーの放射機構とも密接に関係してい ると考えられる。したがって,広範な電波スペクトルのモニターを実施することで放射機構を解明 し,パルス形状変化およびタイミングずれの原因を明らかにすることが重要な課題である。

1 GHzから100 GHzの2桁にわたる広い周波数帯域において非常に高い感度を有するngVLAはミ リ秒パルサーにおける物理的パラメータの高精度計測に非常に強力な装置である。サブアレイモー ドを活用すれば、この2桁にわたる周波数帯を同時にモニターすることも可能である。ngVLAによ る詳細モニターによりミリ秒パルサーの放射機構が明らかになれば、パルスの形状変化やタイミン グずれの発生要因の理解が進むと期待される。



Aggarwal, K., et al. 2019, ApJ, 880,116 Enoto, T., et al. 2019, Reports on Progress in Physics, 82, 106901 Hewish, A., et al. 1968, Nature, 217, 709 Lorimer, D. R., Kramer, M. 2004, Handbook of pulsar astronomy, by D.R. Lorimer and M. Kramer. Cambridge observing handbooks for research astronomers, Vol. 4. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004 Singha, J., et al. 2021, MNRAS Letters, slab098, https://doi.org/10.1093/mnrasl/slab098 Torne, P., et al. 2017, MNRAS, 465, 242 Weisberg, J. M., et al. 1981, Scientific American, 245, 74 日本SKAコンソーシアム科学検討班 2020, 日本版Square Kilometer Arrayサイエンスプック2020 (http://ska-jp.org/SKAJP_Science_Book_2020.pdf), 162

² 十分な確度で検出するためにはパルス放射を1時間程度積分する必要があるが、ミリ秒パルサーの周期・パルス幅を考慮すると10時間程度の観測で実現できる。



3.5 ブラックホールの進化とマルチメッセンジャー天文学

3.5.1巨大質量ブラックホールの形成進化

背景

現在の宇宙に存在する銀河の多くは、その中心に太陽の100万倍から10億倍もの質量に相当する 巨大質量ブラックホールを持つと考えられている。巨大質量ブラックホールの種がいつ形成され、 宇宙の歴史の中でどのように進化してきたかは、未だ解き明かされていない問題である。銀河の バルジ中に含まれる星の総質量と、巨大質量ブラックホールの質量との間には相関関係があり、 どの銀河を見ても、バルジ質量の1/500程度の巨大質量ブラックホールが存在するという不思議な 関係が成り立っている(Kormendy et al. 2013; Sahu et al. 2019; Nguyen et al. 2021)。現在、もっ とも受け入れられている銀河形成シナリオでは、ダークマターハローの中で銀河が形成され、銀 河同士の衝突合体を繰り返しながら、銀河が成長してきたと考えられている(e.g., Hopkins et al. 2008)。このシナリオの自然な帰結として、各銀河にあったブラックホールは、銀河衝突の結果、 連星ブラックホールを形成し、やがて、より重い一つのブラックホールへと合体することが予想さ れる(e.g., Begelman et al. 1980)。このようにして、銀河とブラックホールが共に進化してきた ことが、バルジ質量とブラックホール質量の相関関係を生む一因となっていると考えられる。しか し、宇宙で最初にできたブラックホールから、現在の宇宙にある巨大質量ブラックホールに至るま での過程には、いくつものミッシングリンクが存在する。ngVLAは、それらのミッシングリンクを つなぎ、ブラックホールの進化の理解に大きな進展をもたらすことができると考えられる。

分子ガス運動測定による矮小銀河における中・大質量ブラックホール質量の測定

現在までのところ,巨大質量ブラックホールの前駆体と考えられる中・大質量(太陽の100倍から10万倍の質量)ブラックホールの観測例は極めて限られている。中・大質量ブラックホールのホストとして有力なのは,矮小銀河や球状星団(e.g., Portegies Zwart et al. 2004; Greene et al. 2020)であり,いくつかのアプローチで,その存在の検証が試みられている。巨大質量ブラックホールの質量測定で用いられている方法の延長として,星やガスの力学的な運動からその存在を探る研究が行われている。この方法では、ブラックホール以外による力学的な影響を最小限にするため、ブラックホールの重力の影響が卓越する領域を解像することが重要だ。最近になり、アルマ望遠鏡の高い解像度を生かして,矮小銀河の中心領域の分子ガスの運動を分解することで,数10万から100万太陽質量程度のブラックホール質量の測定に成功した例が報告されている(Onishi et al. 2015; Onishi et al. 2017, Nguyen et al. 2019(図3.5.1))。ngVLAは、アルマを一桁以上しのぐ解像度で一酸化炭素分子輝線を観測することが可能で、より小さなブラックホール質量の測定が可能となることが期待される。



図3.5.1: ブラックホール質量とバルジ質量の関係 (Nguyen et al. 2019)。アルマの観測によって、ブラックホール質量 が106太陽質量以下の測定が可能となり、これまで知られている相関関係からのずれが指摘されている。ngVLAでは、ブ ラックホール質量の測定範囲をさらに広げることが可能となり、銀河とブラックホールの進化の関係に新たな知見をもたら すと期待される。

バルジ質量-ブラックホール質量関係の宇宙論的進化

近年のアルマの観測により,バルジ質量とブラックホール質量の間の相関関係は,赤方偏移6-7 のクエーサーにおいても観測されている(Izumi et al. 2018, 2019)。このことは,宇宙誕生後数億 年で,すでに銀河とブラックホールの共進化が成立していたと示唆される。さらに高赤方偏移の銀 河を研究することにより,いつの時代に共進化が始まったのか,そして,その物理的原因は何かと いう問題の本質に迫ることができる。前項で述べたように,分子ガスの運動からブラックホール質 量を見積もる方法は,ngVLAで大きな進展が期待され,赤方偏移7を超える銀河に対しても適用す ることが可能だ(Izumi 2021a)。

赤方偏移7のクエーサーで共進化の関係が見られるということは、さらに昔の宇宙において、銀 河同士の衝突合体が頻繁に起こり、銀河とブラックホールが短時間に成長した可能性を示唆してい る。近傍宇宙における研究から、銀河中心の数百光年以内の核周領域にある分子ガスが、ブラック ホールへの主な質量供給源であることが示されている(Kawakatu & Wada 2008; Izumi et al. 2016; Nagai & Kawakatu 2021)。このことから、赤方偏移7を超える急成長中のブラックホールにおい ても、質量供給の実態を探るうえで分子輝線観測(一酸化炭素輝線など)が重要になると考えられ る。また、Izumi e al. 2020は、近傍宇宙にあるセイファート銀河NGC 7469核周領域の特に内側で は、一酸化炭素輝線よりも中性炭素輝線の放射が卓越することを発見している。これは、活動銀河 核からの強い放射によって、一酸化炭素分子の乖離が進んでいることが原因と考えられる。ngVLA は、赤方偏移7を超える銀河に対して、一酸化炭素・中性炭素輝線を観測できるバンドを持つ(図 3.5.2)。これらの輝線の観測から、核周円盤の分子ガス質量を求め、輝線比から銀河の熱源を特定 することにより、ブラックホール成長につながる物理メカニズムを明らかにする研究が提案されて いる(Izumi 2021)。ngVLAにより、初期宇宙におけるブラックホールの成長と質量供給仮定の理 解が進むと期待される。



図3.5.2:一酸化炭素 (CO) 輝線と中性炭素 ([Cl]) 輝線の観測周波数と赤方偏移の関係 (lzumi 2021)。ngVLAは赤方 偏移8を超える天体からの輝線を観測することができる。

中・大質量ブラックホールからの電波連続波の検出

中・大質量ブラックホールへの質量降着がある場合は、ブラックホール降着流から出される電磁 波を直接観測することで、ブラックホールの存在を検証することが可能だ。Plotkin et al. 2012は、 恒星質量ブラックホールである系内X線連星や活動銀河核の観測から、ブラックホールの質量、X 線光度(質量降着率に比例)、電波光度の3つのパラメータの間にファンダメンタルプレーンがあ ることを報告している。もし、この関係が中・大質量ブラックホールにも適用できるとすると、現 在のJVLAの感度で、数100-1000太陽質量のブラックホールから出される電波放射を、銀河系内球 状星団で観測することが可能であるはずだ。しかし、Strader et al. 2012では、JVLAで10時間の観 測を行ったものの、ブラックホールの存在の兆候を示す電波放射は検出されなかった。ngVLAで は、わずか10分程度の観測で、同程度の感度を達成可能であり、より深い観測によって、その兆 候をとらえることが期待される。また、近傍銀河の球状星団における検出の可能性も提案されてい て,10時間程度の観測時間で,距離10 Mpcにある10万太陽質量のブラックホールからの電波放射 の検出が見込まれる(Wrobel et al. 2018)。同様に,矮小銀河のブラックホールからの電波放射の 直接検出可能性も提案されている(Nyland & Alatalo 2018)。

天の川銀河中心領域の中質量ブラックホール

天の川銀河も、現在の姿に至るまでに、矮小銀河との衝突を繰り返してきたはずだ。矮小銀河に 存在していた中質量ブラックホールは、銀河中心領域に存在している可能性が高い。銀河中心領域 にある高速度分子雲(e.g., Oka et al. 2015)はその有力候補である。アルマの観測によって高速度 分子雲の幾何学的・運動学的構造の詳細が調べられ、1万太陽質量程度の重力源が潜んでいること が明らかになった(e.g., Tsuboi et al. 2017; Takekawa et al. 2019; Takekawa 2021:図3.5.3)。同 様の研究はngVLAによる分子輝線観測でも発展が期待される。一方で,高速度分子雲に付随したコ ンパクト天体は発見されていないことから、本当にブラックホールが重力源であるかは議論となっ ている。ngVLAの高い感度により、高速度分子雲領域を観測することで、ブラックホールに付随す る電波放射を検出できることが期待される。電波放射の強度と前述のPlotkin et al. 2012の関係の 整合性、連続波スペクトル形状(非熱的スペクトルを示すかどうか)や時間変動(変動が十分早い か)を調べることにより、中質量ブラックホールの存在に決定打を与えることができる。さらに、 中質量ブラックホールの固有運動検出も期待されている。仮に中間質量ブラックホールがCentral Molecular Zone (CMZ) にあり、100 km/sの速度を持つとした場合、2.7ミリ秒角/年の固有運動が 観測される。ngVLAのLBAによるモニター観測を1年程度継続すれば、固有運動を検出することが 可能となる。分子輝線観測によって決まる視線速度と合わせ,3次元速度を決定することができ, 中質量ブラックホールの起源の解明につながると期待される。



