

いよいよ始まるアルマ望遠鏡の初期科学運用

齋藤正雄・奥村幸子・平松正顕

〈国立天文台アルマ推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: masao.saito@nao.ac.jp, sachiko.k.okumura@nao.ac.jp, hiramatsu.masaaki@nao.ac.jp

アルマ望遠鏡（正式には、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計：Atacama Large Millimeter/submillimeter Array）の最初の初期科学運用（サイクル0）の観測提案募集の案内が先ごろアナウンスされました。16台のアンテナでの観測とはいえ、既存のミリ波サブミリ波干渉計の性能を大きく上回り、さまざまな天文学の分野で大きな成果を出すと思われる。本稿ではアルマを使って観測したい人を念頭に置き、初期運用に供される装置性能について説明し、観測提案の申込みから観測データを得るまでの流れを示します。こうした一連の手続きの中で、皆様の支援をするのが国立天文台三鷹キャンパスにある東アジアアルマ地域センターです。この地域センターの役割についても紹介します。

1. はじめに

2011年3月30日、いよいよ今夜、アルマの最初の初期科学運用（サイクル0）の観測提案募集が発表される。この1カ月ほどはその準備で大わらわだった。数多くの研究者向け文書の作成や確認、ウェブに載せる内容やレイアウト、文字どおりに日米欧での議論、時差があるなかで電話会議はいつも夜遅くか早朝に開催される。頭がぼっとなりながらもなんとか議論に食い込み、言うべきことは主張する。お互い譲らず、「われわれはこの件に関して合意に達していないことを合意した」などという会話がとびかったこともあった。お昼前には一般向けアナウンス文章も届いた。うーん、間違いがあった。早く欧米・チリのアルマ関係者に知らせなくてはいけない。東アジア地域センター（East Asian ALMA Regional Center; 略してEA-ARC）のウェブの内容の最終確認のメールがきた。夜になった。おお、ついに観測募集の案内をしたというメールがチリからきた。おめでとうのメールがとびかう。思えばやっとここまで来た。電話会議が終わり、ふとわれに戻ると、これまで

の数々の出来事が走馬灯のように頭を駆け巡る。

2. アルマ望遠鏡とは

アルマ望遠鏡（正式には、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計：Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, 以下アルマ）は、南米のチリ共和国北部にある、アタカマ砂漠の標高約5,000メートルの高原に建設されています（図1）。アタカマ砂漠は年間降水量が100ミリ以下でほぼ年中晴天なこと、さらに標高が高いため水蒸気による電波吸収の影響を受けにくいことなどから、比較的短い波長（高い周波数）の電波も観測可能で、アルマ望遠鏡の観測波長域となるサブミリ波も十分とらえることができます。

アルマ望遠鏡は、パラボラアンテナ66台を組み合わせる干渉計方式の巨大電波望遠鏡です（図2）。直径12メートルのアンテナを50台組み合わせるアンテナ群と、直径12メートルのアンテナ4台と直径7メートルアンテナ12台からなる「アタカマコンパクトアレイ（ACA）」で構成されています。

アンテナはすべて移動可能なタイプです。アン



図1 アルマ望遠鏡の場所。南米チリ北部のアタカマ砂漠標高 5,000 m で運用される。



図2 標高 5,000 m の山頂施設にあるアンテナ群。初期科学運用期には 16 台のパラボラアンテナが設置される。(撮影：水野範和)

テナを動かして、それらの間隔を最大 18.5 キロメートルまで広げることで、直径 18.5 キロメートルの電波望遠鏡に相当する空間分解能 (= 視力) を得ることができ、ミリ波・サブミリ波領域では世界最高の感度と分解能を備えた望遠鏡となります。

アルマ望遠鏡は、国立天文台を代表とする東ア

ジア、米国国立電波天文台を代表とする北米連合、ヨーロッパ南天天文台を代表とするヨーロッパ連合の国際共同プロジェクトであり、受入れ国のチリは土地の提供やアルマ望遠鏡の建設・運用について便宜を図ることで参加します。

3. 初期科学運用の開始

3.1 初期科学運用観測（サイクル 0）提案募集^{※1}

アルマに参加するすべての組織・個人を代表して、合同アルマ観測所長より 3 月 30 日にアナウンスされました。最初の初期科学運用（サイクル 0）の観測提案募集は、以下のようなものです。

アルマの最初の初期科学運用サイクル 0 は、2011 年 9 月 30 日から開始され、2012 年 6 月 30 日までの 9 カ月間で、500–700 時間にわたり、採択された観測プロジェクトを実施します。アルマ初期科学運用の目的は、天文学コミュニティに有用な成果をいち早くもたらすとともに、アルマが完成に向かうにつれて進行する観測システムの評価を促進することです。アルマは、世界最高性能のミリ波サブミリ波干渉計システムとして、最初の科学的な成果を得る機会を皆様に提供いたします。

