

# ALMA extended array (アルマ拡張アレイ)

亀野 誠二 (鹿児島大学), 中井 直正 (筑波大学), 本間 希樹 (国立天文台)

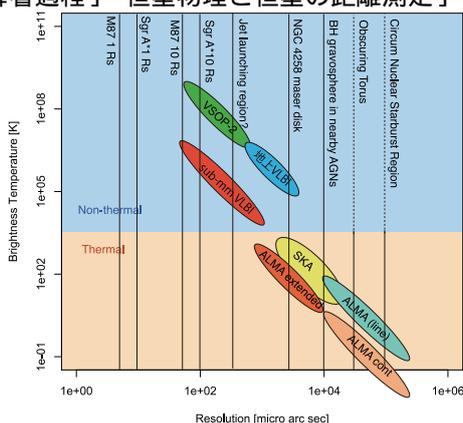
## 概要

ALMA 拡張アレイは、ALMA の周囲 300 km の範囲に ALMA と同型のアンテナを 5 局配置し、1 mas を切る分解能と 1000 K 以下の輝度温度感度を実現することで、「VLBI の解像度で熱的宇宙を探る」計画である。従来の VLBI では観測対象が輝度温度が非常に高い非熱的放射（シンクロトロン放射やメーザー）に限られていたのに対して、熱的放射が観測できることで多様な天体現象に研究分野が広がる。初期宇宙のサブミリ波銀河における大質量ブラックホール形成、近傍 AGN への質量降着過程、銀河系内の恒星視直径計測による測距、近傍の恒星表面撮像など、電波天文学が多様な分野に新しい切り口をもたらす。

We propose to append five 12-m antennas within 300-km to realize high angular resolution of  $< 1$  mas and sensitivity to detect  $T_b < 1000$  K. This ALMA extended array offers a new parameter space of “thermal universe with a VLBI resolution” to expand the realm of VLBI, which was so far limited in non-thermal high-brightness emissions such as synchrotron and maser. Proposed science case includes black-hole formation in sub-mm galaxies, mass accretion processes onto AGN engines, imaging stellar photospheres, distance measurements of stars, and so on. The array also functions as a part of sub-mm VLBI that targets black-hole imaging, and contributes to establish technologies on sub-mm coherence that is critical for the ALMA enhanced array. We discuss about technical and practical issues to realize the plan.

## 1 科学的意義

本提案の ALMA 拡張アレイは、ALMA と同じミリ波・サブミリ波の波長域で、1 mas を切る高空間分解能と、1000 K の輝度温度感度をもたらすものである。「VLBI の解像度でさぐる熱的宇宙」には様々な応用例が考えられる。ここでは、柱となる「銀河形成と巨大ブラックホールの成長」「活動銀河核 (AGN) への質量降着過程」「恒星物理と恒星の距離測定」を述べる。

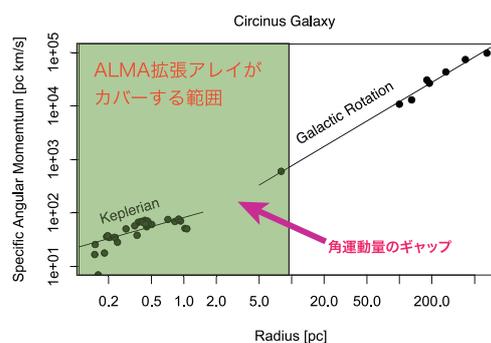


角分解能と輝度温度のパラメータ空間における、様々な電波干渉計の位置付け。ALMA 拡張アレイは VLBI の分解能で熱的宇宙を観測できる装置である。

### 1.1 銀河形成と巨大ブラックホールの成長

$z \sim 10$  の銀河が発見され (Bouwens et al., 2011)、ASTE でサブミリ波銀河が多数見つかる (Tamura et

al., 2009, 2010) など、宇宙初期の星形成・銀河形成のサーベイが進んでいる。 $z = 7.085$  のクェーサーが見つかった (Mortlock et al., 2011) ことから、銀河中心核の巨大ブラックホールを宇宙初期に形成するメカニズムの解明が求められている。初期宇宙における銀河中心核の活動性を探索する上で、ALMA 拡張アレイの分解能と感度が要求される。



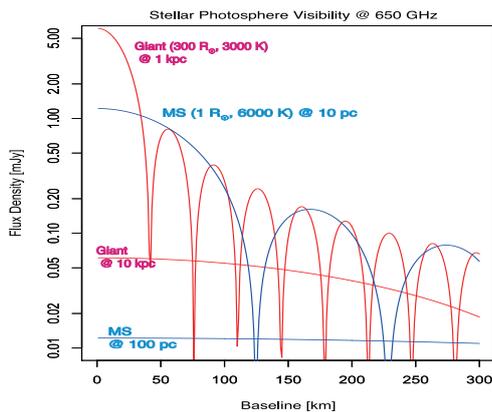
近傍の活動銀河 Circinus galaxy における、比角運動量の半径に対する分布。10 pc より外側は分子ガスや恒星の分光観測 (Oliva et al., 1994; Maiolino et al., 2000) で、1 pc より内側は H<sub>2</sub>O メガメーザーの VLBI 観測 (Greenhill et al., 2003; McCallum et al., 2009) で回転速度を計測した結果である。