図3.5.3: 銀河中心領域にある高速度分子雲HCN-0.009-0.044の積分強度図(a),速度分布図(b),3.2 x 104太陽 質量を置いた場合のモデルから予測される速度分布図(c)(Takekawa et al. 2019)

近傍銀河における浮遊ブラックホールの同定

3体以上の連星ブラックホールが存在した場合,そのうちの最も重い2つのブラックホールが衝 突合体を起こすと,非等方な重力波放出によって,残りのブラックホールは系から放り出されてし まう (gravitational recoil) 。こうしてできるブラックホールのうち,1万太陽質量以上のものは, 天の川銀河程度の大きさの銀河に10個程度存在し,数10億年にわたって母銀河中を浮遊することが 数値実験から予言されている(Bellovary et al. 2010; Tremmel et al. 2018)。銀河団に属する銀河 で,かつ比較的銀河の外縁部に存在する浮遊ブラックホールは,100万K程度のプラズマ中に囲まれ ているため,放射非効率降着流(RIAF)を形成し,電磁波放射を放つことが予言されている。Guo et al. (2020), Inayoshi et al. (2021)は、このような条件下での3次元流体数値実験を行い,降着 流からの放射スペクトルを計算した。この計算によると、波長3 mm帯にピークを持つ熱的シンク ロトロンによる電波放射が期待される。近傍の楕円銀河で、中心の巨大質量ブラックホールの1% の質量をもつ浮遊ブラックホールが存在するとすると、M87を含む複数の楕円銀河で、電波放射の 検出が見込まれる(図3.5.4)。



図3.5.4:浮遊ブラックホールから期待される電波放射スペクトルとngVLA/ALMAの感度曲線。ngVLAの感度で,複数の近傍楕円銀河の浮遊ブラックホールからの電波放射の検出が期待される(Inayoshi et al. 2021)。

急成長中のブラックホール

近年,すばる望遠鏡に搭載された主焦点カメラの観測により,VLA/FIRSTで検出されている系 外電波源の可視光同定が進み,それまで30%未満であった可視光同定割合が60%を超えるにまで向 上した(WERGSプロジェクト,Yamashita et al. 2018)。これによって,赤方偏移0から3の間で, 様々なradio loudness(電波-可視光強度比)をもつ銀河の存在が明らかになった。特に注目すべき なのは,radio loudness 4を超える極端に電波で明るい銀河(ERG: Entremely radio-loud galaxies) の存在である(図3.5.5)。Ichikawa et al. (2021)は、これらのERGの中に、比較的質量の軽い銀 河が含まれ、それらはいずれも活発な星形成を行う、急成長中の銀河であることを明らかにした。 また、中心にあるブラックホールにも大量の物質が降着していることから、ブラックホール自身も 急成長中と考えられ、極端にradio loudnessが大きい理由は、強い電波ジェットの活動に起因してい ることを示した。ngVLAは、ERGの電波ジェットを数10光年程度の解像度で撮像することが可能と
なる。このような急成長中の銀河における電波ジェットが果たすエネルギーフィードバックの実態 が明らかになると期待される。また、ERGの中心ブラックホールの質量も、現在の宇宙に存在する 巨大質量ブラックホールに比べると軽いと考えられ、ブラックホール同士の合体を頻繁に経験中に ある状態かもしれない。そのようなブラックホールは、1.5章で述べた浮遊ブラックホールとも関 連する可能性があり、電波ジェットの根本の位置が銀河中心からずれているかを調べることで検証 することが可能だ。ngVLAの高い解像度によって、こうした研究も可能となるだろう。



図3.5.5:WERGSプロジェクトによって可視光同定された系外電波源のradio loudness(R)とgバンドにおける等級の関係。星印で示した天体が、極端にradio loudnessが高い(R>4)ERGを表す(Ichikawa et al. 2021)。

3.5.2 活動銀河核ジェットと核周領域

背景

イベントホライズンテレスコープ(EHT)によってブラックホールシャドウの撮像が成功し (EHT Collaboration 2019),事象の地平線に肉薄する領域の様子が明らかになる時代となった。 一方で,活動銀河核で起こる活動の全体像を理解するためには,ブラックホール降着流や,その外 側に広がるトーラスや核周円盤といった構造の理解が欠かせない。さらに,ブラックホール付近か ら噴き出す相対論的ジェットは,母銀河を超えるスケールにまで到達し,銀河・銀河団スケールに エネルギーをフィードバックする役割を果たす。ngVLAがもたらす高解像度・高感度は,これらの 一連の構造をシームレスに研究することを可能とする。

ngVLAのLBAは,最長輝線約9000 kmのVLBI観測を行い,波長3 mm帯で0.1ミリ秒角を切 る解像度を発揮する。既存のVery Long Baseline Array (VLBA) やGlobal Millimeter VLBI Array (GMVA)も同様の基線長・波長帯で観測を行うが,ngVLAではアンテナ台数が格段に向上し,大 きな感度向上が見込まれ,より暗い天体の観測が可能となるとともに,イメージの品質も大きく向 上すると予想される。従来,このレベルの解像度の観測は,非常に明るい非熱的現象のみが観測対 象であったが,ngVLAはVLBIの解像度を備えながら,熱的な現象まで探ることが可能となる。

ジェットの形成機構

活動銀河核ジェットは,相対論的速度に加速されたプラズマの流れで,母銀河を超えるスケー ルにわたって細く収束された構造を保つ。ジェットが運ぶ単位時間あたりのエネルギーは、エディ ントン光度に匹敵し、宇宙でもっとも活動的な現象の一つである。いかにしてこのような現象を作 り出すかは、高エネルギー天体物理学最大の謎である。ジェットの発生機構の有力なモデルでは、 ブラックホールのスピンもしくは降着円盤の回転によって増幅された磁場を使って、ジェットを駆 動・加速するとされている。ジェットは初期には準相対論的速度を持つものの,やがて,ジェット のポインティングエネルギーを運動エネルギーへと変換しながら、徐々に加速されていくと考えら れている (Mckinney 2005; Komissarov et al. 2005) 。同時に,外圧によってジェットの収束が行 われる。加速・収束が起こる領域は、10-105 シュワルツシルト半径におよび、この領域において ジェットの速度場や形状を測定して理論モデルと比較するには,高分解能かつ非常に広い空間ス ケールにわたって観測を行う必要がある。これまで,このような研究は,近傍の非常に明るい天体 のみに限定されて行われてきた(図3.5.6, e.g., Asada & Nakamura 2012; Hada et al. 2013; Nagai et al. 2014; Nakahara et al. 2020) 。ngVLAが持つ高分解能・高感度・高画像品質により,研究対象は 格段に増え、様々なAGN光度・種族や、周辺環境が異なる天体に対して同様の研究が可能となり、 ジェットの形成機構のグローバルな理解がもたらされると期待される。また, ngVLAが持つ偏波観 測機能は、ジェットの形成機構の研究において非常に重要な役割を果たす。ジェットを構成するプ ラズマからのシンクロトロン放射は磁場に垂直に偏波するために、偏波角の観測から磁場構造の推 定が可能となる。さらに、多波長偏波観測からファラデー回転を求めることで、視線方向の磁場の 情報も得ることが可能となる(e.g., Asada et al. 2008)。これによって理論モデルが予言する磁場 構造との比較が可能となる。特に、M87を含む近傍のいくつかの活動銀河核では、10-100シュワル ツシルト半径の領域を解像可能なため、ジェットがまさに生成される現場において、こうした研究 を展開することができる。EHTがもたらすイベントホライズンスケールの情報と合わせることで, ブラックホールからどうやってジェットが生成されるのかを解き明かすことが期待される。

活動銀河核ジェットは非熱的プラズマが卓越するのに対し,その根元にあるブラックホール 降着流は熱的プラズマから成る。熱的プラズマの一部は,強い放射によって吹き上げられるアウト フローを形成する。こうした熱的プラズマによる現象は,従来のVLBIでは感度不足により画像化 することは難しかった。一部の天体では,ジェットからの明るい電波放射を背景光として,吸収と して描き出すことには成功していた。ngVLAは熱的放射を検出可能な感度を持ち,かつ,高い画 像ダイナミックレンジを達成することから,非熱的放射と熱的放射の両方を描き出し,降着流,ア ウトフロー,ジェットの3つの成分を全て画像化することもできるかもしれない(Hada 2021)。 ngVLAは,活動銀河核のシステム全体を理解するうえで,極めて重要な観測装置となるだろう。

Jet axial distance (de-projected): z (pc)



図3.5.6: M87で観測されたジェットの収束形状と理論モデルとの比較 (Nakamura et al. 2018)。 横軸はブラックホー ルからの距離, 縦軸はジェットの幅を表す。

トーラス

活動銀河核で観測される輝線スペクトルは、ブラックホール近傍(<~0.1 pc)にある電離ガスか ら出される速度幅が広い輝線と、比較的遠方(>~1 pc)にある電離ガスから出される速度幅が狭い ものが存在する。速度幅が広い輝線が観測される活動銀河核をI型、観測されないものをII型として 分類する。I型とII型の発生要因は、ブラックホールから1-10 pc程度の距離にある幾何学的に厚い構 造体「トーラス」が関係すると考えられている。トーラスがブラックホール近傍(<0.1 pc)の領域 を隠すとII型,そうでないとI型として観測されると理解されていて、活動銀河核の統一モデルとし て知られている。統一モデルは多くの観測的事実を説明できるものの、どのようにして分厚い幾何 学的形状を維持するかや、ブラックホールへの質量降着にどのような影響を及ぼしているか、その 物理メカニズムの詳細はよくわかっていない。