アルマ最初の初期科学運用サイクル 0 の詳しい内容は、すべて、アルマサイエンスポータルサイト^{※2}から提供されます。このサイトで、東アジア地域センター (“NAOJ”) を選んで研究者登録していただくことにより、皆様は観測提案を投稿したり、ヘルプデスクシステムを使った問い合わせを行ったりすることが可能となります。

是非観測提案募集（サイクル 0）の詳細^{※3}をご確認のうえ、研究者登録を行ってください。なお、このサイトは英語のみの運用となります。

サイクル 0 では観測時間が 100 時間未満の提案のみ受け付けます。また、アルマに参加している日米欧 3 地域およびチリに所属する人以外からの

^{※1} サイクル 0 の提案募集は 6 月 30 日に締め切りとなりました。次のサイクル 1 の提案募集が来年早々に予定されています。

^{※2} <http://www.almascience.org>

^{※3} <http://almascience.nao.ac.jp/call-for-proposals>

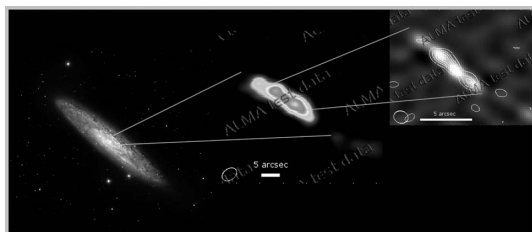


図3 系外銀河 NGC253 (Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)), 左) 光の写真 (Credit: ESO), 中) アルマテスト画像 (一酸化炭素分子 $J=2-1$ 輝線, 周波数 230 GHz), 右) アルマテスト画像 (一酸化炭素分子 $J=6-5$ 輝線, 周波数 690 GHz).

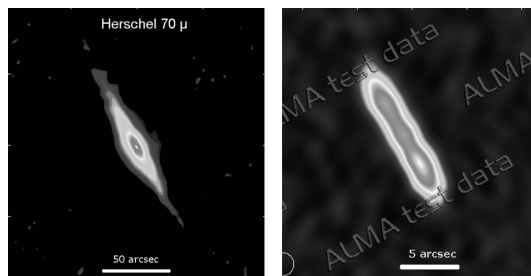


図5 がか座ベータ星を取り巻く塵の円盤 (Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)). 左はハーシェル宇宙望遠鏡が撮影した赤外線 (波長 70 マイクロメートル) 画像, 右はアルマテスト画像 (波長 870 マイクロメートル).

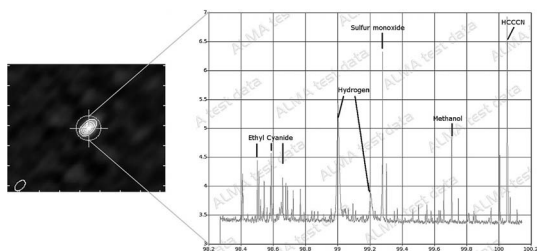


図4 ホットコア分子雲 G 34.26 + 0.15 の画像と 100 GHz 付近のスペクトル (Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)). さまざまな分子が発する輝線が数多く見えている。

観測提案も受付けます。観測時間に上限はありませんが、突発天体も他の提案と同じ手続きで審査され、受諾されると、突発天体発生時に観測がスケジュールされるという仕組みになっています。

観測データは、各地域センターを通して配布されます。しかし、サイクル0では一つの観測プロジェクトを完了させることや、アルマの最終性能に匹敵する品質のデータが取れることを保証していません。サイクル0の観測のデータ品質はベストを尽くすという努力規定になっています。とはいえ、これまでのところ既存のミリ波サブミリ波干渉計のデータの質は実現できそうです。図3-5は試験観測期間中にアルマによって取得されたテスト画像です^{※4}。

初期科学運用に関連する今後のスケジュールは以下のとおりです。

- 2011年3月31日：観測提案募集サイクル0
- 4月29日：観測意向アンケート締切
- 5月15日：アルマ技術ハンドブック配布
- 6月1日：観測提案受付け開始
- 6月30日：観測提案受付け締切
- 9月：審査結果配布
- 9月30日：アルマサイクル0観測開始
- 2012年6月30日：アルマサイクル0観測終了