ALMA では初期宇宙での最初のスターバースト・銀河形成を解明することが期待されている。それらの銀河中心核で巨大ブラックホールが質量降着により成長し、非熱的高エネルギー放射する様子を調べるには、1 mas を切る分解能でダスト熱放射と峻別する必要があ

る。ALMA による原始銀河サーベイを ALMA 拡張アレイによる巨大ブラックホールサーベイの組み合わせにより、銀河形成史とブラックホール形成史の関係が解明できると期待される。

## 1.2 AGN への質量降着過程

活動銀河核 (AGN) は大質量ブラックホール (SMBH) へ降着する物質の重力エネルギーで輝くと考えられている。降着物質の起源は銀河円盤にあると考えられるが、その組成 (星間物質 or 恒星) や角運動量輸送機構 (粘性の起源) は解明されていない。AGN の中心近傍の回転曲線から、pc スケールより内側では Kepler 回転的 ( $v_{\text{rot}} \propto r^{-1/2}$ ) であるのに対して、10 pc より外側では flat である。1 - 10 pc の領域は SMBH 重力圏と銀河回転との境界に当たり (Wada et al., 2009)、この領域で角運動量を効率的に抜く過程が AGN エンジンへの質量降着率の決定要因と考えられる。近傍 (< 100 Mpc) の AGN でこの領域はミリ秒角のサイズに相当するので、1 mas を切る分解能で、ガスやダストや恒星などの追跡が必要である。



恒星表面 (輝度が均一な円板を仮定) のビジビリティ振幅。300 km 程度の基線長によって、100 pc 内の主系列星、10 kpc 内の巨星 ( $300 R_{\odot}$ ) のサイズが計測できる。

## 1.3 恒星物理学と距離測定

ALMA 拡張アレイは、近傍 10 pc 内の主系列星および 3 kpc 内の巨星の光球面撮像を実現できる。様々な恒星表面における物理現象が調査でき、太陽以外の恒星におけるフレアやプロミネンスなどの活動現象、コロナ加熱、対流構造、星振学などが展開する。

従来、恒星表面における撮像観測は対象が太陽に限られていた。様々な質量・進化段階・スペクトル型・連星系環境にある恒星表面の現象を調べるには、1 mas を切る分解能で、恒星表面の輝度温度を検出できる感

度が要求される。ALMA 拡張アレイを使えば、例えば近傍の赤色超巨星であるベテルギウスやアンタレスを  $100 \times 100$  pixel 程度の解像度で撮像できる。この解像度は、野辺山電波ヘリオグラフによる太陽表面の解像度  $180 \times 180$  pixel (17 GHz) に匹敵する。

近傍の超巨星はすでに VLTI/AMBER などの近赤外線干渉計によって空間分解され、光球面の非一様星や質量放出の様子が調べられるなどの成果を挙げている。赤外線干渉計のフリンジ間隔は mas スケールに達している。しかし不十分な  $(u, v)$  台を多波長でカバーしたビジビリティフィットに基づく構造推定であり、電波干渉計の撮像性能には及ばない。ALMA 拡張アレイによりミリ波・サブミリ波で近傍の恒星を撮像できれば、恒星物理学と電波天文学の新たな領域・コミュニティが生まれる。

ALMA 拡張アレイは、近傍 100 pc 内の主系列星および 10 kpc 内の巨星の視直径を、ビジビリティフィットにより計測できる。恒星の実サイズが既知あるいは推定できれば、1 ショットの観測で距離が計測できる。連星系を観測すれば、連星軌道運動も追跡でき、さらに高精度の距離計測が可能である。

VERA による銀河系内のメーザー源周年視差計測に比べて効率的であり、GAIA が観測できない銀河面の向こう側の恒星測距ができる。銀河全体の距離計測には、ダストの吸収に邪魔されないミリ波・サブミリ波での恒星測距が必要である。

## 2 ALMA 拡張アレイの応用

ALMA 拡張アレイは単体でのサイエンスと共に、下記のような応用が期待できる。

### 2.1 サブミリ波 VLBI のサポート

活動銀河核の降着円盤およびブラックホールの影を撮像するには、ミリ波スペース VLBI かサブミリ波 VLBI による  $\mu\text{as}$  の分解能が必要である。サブミリ波 VLBI で  $\mu\text{as}$  の分解能を得るには大陸間基線が必要で、すでにアタカマ (ASTE, APEX)、ハワイ (JCMT)、米国 (CARMA, SMT0) を用いた計画が進んでいる。ALMA 拡張アレイはサブミリ波 VLBI の一端として必要である。ALMA の開発計画にはすでに ALMA を phase-up して VLBI 局として用いる提案がされている。ALMA 拡張アレイは、サブミリ波 VLBI の大陸間基線を補間する短基線のビジビリティを提供し、ビジビリティの信頼性と高画質をもたらす。