アルマ望遠鏡の活躍によって、いくつかの活動銀河核の中心10 pcスケールで、コンパクトな分 子ガスの構造体が発見されている(e.g., Combes et al. 2019; Imanishi et al. 2018)。これらの幾何 学的・運動学的構造は、周辺とは明らかに異なっていて、統一モデルで予言されるトーラスの描像 と一致する。一方で、解像度が上がるにつれ、従来考えられていたよりもトーラスは複雑な運動学 的構造を持つことも明らかになってきた。NGC 1068を例にとると、トーラス外縁部から内縁部に いくにつれ、ガスの回転の向きが逆になることが明らかになった(Impellizzeri et al. 2019; Imanishi et al. 2020; Imanishi 2021, 図3.5.7)。このような速度構造を作る原因はわかっておらず、ngVLA の高い解像度によって、0.1 pcスケールの幾何学構造・速度構造の解明が待たれる。ngVLAでは15 Mpc以内にある活動銀河核を0.1 pcスケールで解像することが可能となり,NGC 1068はもちろんの こと,他の活動銀河核におけるトーラスの性質も明らかにできると期待される。

また,いくつかの活動銀河核では,明るい電波ジェットが観測されていて,ジェットからの電 波放射を背景光として,トーラスを構成する分子ガスによる吸収線を観測することも可能である。 Sawada-Satoh et al. (2016, 2019, 2021)は,Korean VLBI Network (KVN)を用いて,NGC 1052 のトーラスによるHCN,HCO⁺吸収線の観測に成功していて,0.1 pcスケールにおける降着流の実 態を明らかにした(図3.5.8)。ngVLAがカバーする周波数帯は,これらの分子に加え,高密度ガス トレーサーである分子輝線がいくつもあり,トーラス内縁における分子ガスが,どのようにブラッ クホールに供給されるのか(あるいはアウトフローとして観測されるのか)を解明できると期待さ れる。

一方で、ブラックホールに近くなるにつれ、降着円盤からの紫外線・X線の影響により、分子の 破壊や原子の電離が進むと考えられ、電離ガスをトレースする観測が重要になると予想される。特 に、最近の数値実験では、活動銀河核からの放射圧によって、ブラックホール周辺の物質が電離 アウトフローとなって噴き出し、銀河の進化に重要な影響を与えることが示唆されている。Izumi 2021bは、波長3 mm帯にある水素の再結合線H42 α ongVLAによる検出可能性を検討した。比較的 密度が高いと予想されるトーラス内縁の降着流に関しては、ngVLAで十分検出が可能であると見積 もられる。一方、密度が低いアウトフローは検出が難しいものの、観測時間次第では部分的には検 出の可能性があることも報告されている。



図3.5.7:NGC 1068のトーラスの速度構造 (Imanishi et al. 2020; Imanishi 2021)。トーラス外縁部では東側が赤 方偏移, 西側が青方偏移するのに対し, 内縁部ではその逆の速度構造を示している。



図3.5.8: (a) NGC 1052の電波連続波強度分布(等高線)とHCN吸収線によって測定されたオパシティの分布(カラー)。 (b) NGC 1052で期待されるトーラスの描像。(Sawada-Satoh 2021

3.5.3 タイムドメイン・マルチメッセンジャー天文学

背景

タイムドメイン(時間軸)天文学は新たなディスカバリースペースで,近年,急激な発展を遂 げている分野である。電波天文学は,比較的低エネルギーの天体現象の研究に用いられることが 多く,早い変動現象とは結びつかないと考えられてきたが,高速電波バースト(FRB: Fast Radio Burst)の発見により,状況は一変した。わずかミリ秒程度の間に強い電波パルスを放射し,その 報告例は1000件に迫ろうとしている。電波パルスを繰り替えし放射するFRB(repeating FRB)の 発見により,FRBがマグネター・パルサーに似た現象であることが有力となっているが,すべての FRBが同じ起源を持つかは議論の最中である。また,2015年に最初の重力波イベントが検出されて 以降,特に中性子星-中性子星合体による重力波の電磁波対応天体の同定や,その後の時間変動を 調査する試みが全波長帯で盛んに行われ,電波観測も重要な役割を果たしている。南極の氷を使っ て高エネルギーニュートリノを検出するIceCubeは,宇宙線加速の起源を探る新たな望遠鏡として 注目されている。高エネルギーニュートリノ天体の電磁波同定においても,電波による高解像度観 測の重要性が高まっている。2030年代には、宇宙誕生後4億年以内に発生したガンマ線バーストを とらえる時代が到来し,電波を含めた多波長観測により,初代星を探す試みが活発になるだろう。 今後も,電波を含めた多波長観測による協力や、マルチメッセンジャー天文学の重要性は増すと考 えられる。

高速電波バースト

ngVLAはサーベイ型の望遠鏡ではないため、FRBの発見に向けた観測を積極的に行うことはないと予想されるが、その母天体の性質を探るのに非常に適した望遠鏡である。母銀河の同定、母銀河の形状・ガス量・ダスト量、星形成率などの情報は、FRBがどういった種族の天体を起源とするのかにヒントを与えるだろう。パルス状のフレアに加えて、定常電波放射が見つかるかどうかも、FRBの起源を探るうえで重要だ。定常電波放射の形状、スペクトルなどから、FRBの正体に

制限を与えることができるだろう。これまで定常電波成分が検出された例はrepeating FRBである FRB121102のみにとどまっている(Spitler et al. 2016; Chatterjee et al. 2017)。このFRBの定常電 波放射は,活動銀河核からの放射と考えられており,このことから,同天体は活動銀河核の近傍に あるパルサーやマグネター,もしくは活動銀河核自身が,FRBの起源の有力候補として提案されて いる。ngVLAの高い感度によって,その他のrepeating FRBについても定常電波放射の検出されれ ば,FRB121102が特異なFRBであるのかが明らかになるだろう。また,母銀河の分子輝線観測に よって,赤方偏移を高精度に決定し,FRB発見時に求められるDispersion Measureと組み合わせる ことで,銀河間中のバリオン量を求めることが可能となる。これにより,いわゆる「ミッシングバ リオン問題」に迫ることができる。

超高輝度超新星

超新星のなかでも特に明るく輝く超高輝度超新星と呼ばれる天体が存在する。大変稀な天体 現象だが,非常に高いエネルギーを放出するため,遠方銀河の距離測定や星間環境を調べるための 良いターゲットとして注目されている。そのエネルギー源はまだ十分理解されておらず,さまざま な説が提案されている。また,興味深いことに,超新星爆発から5-10年以上経過した後にも同じ天 体から電波連続波が検出されている。この電波連続波の起源がわかれば,超高輝度超新星の物理的 起源の理解が進むと考えられており,近年,JVLAなどを用いた研究が進んでいる。これまでの研 究から,活動銀河核,ジェットの残光,放出ガスと星周物質の相互作用,マグネターなどいくつか の候補が提案されているが,観測感度の制限により起源を確定できていない。高い感度が実現する ngVLAを用いて,年単位で継続的に観測することにより,物理モデルの切り分けができると期待さ れる(Hatsukade 2021)。また,超高輝度超新星は,FRBの母天体と関係する可能性も提案されて いて (Murase et al. 2016),FRBを理解するうえでも重要な研究対象である。

重力波・高エネルギーニュートリノ対応天体

中性子星-中性子星合体による最初の重力波検出となったGW170817(距離約1億3000万光 年)では、米国のVery Long Baseline Array (VLBA), JVLA, Green Bank Telescope (GBT)を 使ったVLBI観測によって、詳細な電波観測が行われた。これによって、合体に伴って生成された 相対論的ジェットの超光速運動を検出することに成功した。ngVLAが稼働する2030年代は、日本 のKAGRAを含む4基の重力波検出器が稼働し、重力波の到来方向の精度が格段に向上するととも に、300 Mpcを超える遠方宇宙からの重力波検出も対象となる。一度、電磁波対応がなされると、 ngVLAは電波帯の光度変動をとらえるだけではなく、その高い解像度を生かし、相対論的ジェット の運動を追跡し、爆発形状のモデルの縮退を解くことに貢献できるだろう。ngVLAの高い感度によ り、相対論的ジェットの偏波を検出することも可能かもしれない。これにより、相対論的ジェット の磁場構造を調べるユニークなサイエンスが期待される。

系外ニュートリノの発生源の同定や,発生源の母天体の性質を電磁波で調べることも,高エネ ルギー天体物理学において重要なテーマである。2017年9月22日にIceCubeによって検出された高 エネルギーニュートリノ事象(IceCube170922A)では,ニュートリノの到来方向に,電波からガ ンマ線において増光しているブレーザーTXS0506+056が発見された。また過去のIceCube観測デー タの再調査によって,2014年にも同天体の方向から多数のニュートリノ事象があったことが確認さ れ、この天体が史上初めて同定されたニュートリノ放射源天体であることが証明された(IceCube Collaboration 2018; The IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, Kanata, Kiso teams et al.2018; Kun et al. 2019)。検出したニュートリノのエネルギーを説明するためには、同天体において陽子が10¹⁵ eV 以上に加速されている必要がある。しかし、その加速メカニズムはいまだよくわかっていない。 2020年代後半以降、より高感度のIceCube-Gen2が計画されていて、ニュートリノ事象の報告事例 が多くなると見込まれる。重力波対応天体同様、ngVLAの観測によって電波光度変動のみならず、 構造の時間変化を高解像度で明らかにすることが可能となる。ブレーザーが高エネルギーニュート リノ源の多くを担うとすると、重力波天体同様、ジェットの構造変化を画像化することができる強 力な装置となり、宇宙線加速の理解においてngVLAが重要な役割を果たすだろう。

ガンマ線バースト

ガンマ線バーストはその明るさゆえ,初期宇宙環境を探る重要な光源である。特に重力崩壊型 の超新星を起源とするガンマ線バーストは,初期宇宙における星形成の歴史や化学進化の様子を探 る有力な手段である。ガンマ線バーストの残光は電波でも観測され,親星から放たれる相対論的 ジェットによる衝撃波で加速された電子から放たれると考えられている。ngVLAの高い感度と解 像度によって,電波残光の正確な位置同定がなされると,それに続く深い近赤外・可視光観測に よって,赤方偏移の決定が容易になるだろう。また,ngVLA自身によって,母銀河の物質によっ て生じる吸収線を観測することができれば,近赤外・可視光観測に代わる有力な赤方偏移決定手段 となるかもしれない。2030年代,初期宇宙で起こるガンマ線バーストを探る衛星ミッションHiZ-GUNDAM (Yonetoku et al. 2020)が計画されていて,赤方偏移12-14 (宇宙誕生後3-4億年)にお けるガンマ線バーストが検出されると予想されている。ngVLAの感度では,こうした天体の電波残 光を検出することが可能となる(図3.5.9)。