3.2 サイクル0における研究者支援

東アジア地域センター (EA-ARC) は、東アジア地域の研究者のアルマでの観測を支援するために、自然科学研究機構国立天文台が台湾の中央研究院天文及天文物理研究所 (ASIAA: Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics) と協力して運営しています。東アジア地域センターでは、日本および台湾の研究者の皆様には、アルマでの観測提案の準備からデータ解析までをさまざまな形でサポートします^{※5}。

サイクル0の提案締切までに、日本においては、さまざまなサポートイベントを予定しています。皆様是非奮ってご参加ください。なお、4月以降に行われる研究会およびセミナー等への出張講

※4 テスト画像については以下のページも参照のこと。 http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/info/2010/1208post_320.html

※5 <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/forresearchers/arc/>

演やミニチュートリアルも企画いたしますので、ご希望の方はヘルプデスクからお申込みいただくか、東アジア地域センターのスタッフに直接ご連絡ください*6。

4. 観測仕様

4.1 概要

アルマの装置仕様としては、アンテナ台数、アンテナ配列（空間分解能に相当）、観測可能周波数、速度分解能、視野、実現可能な較正精度などがあります。初期運用とはいえ、既存のミリ波サブミリ波干渉計を凌駕する性能が実現されるため、各分野のサイエンスを大きく推し進めると考えられます。以下具体的にその仕様を説明します。

4.2 アンテナとアンテナ配列

初期科学運用サイクル0で使用できるアンテナは16台です。また2種類のアンテナ配列、広がった配列とコンパクトな配列が用意されます。コンパクトな配列はアンテナ間隔が18-125 mであり、広がった天体を観測するのに適しています。一方、広がった配列はアンテナ間隔が36-400 mで、コンパクトな天体を高空間分解能で観測するのに適しています。

4.3 受信機

ミリ波からサブミリ波にかけてバンド3, 6, 7, 9という4種類の受信機がすべてのアンテナに搭載されます。すべての受信機は直線偏波信号を受信し、二つの直線偏波信号は別々に処理されます。アルマの受信機には、2SBという二つの側波帯を分離して受信するタイプと、両者が混ざったまま受信するDSBというタイプがあります。各受信機の周波数帯域とタイプを表1にまとめました。

なお、すべてのアンテナには、水蒸気ラジオメーターも搭載され、大気中の水蒸気揺らぎに起因する位相揺らぎを補正します。

表1 初期科学運用時の受信機。

バンド	下限周波数	上限周波数	タイプ
	[GHz]	[GHz]	
3	84	116	2SB*
6	211	275	2SB*
7	275	373	2SB*
9	602	720	DSB**

* シングルサイドバンド

** ダブルサイドバンド

表2 初期科学運用時の相関器の帯域と周波数間隔。

帯域幅	チャンネル間隔		モード
	[MHz]	チャンネル数	
二偏波同時観測			
2,000	15.6	128	TDM*
58.6	0.0153	3,840	FDM**
117	0.0305	3,840	FDM**
234	0.061	3,840	FDM**
469	0.122	3,840	FDM**
938	0.244	3,840	FDM**
1,875	0.488	3,840	FDM**
一偏波観測			
2,000	7.8	128	TDM*
58.6	0.0076	3,840	FDM**
117	0.0153	3,840	FDM**
234	0.0305	3,840	FDM**
469	0.061	3,840	FDM**
938	0.122	3,840	FDM**
1,875	0.244	3,840	FDM**

* 時間領域モード

** 周波数領域モード

4.4 相関器

相関器は二つの直線偏波を同時に処理する両偏波モードと一つの直線偏波のみを処理する片偏波モードのどちらかを使用します。また、連続波を観測するTDMというモードとスペクトル観測をするFDMというモードがあります。おのおの場合に実現される帯域幅と周波数分解能を表2にまとめました。

*6 <http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/forresearchers/arc/members.html>

ただし、TDM モードの実際の有効帯域は 1,800 MHz です。また、実際の周波数分解能は窓関数をつかうため、周波数間隔の 2 倍となります。

4.5 観測モード

観測は天空の 1 点を中心とした視野を観測する単視野観測と最大 50 点までの複数視野を観測するモザイク観測の両方が可能になります。

4.6 較正

位相較正は干渉計観測にとって重要です。通常は点電波源を用います。絶対強度の較正はすでに電波強度の知られている天体、例えば太陽系内の惑星、衛星や小惑星などの観測に基づいて行われます。絶対強度の誤差は最も周波数の低いバンド 3 で 5% 以下、高い周波数ではそれより悪くなります。目標とする絶対強度誤差はバンド 6・7 で 10%、バンド 9 で 20% 以下です。