## 2.2 Next Generation Array への布石

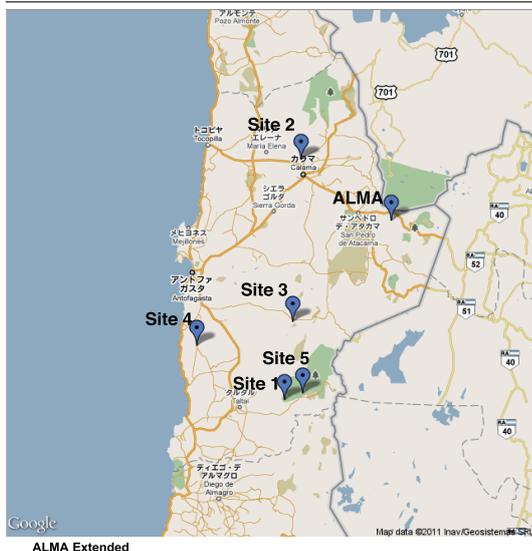
「次世代サブミリ波大型計画 WG」で検討した、地球型惑星を直接検出する Next Generation Array は、口径 30m クラスのサブミリ波アンテナを ALMA 周辺 300 km に配置するというものである。これは「大型計画」に分類されるが、それに進むには 300 km 基線でのサブミリ波干渉技術や、30m 級サブミリ波アンテナ製造技術などの技術実証が必要である。科学的にも ALMA から Next Generation Array へ進むには漸進的な成果の創出とコミュニティの拡大が必要である。ALMA 拡張アレイは Next Generation Array に至る重要な布石である。

## 3 計画概要

ALMA 拡張アレイは、ALMA の周囲 300 km の範囲に、ALMA 12m と同型アンテナを 5 基設置して構成する。下図にアレイ配列案を示す。

### 3.1 ALMA 拡張アレイアレイ配列

サイト	標高 [m]	緯度 [deg]	西経 [deg]	ALMA から の距離 [km]
1	4100	-25.205	69.173	266
2	3200	-22.267	68.950	134
3	2900	-24.253	69.057	171
4	2400	-24.550	70.333	290
5	3600	-25.130	68.925	248



ALMA 拡張アレイの配置例。サイトは調査が必要。

## 3.2 要求仕様

素子感度	SEFD= 1500 Jy
撮像感度	$3\sigma = 6 \mu\text{Jy} @ 3600 \text{ 秒積分}$
分解能	0.6 mas @ 650 GHz
輝度温度感度	$7\sigma = 1000 \text{ K}$

## 3.3 コストとスケジュール

観測局	19.7 億/局 x 5 = 98.5 億 (site1.5 億, ant14 億, FE3 億, BE1.2 億)
Computing	2 億 / 5 年
AIV / CSV / SE	6 億
Management	2 億
合計	108.5 億円

年次	X+0	X+1	X+2	X+3	X+4	X+5	X+6
調査	サイト調査						
	技術開発						
建設			インフラ整備	アンテナ	受信機・バックエンド		
					試験		
運用							本運用

望ましい ALMA 拡張アレイのスケジュール

ALMA 拡張アレイは、VLBI で培った技術を活かし、VLBI のサイエンスを発展させるとともに、電波天文学の領域を拡大して他分野からも必要とされる計画である。宇宙電波懇談会を通して、日本学術会議の中型将来計画にも提案している。VLBI 懇談会でも実現に向けた検討をして頂きたい。

## 参考文献

- Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Labbe, I., et al. 2011, *Nature*, 469, 504
- Greenhill, L. J., Booth, R. S., Ellingsen, S. P., et al. 2003, *ApJ*, 590, 162
- McCallum, J. N., Ellingsen, S. P., Lovell, J. E. J., Phillips, C. J., & Reynolds, J. E. 2009, *MNRAS*, 392, 1339
- Maiolino, R., Alonso-Herrero, A., Anders, S., et al. 2000, *ApJ*, 531, 219
- Mortlock, D. J., Warren, S. J., Venemans, B. P., et al. 2011, *Nature*, 474, 616
- Oliva, E., Salvati, M., Moorwood, A. F. M., & Marconi, A. 1994, *A&A*, 288, 457
- Tamura, Y., Iono, D., Wilner, D. J., et al. 2010, *ApJ*, 724, 1270
- Tamura, Y., Kohno, K., Nakanishi, K., et al. 2009, *Nature*, 459, 61
- Wada, K., Papadopoulos, P. P., & Spaans, M. 2009, *ApJ*, 702, 63