図3.5.9:赤方偏移12で起こるガンマ線バーストの電波強度変動のシミュレーション(Urata & Huang 2021)。線の色の違いはモデルの違いを表す。黒線は、現在までに分光学的に距離が決定されている最も遠いガンマ線バースト GRB090423をもとに計算している。破線はngVLAで1時間観測した場合の50検出感度を表す。

参考文献

Asada, K., & Nakamura, M. 2012, ApJL, 745, L28 Asada, K., et al. 2008, ApJ, 682, 798 Begelman et al. 1980, Nature, 287, 307 Bellovary, J. M., et al. 2010, ApJL, 721, L148 Chatterjee, S., et al. 2017, Natur, 541, 58 Combes, F., et al. 2019, A&A, 623, A79 Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama, et al. 2019, ApJL, 875, L1 Greene, J. E., Strader, J., & Ho, L. C. 2020, ARA&A, 58, 257 Guo, M., et al. 2020, ApJ, 901, 39 Hada, K., et al. 2013, ApJ, 775, 70 Hatsukade, B., 2021, ngVLA-J memo, G001 Hopkins, P. F., et al., 2008, ApJS, 175, 356 IceCube Collaboration, Aartsen, et al. 2018, Sci, 361, 1378 IceCube Collaboration, Aartsen, et al. 2018, Sci, 361, 147 Ichikawa, K., et al. 2021, ngVLA-J memo, M003 Imanishi, M., et al. 2018, ApJL, 853, L25 Imanishi, M. 2021, ngVLA-J memo, M001 Imanishi, M., et al. 2020, ApJ, 902, 99 Inayoshi, K. & Michiyama, T., 2021, ngVLA-J memo, M002 Impellizzeri, C. M. V., et al. 2019, ApJL, 884, L28 Izumi, T., Kawakatu, N., & Kohno, K. 2016, ApJ, 827, 81 Izumi, T., et al. 2018, PASJ, 70, 36 Izumi, T., et al. 2019, PASJ, 71, 111 Izumi, T., et al. 2020, ApJ, 898, 75 Izumi, T., 2021a, ngVLA-J memo C005 Izumi, T., 2021b, ngVLA-J memo M008 Kawakatu, N., & Wada, K. 2008, ApJ, 681, 73 Komissarov, S. S. 2005, MNRAS, 359, 801 Kormendy, J., & Ho, L. C. 2013, ARA&A, 51, 511 Kun, E., Biermann, P. L., & Gergely, L. Á. 2019, MNRAS, 483, L42 McKinney, J. C. 2005, ApJL, 630, L5 Nagai, H., et al. 2014, ApJ, 785, 53 Nagai, H. & Kawakatu, N. 2021, ApJ, 914, L11 Nakahara, S., et al. 2020, AJ, 159, 14 Nguyen, D. D., et al. 2021, MNRAS, 504, 4123 Nguyen, D. D., et al. 2019, ApJ, 872, 104 Nyland, K., & Alatalo, K. 2018, ASPC, 517, 451 Murase, K. et al. 2016, MNRAS, 461, 1498

Next Generation Very Large Array

Onishi, K., et al. 2015, ApJ, 806, 39 Onishi, K., et al. 2017, MNRAS, 468, 4663 Plotkin, R. M., et al. 2012, MNRAS, 419, 267 Portegies Zwart, S. F., et al. 2004, Natur, 428, 724 Sahu, N., Graham, A. W., & Davis, B. L. 2019, ApJ, 876, 155 Sawada-Satoh, S., et al. 2016, ApJL, 830, L3 Sawada-Satoh, S., et al. 2019, ApJL, 872, L21 Sawada-Satoh, S., 2021, ngVLA-J memo, M007 Spitler, L. G., et al. 2016, Natur, 531, 202 Strader, J., et al. 2012, ApJL, 750, L27 Takekawa, S., et al. 2019, ApJL, 871, L1 Takekawa, S., 2021, ngVLA-J memo, M004 Tremmel, M., et al. 2018, ApJL, 857, L22 Tsuboi, M., et al. 2017, ApJL, 850, L5 Urata, Y. & Huang, K. 2021, ngVLA-J memo M005 Wrobel, J. M., et al. 2018, ASPC, 517, 743 Yamashita, T., et al. 2018, ApJ, 866, 140 Yonetoku, D., et al. 2020, SPIE, 11444, 114442Z

3.6 ngVLAで探る恒星活動

1995年のマイヨールとケローによる太陽系外惑星発見(Mayor & Queloz 1995)から,ケプラー 宇宙望遠鏡やTESS衛星のおかげもあり,2021年7月現在4400を超える系外惑星(候補)が検出され ている。系外惑星探査の目的の一つは,太陽系,正確にいえば地球以外に生命が存在するか?, という大きな問いに答えることである。この問題に回答するため,「まずは」中心星からの放射に より液体の水が存在する温度域が惑星上で達成可能な軌道領域をハビタブルゾーン(生命居住可能 領域)と考え,ハビタブルゾーン内に系外惑星が存在する星系,特に晩期型星の星系が重点的に調 べられている。

「まずは」と前置きしたように、「中心星からの放射により液体の水が存在する温度域が維持で きる軌道」が、必ずしも生命居住可能性と直結するわけではない。地球や金星で見られるように、 惑星大気に存在する二酸化炭素等の温室効果ガスが惑星の表面温度に重要な役割を果たしているか らである。そのため惑星大気の組成は、生命居住可能性を議論する上で非常に重要である。

近年の太陽多波長観測と地球や惑星の大気研究により、中心星の紫外域放射が惑星大気の組成 や化学反応に決定的な影響を及ぼしていることがわかってきた(Airapetian et al. 2016)。また太 陽研究の成果を考えれば、中心星の紫外線放射量は星の活動度に強く依存していることが考えられ る。さらに、太陽観測史上最大の太陽フレアの1000倍を超えるエネルギーを放出するフレアが、太 陽と同じ晩期型星でも発生していることが観測されており(Maehara et al. 2012), この巨大フレ アが惑星大気に影響を及ぼすことは想像に難くない。これらの事実が示す通り、本当のハビタブル ゾーンを決めるためには中心星の活動度の情報が不可欠である。また、活動度の長期変動も惑星大 気組成に大きな影響を及ぼすだろう。

このような観点での恒星研究が,現在盛んに行われている。特に長期間かつ高時間分解能の光学 観測データである,ケプラー宇宙望遠鏡のデータを基にした研究が多くなされている。図3.6.1はそ の一例である。通常,恒星の輝度の微弱な減少を惑星が星を隠したためと考え,惑星を検出する。 ただし,中には図3.6.1上段のグラフのように輝度減少の大きさが数ヶ月の短期間で変動する場合が ある。惑星の大きさが短期間で変動することは考えづらいため,この変動は黒点の出現・成長・消 失によって形成されると考えられる。この考えを基に,恒星の黒点の面積やその時間変化を示した のが図3.6.1下段のグラフである(Namekata et al. 2020)。

¹ NASA Exoplanet Archive https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu (2021 年 7 月 19 日時点での情報)



図3.6.1 左上段:ケプラー宇宙望遠鏡で得られたKepler-17の輝度時間変動。二つの黒点群が存在し,輝度を変動させていると考えられる。左下段:輝度時間変動から求めた二つの黒点群の面積の時間変化。右:二つの黒点群の想像図(Namekata et al. 2020)

このように、ケプラー宇宙望遠鏡やその後継であるTESS衛星の活躍により、光学観測による中 心星の研究が進むと考えられるが、前述の通り、系外惑星大気に強く影響しているのは紫外線であ る。星間物質の吸収により恒星の紫外線観測は非常に困難であり、光学観測からの紫外線量推定の 研究が行われている(Melbourne et al. 2020)。一方、太陽の地球大気への影響を評価する時、太 陽からの紫外線量を推定するために電波、特にcm波帯(0.3~30 GHz帯)の太陽輝度がよい指標と して長く使われている。これは、cm波帯の電波が放射される大気層と紫外線を放射する層がほぼ 同じなためである。よって中心星からの紫外線放射量を観測的に推定するためには、cm波帯の観 測が最適である。しかしそのような観測は、晩期型星の電波放射量が既存の電波望遠鏡の感度限界 より小さいため、近年まで不可能であった。

改修後のVLA (JVLA) やアルマ望遠鏡などの超大型電波干渉計により,やっと晩期型星の彩層 から電波放射が観測できるようになった。図3.6.2は、JVLAによるG型星(τCet)のcm~mm波帯 スペクトルである (Villadsen et al. 2014)。グラフには参考のため太陽活動の極大・極小期の平均 的な電波スペクトルが示されている。ただし、太陽紫外線量推定に使われるcm波帯では上限値が 示されているだけで、実際の輝度が示されているわけではない。現在最高峰の電波望遠鏡でも、紫 外線量推定のための恒星電波観測にとって、感度がまだ足りないのである。



図3.6.2 rCetの電波スペクトル(観測データは15, 34 GHzのみ。左: Fluxスペクトラム 右: 平均輝度温度スペクトラム [7]。実線は太陽極小期,破線は太陽極大期のスペクトラム(White 2004)。

ngVLAは、JVLAの10倍の感度を達成することを目標に開発が進められている。この高感度は、 恒星のcm波スペクトルを太陽と同様に測定できることを意味し、中心星の紫外線量を推定するた めに十分な情報を提供してくれるだろう。また、フレア時の電波スペクトルを得ることができれ ば、他の波長では取得不可能な高エネルギー電子の情報を得ることができ、紫外線だけでなくフレ アで生成された高エネルギー粒子による惑星大気への影響も評価することが可能となる。さらに、 ngVLAは偏波を1%以下の精度で測定できるので、黒点由来の偏波(円偏波)した電波を捉えるこ とができ、黒点磁場の情報も直接的に得ることになるだろう。

ngVLAにて得られる恒星cm波スペクトルを理解する上で,日本の電波コミュニティーは大き なアドバンテージを持っている。それは、1950年代からcm波帯での太陽輝度モニター観測が現在 (2021年7月)まで継続されていることである。図3.6.3上段のグラフは1950年代からの1,2,3.75, 9.4 GHzでの太陽輝度と黒点数の長期変動のグラフであり、下段のグラフは、それぞれ極大期の 中でも最も活動度が高い時期(左)と、極小期でも最も活動度の低い時(右)のcm波スペクトル である(Shimojo et al. 2017)。このような長期の太陽電波データは、世界でも日本の豊川(1951 年~1994年)と野辺山(1994年~現在)での観測とカナダのドミニオン電波天文台が公表している F10.7 Index (2.8 GHz)以外になく、多周波での観測は日本の観測データが世界で唯一のものであ る。さらに日本のデータは、1994年以降の円偏波率データも存在している。これら太陽cm波スペ クトル・円偏波データ使い、ngVLAによる恒星観測データ解釈のためのテンプレートを作ることが ngVLA運用開始までの重要な課題であり、この分野の発展に対し大きな寄与が期待できる。