5. 提案投稿のための各種ツール

5.1 ポータルサイト

アルマサイエンスポータルは研究者がアルマにアクセスする最初の接点となります。ポータルサイトからすべてのアルマに関する情報、文書やツールへとアクセスできます。ツールには観測提案準備、観測提案評価、観測状態追跡、データアクセスなどがあります。もちろんオープンの情報についてどなたでもアクセスできますが、ヘルプデスクの使用や観測提案提出などのためには登録が必要でサイトには認証機能があります。

東アジア地域センターは、日本を含む東アジア研究者向けにこのポータルサイト（ウェブサービス）を用意し、提案受付の情報、観測モードの情報、各種お知らせといった情報提供を英語で行います。また、提案作成・提出に利用するアルマ ObservingTool ソフトウェア（略称アルマ OT）のダウンロードも当サイトから行います。アルマで観測をしたい日本の研究者は、このポータルサイ

トから研究者登録しアカウントを取得してください。このアカウントはアルマ OT を利用して行う観測提案の提出に加え、その後の審査結果の確認、観測実行時の進捗状況モニターなどさまざまな場面で利用します。研究者は取得したアカウントでポータルサイトにログインすることで、自分の観測提案・観測プログラムの状況を確認したり、観測の結果得られたデータをダウンロードしたりできるようになります。

5.2 ヘルプデスク

アルマヘルプデスクは、アルマに関する質問を受付けるサイトで、サイエンスポータルからあるいは各地域の直接専用サイトからアクセスができます^{*7}。質問はアルマに関してはなんでもよく、アルマのポリシー、性能、文書、観測提案準備、観測準備ツール、解析ツールなどです。さらに、観測相談や解析相談のため東アジアセンターを訪問したい場合などもヘルプデスクを使うことができます。ヘルプデスクを使うためにはサイエンスポータルに登録する必要があります。

ヘルプデスクの質問はいくつかのカテゴリに分かれています。一般、観測立案、観測準備ツール、データ解析、アーカイブとデータ取得、東アジアセンター訪問要望などです。さらに観測締切直前 72 時間は緊急支援というカテゴリに質問をすると迅速な対応がされます。ヘルプデスクへの質問はチケットと呼ばれ、東アジア地域センターのスタッフが回答しますが、必要に応じて専門的知識をもつ他の地域センターのスタッフが回答する場合もあります。

5.3 観測ツール (OT: ObservingTool)

観測提案では、装置仕様を理解したうえで、座標、達成したい感度、観測周波数、観測輝線など必要な観測パラメーターを OT に入力し、科学的背景、図・表などを添付して提出します。このため OT では感度計算ツールや観測輝線表などが提

^{*7} <http://alma-help.nao.ac.jp/index.php>

供されます。提出された観測提案のステータスは、ウェブ上のポータルサイトを通して確認することができ、観測が採択された場合はOTを使って実際の観測をするための詳細な観測パラメーターを入力する段階に進みます。

5.4 解析ツール (CASA)

CASA (Common Astronomy Software Applications) は、アルマやEVLAといった次世代の電波望遠鏡のデータ解析を主目的として現在開発中のソフトウェアパッケージです。これを用いて科学的評価試験で得られたアルマのデータ解析が始まっています。CASAには主に、アルマオフラインデータ解析機能とシミュレーション機能があり、データ解析や観測予測のためのツールとして用いられています。アルマオフラインデータ解析機能では、アルマのデータを読み込んで、フラッグ、キャリブレーションを行い、最終的にイメージ生成、イメージ解析を行うことができます。さらに研究者がPythonスクリプトを作成することで、解析処理の自動化、機能追加が可能です。現状の科学評価試験活動でも、CASAのタスクにない解析をする場合は、自作のスクリプトを用いて解析を行っています。シミュレーション機能では、干渉計、単一鏡観測に対応し、大気雑音や受信機雑音なども含めた観測シミュレーションを行うことができます。天体のモデルイメージ (FITS, CASA image) を読み込んで、実際のアルマの観測 (初期運用時で可能な観測モード、アンテナ配列) を考慮し、達成したい感度やダイナミックレンジに必要な配列や観測時間などを見積もることができます。特に広がった天体に対する観測提案では、イメージング性能が重要となるため、その評価のために観測シミュレーションが重要となります。これによって提案に説得力をもたせることができるからです。