図3.6.3 上段:1950年代から2016年までのcm波帯での太陽輝度と黒点数の長期変動。黒:黒点数,青:1 GHz,赤:2 GHz, 橙:3.75 GHz, 緑:9.4 GHz。下段:第19太陽周期から第24太陽周期での極大期(左)と極小期(右)cm波帯太陽 スペクトル。色の違いは太陽周期の違いを示している(Shimojo et al. 2017)。

参考文献

Airapetian et al. 2016, Nature Geoscience, 8, 452 Maehara et al. 2012, Nature, 485, 478 Mayor. & Queloz 1995, Nature, 378, 355 Melbourne et al. 2020, AJ, 160, 269 Namekata et al. 2020, ApJ, 891, 103 Shimojo et al. 2017, ApJ, 848, 62 Villadsen et al. 2014, ApJ, 788, 112 White 2004, New Astronomy Reviews, 48, 1319

第4章 技術開発

本章では、観測装置の詳細を解説するとともに、国立天文台とNRAOの協力体制 について詳しく説明する。また、既存のノウハウやアルマ望遠鏡のさらなる発展の 可能性についても言及しながらngVLAへの貢献を紹介していく。

第1章で紹介した通り, ngVLAは以下の3種類の望遠鏡群で構成される予定である。

- 口径18 mのアンテナ214台で構成される「メインアレイ(Main Array)」
- 口径6 mのアンテナ19台で構成される
 - 「ショートベースラインアレイ(Short Baseline Array)」
- ・ 口径18 mのアンテナ30台を遠隔地に配置する

「ロングベースラインアレイ(Long Baseline Array)」

また,18 mアンテナ4台を単一鏡の役割として利用する予定であり,これを「トー タルパワーアレイ (Total Power Array)」と呼ぶ。望遠鏡群の中心から数百km 以内のアンテナについては,光ファイバを用いて相関器とよばれるスーパーコン ピュータに接続する。アンテナで捉えた天体からの電波を相互相関させる「相関処 理」を行うことで,アンテナ間の最大間隔(最大基線長ともよぶ)に相当する大き さの単一望遠鏡と同等の解像度が実現する。また,ロングベースラインアレイに設 置されるアンテナは,超長基線電波干渉法(VLBI)と呼ばれる技術を基に動作さ せる予定である。アンテナから相関器出力にわたる一連の処理は,精巧なアンテナ を作る技術,天体からの微弱な電波をとらえるための受信機の冷却技術,アンテナ を駆動するソフトウェア,アンテナ間の時刻同期に関わるマイクロ波フォトニクス の技術,記録した電磁波の相関処理のためのデジタル技術など,多様な技術によっ て構築されている。

米国国立電波天文台(NRAO)と国立天文台は、アルマ望遠鏡の建設・運用におい て構築した「統合コンピューティングチーム(Integrated Computing Team)」の 実績を参考に、ngVLAに必要なソフトウエアの開発と保守グループのありかたに ついて議論してきた。特に、国立天文台では、アルマ望遠鏡の建設・運用で培っ た、単一望遠鏡用のパイプラインやデータ解析の知見を用いることができるという 強みを持つ。また、後述するが、スパースモデリングのような新しいデータ処理 方法をngVLAの解析手法として国立天文台から提供することも可能となるであろ う。このように、ハードウエアだけでなくソフトウエア開発においても、アルマ 望遠鏡とngVLAの技術的な相乗効果が期待され、長期にわたるパートナーである NRAOとともにngVLAの建設、保守、運用に円滑に貢献できると考えられる。



4.1 反射型電波望遠鏡

ngVLAは非常に多くのアンテナで構成され,その数は口径18 mの望遠鏡が244台,口径6 mの望遠 鏡が19台の計263台にもおよぶ(図4.1)。

アルマ望遠鏡の建設においては、国立天文台と三菱電機株式会社が協力し、アルマ望遠鏡の合計 66台のアンテナのうち、口径7 mのアンテナ12台、12 mのアンテナ4台の合計16台を製造した。現 在、日本の12 mアンテナは、天体の輝度を正確に測るための単一鏡として活躍している。日本がア ルマ望遠鏡の建設に貢献したことにより、最高水準の技術と高精度な大型反射望遠鏡のノウハウを 獲得したといえる。ngVLAの建設により、この最高の国際水準を維持することができるうえ、国立 天文台と日本の産業界との間に有益な産学連携体制を構築できるだろう。

NRAOと国立天文台は,ngVLAの仕様を満たすアンテナの概念設計をそれぞれ独立して進めてきた。国立天文台からは,ショートベースラインアレイ(19台),ロングベースラインアレイ(30台),トータルパワーアレイ(4台)への効果的な貢献が検討されている。合計53台のアンテナを日本が製造することで,日本のngVLAへの貢献度はおよそ20%になり,目標としている数値に達する。仮に日本の予算が想定より少ない場合,これらのアンテナの一部を製造することで,ngVLAの建設に貢献することができる。

この考えのもと、国立天文台は、18 mアンテナの概念検討を2019年度に開始した。検討結果を基 に、試作に向けた発展的な検討を開始し、要求を満たすための課題を定めるのに必要な具体的な構 想が得られた。検討の中で、(1)鏡面形状の正確さ、(2) アンテナの指向方向の正確さ、の2つ の要素が特に重要であることがわかってきた。以下、それぞれ解説する。

ngVLAに用いられるアンテナは主鏡, 副鏡の2枚からなるオフセットグレゴリアンアンテナであ る。主鏡は回転放物面の一部を切り取ってできる鏡, 副鏡は回転楕円面の一部を切り取ってできる 鏡である。主鏡の大きさは, 前述の18 mと6 mのアンテナの2種類がある。詳細な鏡の形状につい ては, 観測効率を最大化するために, 放物面, 楕円面からわずかに変形させた設計となっている。 焦点位置には1回の観測につき1つの受信機を置く。ngVLAは6つの観測周波数帯を持ち, 観測周波 数帯の切り替えは各周波数帯に対応した6つの受信機を望遠鏡の焦点位置に機械的に移動させるこ とで行う。6つの受信機は, 天体からの微弱な信号を検出するために, クライオスタットと呼ばれ る真空冷却容器の中で冷却される。



図4.1: ngVLAの予想図。現在,カール・G・ジャンスキー大型ミリ波センチ波干渉計のあるアメリカ,ニューメキシコ州サン・ アグスティン平原を想定している。 クレジット: Sophia Dagnello, NRAO/AUI/NSF。

主鏡副鏡の面の粗さや、重力、風、気温の変化による両鏡面の変形は、望遠鏡の性能を左右する重要な検討項目である。これらの原因による鏡面の設計値からのずれは、天体からの信号を歪ませ、 観測効率の低下を招く。鏡面変形のすべての寄与を足し合わせて、18 mアンテナの場合、設計値からのずれを160 ミクロン(0.16 mm)以下に抑えることが要求されている。これは、髪の毛2本分の太さに相当する。この要求値は、低コストで大型アンテナを作るという制約を考慮すると、極めて厳しい。高精度な切削技術を用いれば、この要求値は比較的容易に達成できるが、非常に費用のかかる方法となるだろう。一方、鋳造のような安価な製造方法では、要求値を満たすことが難しいだろう。要求値を満たすことのできる、低コストで高精度な製造方法が必要である。

もう一つの鍵となる要素はアンテナの指向精度である。これは、観測中のあらゆる温度、風荷重、 アンテナの姿勢に対して、アンテナを向けた方向と観測したい方向の間の角度を3秒角(1200分の1 度)以内に抑えるという要求である。大きな望遠鏡ほど、この要求値を満たすことが難しくなる。 アルマ望遠鏡の建設、運用の経験が役に立つと期待される。

国立天文台は、現在、ショートベースラインアレイとロングベースラインアレイに対する技術要求 の策定に関わっている。今後は、トータルパワーアレイや遠隔地に配置されるアンテナに対する追 加の要求がありえるだろう。日本がngVLAに貢献することは、日本の望遠鏡の製造技術を維持する とともに、今後の産業界の技術力の発展にとって鍵となると期待される。

先に述べたように、国立天文台は18 mのアンテナだけでなく、6 mのアンテナにも貢献できるだろう。このような貢献の仕方はアルマ望遠鏡の12 mアンテナと7 mアンテナを製造した状況と似ている。厳しい技術的要求と低コストという制約の中、既存の概念設計を基に、異なる大きさのアンテナを設計するノウハウを持っていることは国立天文台のもう一つの強みである。

望遠鏡開発は多大な費用がかかるものであり、大きな予算なしに進めることができない。電波天文 学に携わる研究者および技術者のサポートがより強固なものになるまでの初期の段階では、国立天 文台は産業界と連携して,概念設計と技術的課題の解決方法を探っていく予定である。並行して, 国立天文台は6mアンテナとトータルパワーアレイ用の18mアンテナの技術的仕様の策定,関連す る技術的検討についてNRAOを支える形で進めていく予定である。

4.2 受信機と冷却システム

ngVLAの観測対象周波数範囲は1.2-116 GHzで,この帯域を6つの周波数帯に分割して,天体から の信号を捉える。そのうち2つの低周波帯,バンド1 (1.2-3.5 GHz)とバンド2 (3.5-12.3 GHz) は 超広帯域技術,バンド3 – 6は導波管技術を適用する予定である。国立天文台は超広帯域技術につい てはあまり多くの経験を有していないが,導波管技術についてはアルマ望遠鏡用の受信機や野辺山 宇宙電波観測所の口径45 m電波望遠鏡受信機開発によって培われてきた。特に,ngVLAのバンド 5 (30.5-50.5 GHz)とバンド6 (70-116 GHz)はアルマ望遠鏡のバンド1 (35-50 GHz),バンド2 (67-116 GHz)に近い周波数範囲である。国立天文台はアルマ望遠鏡バンド1と2の光学設計,シス テム検討,そして直交偏波分離器などの導波管コンポーネント設計に取り組み,技術的ノウハウや 専門的知識,そして,知見を積み重ね,受信機の設計に貢献してきた(Gonzalez et al. 2017, Tapia et al. 2017, Yagoubov et al. 2020)。これにより開発パートナーとしての役割を果たし,国際的な信 頼を獲得してきたのである。

各望遠鏡にはバンド1から6の各受信機がそれぞれ1つずつ搭載されることから,各受信機に必要な 部品は,アンテナ総数263台分に修理用の予備部品を加え,全部で約300台分をそれぞれ製造しな ければならない。受信機に使用される部品は特殊なものが多く,このような大量の部品生産は, 製作にかかわる研究機関や産業にとって課題の1つとなると予想される。国立天文台は,アルマ望 遠鏡用の3種類の受信機(バンド4,8,10)を製造した経験を有しており,73台分の各種部品の製造 や試験を各バンドで実施してきた(Asayama et al. 2014, Satou et al. 2008, Gonzalez et al. 2014)。 ngVLAでは一つの周波数帯あたりの受信機数がアルマ望遠鏡の4倍ほど多いことになるが,アルマ 望遠鏡での経験はngVLAの量産に資するものになるだろう。特に,国立天文台先端技術センターで は,高周波回路の特性を測定する装置,光学系の評価装置や,光学系の一部に使用される誘電体材 料の特性評価システム,そして,アルマ望遠鏡の建設,保守,開発で構築した受信機評価システム を保有している。これらの設備は最小限の修正を加えるだけで量産試験に対応可能である。

また近年,国立天文台では電波天文用導波管部品の金属3Dプリンタ技術による製造に取り組んでいる(Gonzalez et al. 2020)。本技術を用いることにより,国立天文台で部品の内製が可能となり, また,製作時間やコスト等の観点で量産に有利になる。受信機システムの中で,金属3Dプリンタを 用いて製造可能な部品については,NRAOと議論を進めており,コルゲートホーン,直交偏波分離 器,そして,他の導波管部品などが対象となる(図4.2)。



図4.2 金属3Dプリンタで製造した部品の写真(左)35-50 GHz帯コルゲートホーン(右)一体化して製作した67-116 GHzコルゲートホーンと直交偏波分離器。

直交偏波分離器(OMT)は、国立天文台がアルマ望遠鏡の開発経験に基づいて設計および製造が できる主要な部品の一つである。まず、アルマ望遠鏡では、バンド4(125-163 GHz)、バンド5 (163-211 GHz)、バンド8(385-500 GHz)受信機に対して高品質なOMTの設計・製造を経験し ている(Aasayama and Kamikura 2009, Belitsky et al. 2018, Kamikura et al. 2010)。また近年、ア ルマ望遠鏡の性能向上・機能拡張を目指して進めているミリ波サブミリ波帯広帯域受信機の開発 において、67-116 GHz (Gonzalez and Asayama 2018)や275-500 GHz帯 (Gonzalez and Kaneko 2021)で、低挿入損失、交差偏波特性、高い偏波分離度を有する高性能OMTを実現している。67-116 GHzはngVLAバンド6の帯域をカバーしており、バンド3-5に対してもスケールアップをする ことでOMTの開発が可能である(Gonzalez et al. 2020)[図4.3]。



図4.3. (左) アルマ望遠鏡バンド 2 直交偏波分離器 (OMT) を最適化し, 再設計したngVLAバンド5 (30.5-50.5 GHz) OMTの概略図 (右) ngVLAバンド3から6におけるOMTの反射特性のシミュレーション結果。横軸は各バンドの最低周波数に対する動作周波数の比を示す。すべての周波数帯で両偏波とも反射が0.4% (-24 dB) 以下に抑えられている。

国立天文台は,導波管部品だけでなく,受信機の機械設計や各システム検討においても豊富な経験 を有している。機械設計に関しては,NRAOと協力して,製造や将来の保守簡略化のための最適な 設計解を検討・調査している。また,他のシステムについて以下の2つの面から検討を始め,建設 段階で直面する課題についても対応する予定である。

バンド6受信機出力部の検討:

バンド6受信機の信号出力には、基本設計では導波管によるミリ波信号の伝送を予定しているが、 同軸ケーブルもコストや運用において魅力的な選択肢となる。一方で、同軸ケーブルは導波管より も信号の損失が大きいという特性もある。国立天文台では高周波における同軸ケーブル利用の可能 性について検討を進めていく予定である。

クライオスタット用の真空窓および赤外線フィルタの設計:天体からの微弱な信号を捉えるため に、受信機はクライオスタットよばれる真空冷却容器に収納され、極低温に冷却される。クライオ スタットは金属で囲まれた箱であり、いわゆる魔法瓶と同様の構造を持つ。一方、内部の真空冷却 状態を維持しながら天体からの信号を受信機に導くためには、電波の「窓」が必要である。これを 満たすために、クライオスタットの最外部には真空窓、また、内部には赤外線を介して流入する熱 を遮断するための赤外線フィルタを設置し、これらは電波に対して透明でなくてはならない。真空 窓や赤外線フィルタは受信機の前段に設置されるものであることから、究極の受信機性能を実現す るためには、これらの電波に対する透過特性を評価し、よく理解しておく必要がある。国立天文台 はアルマ望遠鏡のバンド1、2、4、10の開発や製造段階で、これらの部品の効果や影響を詳細に検 証してきた。NRAOのチームと協力し、ngVLAの受信機部分の設計に対してこの知見を活用してい く予定である。

最後に,冷却システムとその技術について説明する。 ngVLAの冷却システムを最適化しベストな 設計解を得るためには,責任の一端を担う国立天文台が,技術課題や要求に関して産業界と適切に コミュニケーションをとり,橋渡しをしていく必要がある。クライオスタット等の冷却システムの 設計,実装,製造については,国立天文台と産業界が連携し,検討を開始している。国立天文台で はアルマの保守や多くのプロジェクトを通じて住友重機械工業株式会社と関係を築いてきた。この ように産業界と連携することで,装置の設計を最適化し,運用時の消費電力や運用コストの低減が 期待される。また,建設期にクライオスタットの設計や製造に関わることは,国立天文台のノウハ ウを実用化し,日本の産業界を巻き込む貴重な機会ともなる。過去の事例としては,野辺山 45 m 受信機用クライオスタットや,アルマ望遠鏡受信機の開発およびメンテナンス時の試験用クライオ スタットなどが挙げられる。

4.3 デジタル技術

国立天文台はアルマ望遠鏡の建設期においてアタカマコンパクトアレイ(ACA, 愛称「森田アレ イ」)相関器の開発に貢献した。ACA相関器(図4.4)は12台の7mアンテナと4台の12mアンテナ からなるACA からの信号を処理する。この相関器はFPGA(Field-Programmable Gate Array)技術 を用いて富士通株式会社と共同で構築したものであり, ACAからの時系列信号を周波数成分に分解 し、単純な掛け算を実行することで演算を行うFX型を実装している。この方式は2000年代中期か ら2010年代初期かけて利用されてきた。



図4.4 標高5000 mのALMAサイトに設置されているACA相関器の写真

近年,国立天文台は東アジアにおけるアルマパートナーの1つである韓国天文研究院(KASI)と共同でGPU(Graphics Processing Unit)技術を使った分光器の開発・製造を行ってきた。この分光器は、GPUカードに実装されたソフトウエアとして扱えるため、必要に応じて容易にアップデートすることができる。そのため、柔軟に分光器を構築でき、また、既製品のGPUを使うことでコスト削減を図ることも可能である(図4.5)。



図4.5 製造の最終段階にあるACA分光器のハードウエアの(左)機器全体と(右)GPUサーバーの内部の写真

このように、国立天文台は相関器および分光器の設計・構築経験を有し、ngVLA用のデジタル信 号処理コンピュータの設計と製造をNRAOと共同で進めることができる。これらはFPGAあるいは GPU技術,または、それらの組み合わせにより構築される予定だが、蓄積してきた知識を有効に活 用して開発に参画することができるだろう。

現時点では、単一鏡によるトータルパワーアレイ観測の信号をデジタル分光器で処理するか未定だ が、ngVLAでは電波干渉への耐性を持たせるために、信号処理の標本化の階級数(ビット数)は アルマ望遠鏡よりも大きな値が必要になる。従来の低いビット数での自己相関処理と比較すると、 大きなビット数によって線形性やダイナミックレンジの改善が期待できる。しかし、現在提案して いるビット数が主要な科学目標を達成するために十分かどうかは今のところ明らかではない。そこ で、既存のシステムと主要なサブシステムの仕様を評価し、追加の技術要件が必要になるかどうか を検討するトータルパワーワーキンググループが新しく設置された。これはトータルパワーの信号 を処理するためにどのような機器が必要となるか、相関器による自己相関処理か、専用の分光器を 用いるのかを判断するうえで重要なプロセスになる。後者の場合、国立天文台はアルマ望遠鏡の最 新の経験を活用でき、GPU技術を使った機器開発に貢献できるだろう。

4.4 時刻·周波数配信

ngVLAの各アンテナは放射状もしくは数珠つなぎ状に光ファイバ経由で接続され,中央局が時刻・ 周波数の配信を行なうことで,どのアンテナでも同じ時刻・周波数を参照することができる完全同 期系となる。ngVLAで扱うような高周波数(1.2 GHzから116 GHz)の信号を検出する電波干渉計 では,高周波数のままでは扱いにくいため周波数変換という操作を行う(図4.6)。



図4.6 天体からの信号と基準周波数信号。基準周波数の信号を使うことで、高い周波数帯にある天体からの信号を低い 周波数帯(天体の信号の周波数と基準周波数の差)に移動させる。