6. 観測提案を書くには

6.1 概要

アルマの初期科学運用サイクル0の観測提案は以下を含み英語で書かなければなりません。

1. 科学的背景 (必須: 2 ページ以内)
2. 観測の技術情報 (必須)
3. 図, 表, 参考文献 (オプション)
4. 観測成果の広報プラン

これらすべてを一つのpdfファイルとしてまとめます (11 ポイントのフォントを使い、A4で5ページ以内、かつサイズは20 MB 以内)。

また、観測のための追加情報、どの配列でどのくらいの時間観測したいか、いつ観測したいかなどは、観測の技術情報に明記してください。

観測提案に含めることが求められている成果広報プランの内容は、観測提案審査には影響しません。とはいえ、長年にわたる構想と建設期間を経てアルマがいよいよ動き出すという点で、初期科学運用の期間はアルマプロジェクトの広報において重要な時期です。成果広報に積極的にご協力ください。観測提案が採択され素晴らしい成果が出た場合には、アルマ推進室が広報への協力をお願いすることもあります。

6.2 観測提案の審査

アルマへの観測提案は、以下の四つのサイエンスカテゴリーごとに、各地域から選ばれた専門家によるパネルができ、観測提案のランキングを作成し、各提案に対して評価を与えます。

1. 宇宙論と高赤方偏移天体
2. 銀河および銀河中心核
3. 星間物質, 星形成/原始惑星系円盤とその星間化学, 系外惑星
4. 星の進化, 太陽と太陽系

パネルは科学的な観点で提案を審査します。その際、合同アルマ観測所や各地域センターの科学者による技術審査の結果も参照されます。各カテゴリーのパネルの評価を集め、一つのランキングを

作るのはアルマ観測提案審査委員会です。このとき委員会は、科学的な評価だけでなく、天体の座標、周波数、要求する気象条件なども考慮してランキング表を作成します。この委員会は、委員長と各カテゴリーのパネル議長とパネル副議長からなります。最初の3年間、委員長はテキサス大学の Evans 博士で、サイクル 0, 1, 2 までを担当します。審査の結果、各プロポーザルは4段階で評価されます。

グレード A: 最も高い優先度の観測提案

グレード B: 高い優先度を有するがグレード A より観測割当ての確率は低い。

グレード C: 科学的な意義があるが、A, B の隙間時間に観測する。

グレード D: 観測提案は不採択。

グレード A のプロポーザルは観測時間の 20% 以内で採択されます。グレード A と B を合わせて観測時間の 100% とし、グレード C はさらに 50% の時間で採択します。委員会では、最終的に各地域のアルマでの貢献の割合に応じて観測時間の割り当てを行います。なお、類似の観測提案があった場合は直接比較され、順位を付けて上位のみ観測されるか、両方に同じ観測データを提供するかなども委員会で評決されます。

6.3 その他

観測提案の内容は、審査において必要な場合を除いて外部に漏れないようになっています。ただし、筆頭提案者、サイエンスカテゴリー、タイトルは、観測提案が採択されると公開されます。また、データの占有期間である 12 カ月が過ぎると、観測データおよび観測提案の概要が公開されます。この公開制度によって、研究者はキーワードからアーカイブされた観測データの検索などができます。

7. 最後 に

アルマは、1980 年代の前半に構想され、早 30 年、筆者もかなり早い段階のサイトサーベイから参加しました。このアルマがついに今年科学運用

観測を開始します。その間、アルマ実現のため奔走した人は数えきれないでしょう。寝食を忘れてそのエネルギーを使った人も多くいます。また、研究者だけでなく、技術者や事務の方も含め、前例のないことが次々起り、多くの方々が知恵を絞って対応してくれた結果、やっとここまでたどりつくことができました。そんなアルマで世界を驚かすすばらしい成果を手にする瞬間がもうすぐそこまで近づいています。(そのときはひっそり一人台所で祝杯をあげたいと思います。) 次回は是非そのようなすばらしい成果をご紹介しますことをお約束して本稿を終わりたいと思います。

謝 辞

アルマ望遠鏡の建設がここにくるまでには数多くの方々の貢献がありました。なかには自分が現役の間は観測できないにもかかわらず、このプロジェクトに懸命に取り組んでこられた方もいます。アルマにかかわるすべての人に感謝し、最初の科学運用観測が始まる喜びを分かち合いたいと思います。

Starting of the ALMA Early Science Operation

Masao SAITO, Sachiko OKUMURA,
and Masaaki HIRAMATSU

ALMA Project, National Astronomical Observatory of Japan

Abstract: The Joint ALMA Observatory invites proposals for ALMA Early Science observations (Cycle 0). The purpose of Early Science is to deliver scientifically useful results to the astronomy community and to facilitate the ongoing characterization of ALMA systems and instrumentation as the capability of the array continues to grow. Early Science will be conducted on a best-effort basis, so as to not unduly delay the construction of the full 66-antenna array, but nonetheless provides an important opportunity for first science from this cutting edge facility. Early Science will continue through Cycle 1 and until construction of ALMA is complete.