周波数変換を行うために、高安定な高周波基準周波数が各アンテナに配信される。各アンテナで は、配信された基準周波数を基に、天体からの信号は低周波の信号に変換され、最終的にデジタル 信号としてデータ収集される。周波数変換は、各アンテナで全く同じ量の「周波数の大下駄」を除 くための手法で、その「周波数の大下駄」が各アンテナで異なっていたのでは電波干渉計は成立し ない。低周波の基準信号を配信し、各望遠鏡で基準信号を逓倍(×N倍)して高周波の周波数変換 を行うことも考えられる。

例えば10 MHzの基準信号を伝送し,各アンテナで「周波数の大下駄」である100 GHzの周波数変 換用信号を発生させるとしよう。基準信号の位相でわずかに1度の揺らぎがあると「周波数の大 下駄」である周波数変換用信号で10000度の位相揺らぎとなってしまう。これは周波数の揺らぎに 換算すれば,0.3 GHzほどのずれに相当する。各アンテナでの温度変動や外乱雑音は独立であるの で,逓倍によって「周波数の大下駄」へ入り込む変動を抑えるのは容易ではない。このため,原子 周波数標準から高安定な高周波基準信号を発生させ,ファイバによる伝送位相を補償するマイクロ 波フォトニックスシステムの開発が重要となる。基準信号の高周波化は,アンテナ内部での基準信 号の逓倍比を小さく抑え,逓倍器の不安定性による安定度の劣化を防ぐ反面,高周波高安定基準信 号発生技術及び長距離伝送位相補償技術が要求される。

4.4.1 高周波高安定基準信号発生技術

光源としてのレーザには,後段の伝送位相補償技術で必要となる線幅(図4.6の横軸方向の信号の 広がり)の細いレーザ(<100 Hz,できるだけ周波数に混じり気のないレーザ光)を用いる。通常 環境下におけるレーザ波長の安定性に特段の要求は必要としない。原子周波数標準から発生させた 高安定な電気基準信号は,光変調器を用いて2つの光の周波数(位相)差として発生する。高消光 比LN 変調器(LiNbO₃ Mach-Zehnder optical intensity modulator: 図4.7)では,光源のレーザ信号 に対し周波数変換操作(ミキシング)が行われ,変調マイクロ波周波数(電気基準信号)だけ離れ た2つの波長(周波数)の光が得られる(Kiuchi et al. 2007)。

各アンテナで,高消光比LN変調機を用いて発生させた2光のうなり(ビート信号)を電気的に 取り出すことで基準信号が得られる(図4.8)。2光は光源レーザと同一の波長分布(光スペクト ル)を持っているため,2光の波長の差は影響を受けない。その結果,アンテナで取り出された電 気的な基準信号は入力レーザの安定度などに依存しない高位相安定性な光基準信号が得られる。 位相安定度はアラン偏差というグラフ(図4.7の右図,図4.11)で表され,時間に反比例(-1次の 傾き)し,値が小さいことが位相の揺らぎが少ないことを表している。電波干渉計では,時間に反 比例しない成分は大きな損失につながる。原子周波数標準精度での高安定周波数信号配信手段を ngVLAに提供するため,ファイバ結合された望遠鏡での信号純度をアラン偏差で位相安定度10の -13乗(1秒)より安定な信号の実現を目標としている。



図4.7 高周波高安定基準信号発生



図4.8 波長の異なる2つの光とその混合によるうなり。

4.4.2. 長距離伝送位相補償技術

光ファイバ伝送では、伝送に用いる光の波長に依存して光の進む速さが異なる波長分散という現象 が生じる。異なった光波長間で中央局からアンテナへの到達時間が異なるという厄介な問題が発生 する。2光の周波数の差として目的の高安定基準信号を伝送する本方式では、各アンテナに配信さ れた基準信号を同一ファイバを用いて中央局に戻すことで、伝送ファイバ由来の変動補正を行う。 特徴は、2光波でそれぞれ独立に同一ファイバ内の往復時間を測定し、その時間差をゼロにするこ とで波長分散補償を行い、位相安定な周波数の長距離伝送を可能にしている。このために、同一 ファイバ内の往復伝送による伝送時間測定方法2種を開発した[高周波用(20 GHz~THz以上): 図4.9、低周波用(~40 GHz):図4.10]。ファイバで伝送されるマイクロ波信号は光信号波長 λ 1 と波長 λ 2の差として伝送され、伝送先で僅かに周波数シフトされ、戻りの信号波長 λ 3と波長 λ 4となる。

高周波用の場合(図4.9)A-B=a-b= $\lambda_2 - \lambda_1 - (\lambda_4 - \lambda_3)$ であるため、光のフィルタ分離で容易にa とbを取り出せ、a-bから往復時間差を測定できる。A、Bは伝送周波数に依存するが、a、bは周波数 シフタの2倍の周波数で伝送周波数に依存しない。このため高周波用では、使用可能周波数の上限 はない(Kiuchi et al. 2017)。

低周波用の場合(図4.10)は、AとBの分離を光信号で行うのが難しいため電気信号としてaとbとして取り出し、送信元の周波数Aで周波数変換し上下側波帯に分離することで往復位相差を測定できる(Kiuchi et al. 2011)。いずれの場合も、検出された2信号の到達時間の差が伝送路によって生じたもので、2信号位相を同一位相に制御することで伝送信号を安定に伝送することができる。

この手法を用いると,実時間処理方式でもソフトウエアでの後処理方式でも波長分散補償が可能で ある。電波干渉計で観測する天体からの信号は微弱で積分処理が必須である。また,高周波信号受 信時の大気位相揺らぎ補正はデータ積分後に行われる。このため,ソフトウエアでの後処理方式で の伝送補正は電波干渉計と整合性が良い上にシステムがシンプルになりコスト面で特段に有利である。



図4.9 高周波用伝送位相補償技術



図4.10 低周波用伝送位相補償技術

最新結果(図4.11)では100 GHzの高位相安定信号(原子周波数標準相当の安定度)の100 km伝送 を実現しています。



図4.11 100 GHz 100 km 伝送

4.5 ソフトウェア

4.5.1 アルマ望遠鏡や国立天文台の既存プロジェクトとのシナジー

ngVLAのソフトウェアの開発,運用,および,保守は,プロジェクトに参加する複数の国にまたが る,国際的なソフトウェア・チームによって行われる。このように国際的に分散したチームによる 活動は,各国の知見や技能,経験を生かす長所があると同時に,特有の困難も伴う。例えば,日本 とアメリカ合衆国の間では時差が大きいため(ニューメキシコ州との時差は16時間),日中に頻繁 にやり取りすることが難しく,コミュニケーションの効率が悪くなる場合がある。幸にもNRAOと 国立天文台は,アルマプロジェクトを通じて,15年以上にわたって統合コンピューティング・チー ムとして活動してきた実績がある。アルマ望遠鏡では,ソフトウェア・チーム全体を統括する統合 コンピューティング・チームを組織して全体の調整を行っている。一方で,各国にあるソフトウェ ア・チームが日々の活動を管理して,各々が分担するソフトウェアの開発,保守を行なってきた。 ngVLAでも,アルマ望遠鏡で成功したこの組織モデルを採用することで,NRAOと国立天文台の間 でこれまで培ってきた連携や信頼関係を生かすことができる。

ngVLAのソフトウェアは、VLAなどで利用されているNRAOの既存のシステムを拡張して開発する 予定である。実は、この拡張によって最終的に目指すシステムのデザインは、アルマ望遠鏡のソフ トウェア・システムと非常によく似ている。そのため、ngVLAのソフトウェア・システムに対する 機能要求は、アルマ望遠鏡で既に実用化されているものと類似している。事実、ngVLAでは約50% のソースコードについて、既存のアルマ望遠鏡やVLA向けのプログラムを再利用できると見積もら れている。従って、国立天文台のソフトウェア・チームはソフトウェア開発でもこれまでのアルマ 望遠鏡での経験を利用することができるのである。 例えば、国立天文台は特にngVLAに含まれる単一鏡望遠鏡のデータ処理ソフトウェアの開発に貢 献できると考えられる。ngVLAは、観測データの処理にCommon Astronomy Software Applications (CASA)をベースにしたデータ処理パイプライン(以下,CASA Pipelineと呼ぶ)を利用する計 画である。このCASA Pipelineはアルマ望遠鏡のデータ処理にも使われており、国立天文台は15年 以上に渡るCASA Pipelineの開発実績を持つ。特に、CASA Pipelineの単一鏡望遠鏡のデータ処理機 能は、これまで国立天文台のチームが単独で開発してきた機能である。CASA Pipelineは干渉計と 単一鏡の観測データ両方の処理機能を持つが、この2つは全く異なるデータ処理の方法を用いる。 そのため、単一鏡望遠鏡のデータ処理には特有のノウハウが必要であり、その機能を提供するこ とは、国立天文台独自の貢献となることが期待される。CASA PipelineをngVLAで利用するために は、ngVLAの周波数帯に特有の、強い無線周波環境(RFI: Radio Frequency Interference)の影響 への対応など、新たな拡張が必要だが、相当部分のソースコードはアルマ望遠鏡のための機能と共 有できると考えらる。国立天文台のソフトウェア開発チームは、これまでの経験を生かしてCASA Pipelineの開発にも極めて効率的に貢献できるであろう。

また,ngVLAは,観測所によるデータ処理を経て生成された天体画像から天体カタログを生成する ことを計画している。これまでのところ,このカタログの規模は明らかではないが,規模が大きく なった場合,分散データベース技術の導入が有益である。国立天文台は,すばる望遠鏡の超広視野 主焦点カメラHyper Suprime-Cam のアーカイブで数十億天体のカタログを効率的に検索するため に,Apatche SparkとHadoop Distributed File Systemを併用した分散アーカイブ・システムを開発 し,試験している(Furusawa et al. 2020)。

その他にも、アルマ望遠鏡での経験から国立天文台がngVLAに貢献できると考えられる分野として 以下が挙げられる。

- ・ GPUやFPGA技術を利用した相関器ソフトウェアの開発(4.3参照)
- ・ 仮想化技術(dockerなど)を用いたソフトウェア開発, 試験, および, インストールの効率化

4.5.2 ngVLAに向けた技術開発

ngVLAでは、アルマ望遠鏡やVLAに比べて大幅なデータ生成率の増大が見込まれており、これはソ フトウェア・システムにとっての大きな挑戦となる。ngVLAのデータ生成率の見積もりは平均7.64 GB/秒で、これはアルマ望遠鏡やVLAの約1,000倍に相当する。 観測データの生成にデータ処理が 追いついくためには、データ生成と同程度のデータ処理のスループットが要求される。これを達成 するために必要なデータ処理能力は約323 Peta FLOPs/秒と見積もられている。

このような大規模な計算機能力を実現するため,ngVLAのデータ処理計算機システムはオンプ レミスの計算機クラスターと外部サービス(例えば,Open Science Grid, Amazon Web Services (AWS), the Extreme Science and Engineering Discovery Environmentなど)を併用したハイブ リッドシステムになると考えられる。オンプレミスの計算機クラスターは,高い利用率で運用し, ある一定規模の観測データまでを処理する一方,外部サービスはその範囲を超えた観測データの処 理に利用することが考えられる。効率的に低コストでデータを処理するためには,計算機リソース の適切なマネジメントが鍵になる。そのためには,データ処理に必要な計算機リソースを正確に見 積もることと、外部リソースの利用にかかるコストを考慮して、適切なシステムにジョブを投入す ることが重要である。国立天文台は国立情報学研究所と共同で、AWS上でCASAでの画像合成に必 要なリソースの見積もりについての調査を始めている。現在はアルマ望遠鏡のデータを利用してい るが、将来的にはこの調査をngVLAの観測データを想定した調査に拡張することが有益であると考 えられる。

ngVLAでは、データ生成率の増大によって、ユーザが観測データ・アーカイブからダウンロードす るデータのサイズも増大する。そのため、大きな観測データや天体画像をダウンロードする前に、 データの中身を確認できる機能が非常に重要になる。これを実現する方法として、バーチャル天文 台の利用が挙げられる。ngVLAのデータ処理済みの天体画像をバーチャル天文台に登録することに よって、オンラインでの画像データの確認が可能になるだけでなく、同じ領域を観測した別の望遠 鏡や他の波長で観測したデータへのシームレスなアクセスが可能になるという利点もある。このよ うな機能は今後のマルチメッセンジャー天文学の時代に不可欠と言えるであろう。

国立天文台が公開しているJVO(Japanese Virtual Observatory)は、アルマ望遠鏡、ハッブル宇宙 望遠鏡、すばる望遠鏡などの世界の天体望遠鏡の観測データを相互連携している。また、JVOは WebQLなどの軽量で多機能なクイックルック機能を提供していて、画像をダウンロードすること なく、ウェブブラウザ上で三次元画像キューブを調査することができる(図4.12)。ngVLAの観測 データをJVOに登録することは研究者にとって非常に有益と考えられる。



図4.12. JVOが提供するWebQLの表示例。ALMA望遠鏡のBand 6で観測したM83銀河の3次元画像を使用した。積 分強度図 (カラー・マップ)と,選択した領域 (白の四角)のスペクトル・プロファイル (黄色の線)。画面下部の目盛りは様々 な分子輝線の周波数を示している。

ngVLAが推進する科学にとって,高解像度の画像を生成する能力は非常に重要である。ngVLAで は伝統的な画像生成アルゴリズムであるCLEANを利用する予定だ。CLEANは実績のある画像生成 アルゴリズムである一方,生成する画像の分解能に限界がある。CLEANでは,計算量の削減のた め,観測したビジビリティをuv空間上の等間隔の格子上にマップした上で高速フーリエ変換を行 う。この時に,uv空間の特定の格子位置に対応するビジビリティの測定がない場合はゼロ埋め操作 が必要になり,これによって合成画像のビームが広がったり,サイドローブの影響で画像の質が落 ちることがある。

スパース・モデリングは、干渉計の画像を生成する比較的新しいアルゴリズムである。ビジビリ ティを等間隔格子上にマップする操作が不要なため、CLEANに比べて高解像度の画像を生成でき る利点がある。また、ngVLAの観測をシミュレーションしたデータを用いて、画像生成をCLEAN と比較した試験では、天体の輝度分布の特徴をより正確に再現できるという結果が得られている (図4.13)。スパース・モデリングを使った画像生成は、ngVLAにとって有益な選択肢となると考 えられる。国立天文台は、統計数理研究所、東京大学、NRAOなどの研究者と共同でスパース・モ デリングを用いた画像生成アルゴリズムをCASAで利用されているライブラリに実装している。こ れまでのところ、このアルゴリズムは実験的なもので、VLBIやALMAの観測データを利用した試 験が行われている。ngVLAでの利用に向けては、大幅な処理の高速化や、セルフ・キャリブレー ション機能の実装などの拡張が必要になる。



UniDisk222pc - Scale: 1.0

図4.13. スパース・モデリングとCLEANで生成した画像の比較 (Akiyama & Matthews, 2019, ngVLA Memo 66の 図6より)。近傍のAGB星や赤色超巨星の表面の輝度分布を模したモデル画像 (Groundtruth) をngVLAで擬似観測し たデータを, スパースモデリング (SMILI) とマルチ・スケールCLEAN (CASA) で像合成した。比較のため, Groundtruth とSMILIの画像をCLEANの合成ビームでスムージングしてある。右端の列はスムージングしたGroundtruthとSMILI, CASAで生成した画像の残差をピーク電波強度で規格化したマップ。中列のSMILIとCASAの画像を比較すると, スパー スモデリングを使ったSMILIの方がモデル画像の輝度分布 (特に暗い部分)を正確に再現していることが分かる。

参考文献

Akiyama & Matthews 2019, ngVLA Memo 66 Asayama & Kamikura 2009 J Infrared Millim Terahertz Waves, 30, 6 Asayama et al. 2014, PASJ, 66, 3 Belitsky et al. 2018, A&A 611, A98 Kamikura et al. 2010, IRMMW, 31 Gonzalez et al. 2014, Proc. SPIE 9153, 91530N Gonzalez et al. 2017, J Infrared Millim Terahertz Waves, 38, 10 Gonzalez & Asayama 2018, J Infrared Millim Terahertz Waves, 39, 8 Gonzalez et al. 2020, IEEE-S AP González et al. 2020, Proc. SPIE 11453, 114533S Gonzalez & Kaneko 2021, IEEE TST Yagoubov et al. 2020, A&A 634, A46 Satou et al. 2008, PASJ, 60, 5 Tapia et al. 2017, J Infrared Millim Terahertz Waves, 38, 3 Kiuchi et al. 2007, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 55, 9 Kiuchi 2011, IEEE Photonics Journal, 3, 1 Kiuchi 2017, IEEE Trans. Terahertz Sci. and Technol., 7, 2



第5章 結論

ngVLAは、合計263台の高精度アンテナを北米大陸に設置し、最大で約9000 km の口径に相当する望遠鏡を実現する次世代の大型電波望遠鏡計画である。本稿で は、その概要、科学目標、技術開発、米国と日本における検討状況、日本の貢献可 能分野等についてまとめた。ngVLAは、現在稼働中のJVLA およびアルマ望遠鏡よ りも約10倍高い集光力と解像度を実現する。この比類ない感度と解像度により、 荷電粒子が磁力線の影響を受けて加速する際に放つシンクロトロン放射,星々の間 に浮かぶ塵が温められた際に放つ熱的放射、分子や原子が放つ輝線や吸収線スペク トル等を効率よく観測することが期待される。これらの観測から、惑星形成と惑星 系円盤、星形成と星間化学、銀河進化、中性子星の研究、ブラックホール進化とマ ルチメッセンジャー天文学,恒星活動分野においてngVLAは大きなインパクトを 与えることになるであろう(詳細は第3章)。また、他波長の電磁波望遠鏡はもち ろん、重力波や粒子線などの非電磁波的手段による天体観測、さらには隣接分野の 研究とも協調して、天体形成及び物質進化、宇宙開闢から生命の発現に至る 過程の理解を飛躍的に深めることになると期待される。加えて、アルマ望遠 通する様々な対象に対して相補的情報を得ることで、アルマ望遠鏡単独では得られ ない質的に異なる理解が導かれる。ngVLAの建設においては、アルマ望遠鏡の建 設及び開発を通じて培われた技術を土台に他国では真似ができない貢献が可能であ る。具体的には、受信機のデザインと製造、時間周波数標準信号の分配のほか、メ インアレイ以外のアンテナ製造や冷凍機系、コミッショニングやソフトウェア開発 などが挙げられる(第4章参照)。運用面においても,ngVLAはアルマ望遠鏡と共 通の共同利用モデルを持っており、アルマ望遠鏡で蓄積されたノウハウを最大限 活用できるという大きなメリットがある。また, ngVLAが観測する周波数帯(1.2-116 GHz)は日本でも観測可能であるため、国内の派生プロジェクト立案へとつな げていくことも期待される。ngVLAのためにコミュニティが一体となって行う技 術開発を通じて、国内での観測活動の一層の発展とそこでの人材育成に、大きな波 及効果が見込める。今後米国では大規模な予算要求に進み、その後2029年の初期科 学運用に向けて建設が開始される予定である。これに並行して、日本国内の活動も 加速していき、科学的な検討を引き続き強化し、技術的な検討や検証実験にも本格 的に着手していく予定である。



著者一覧(50音順)

伊王野大介(国立天文台) 今田 大皓(国立天文台) 鵜澤 佳徳(国立天文台) 金子 慶子(国立天文台) 木内 等(国立天文台) 小嶋 崇文(国立天文台) Alvaro Gonzalez(国立天文台) 坂井 了(国立天文台) 下条 圭美(国立天文台) 杉本 香菜子(国立天文台) 之原 研悟(名古屋大学) 永井 洋(国立天文台) 新沼 浩太郎(山口大学) 百瀬 宗武(茨城大学)

発行日:第1版 2021年10月8日 発行者:自然科学研究機構国立天文台 編者:伊王野大介,今田大皓,鵜澤 佳徳,金子 慶子,木内等,小嶋 崇文,Alvaro Gonzalez,坂井了,下条 圭美,杉本 香菜子, 立原研悟,永井洋,新沼浩太郎,百瀬 宗武 制作:株式会社 LINICA

The Next Generation Very Large Array (ngVLA) is a development project of the National Radio Astronomy Observatory (NRAO). NRAO is a facility of the National Science Foundation (NSF) operated under cooperative agreement by Associated Universities, Inc. This material is based upon work supported by the NSF under Grant No. AST-1519126. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in the materials are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the National Science Foundation.



















