

特集

ワークショップ@ALMA 三つの講義

高島規子（株式会社リブラ）

1. はじめに

今回で10回目を迎えた「最新の天文学の普及を目指すワークショップ（WS）」。

移動に時間がかかるため、講義そのものは例年のWSに比べると、極端に少なく三つだけでしたが、知りたがりの私たちの質問にも丁寧に答えてくださり、とても内容の濃いものとなりました。参加した私たちだけがその恩恵を享受するのはあまりにももったいないので、ここで、講義内容についてまとめ、ご報告したいと思います。

2. 講義1「アルマとは何か？」

トップバッターは、国立天文台チリ観測所長の長谷川哲夫さんです。長時間のフライトでようやくチリにたどり着いた翌日、合同アルマ観測所サンチャゴ中央事務所にて、カラマに発つまでの午前中の時間を有効利用した講義です。

テーマは、タイトルからもわかる通りアルマに関するオーバービューで、「①電波で見る宇宙」「②干渉計って何だ？」「③アルマ望遠鏡」「④伝えたいこと」と、内容を四つに整理してお話いただきました。

まず、「①電波で見る宇宙」では、電波と光で見るものの違いについてご説明いただきました。電波も光も電磁波で観測する、という点では同じですが、波長によって見ている温度は異なるため、違うものを見ることになります。

かなり単純化して言うと、光や赤外では「高温のすでに誕生した天体」を見るのに対し、電波（ミリ波、サブミリ波）では「低温の天体の材料となるガスや塵」を見るのです。

次に、「②干渉計ってなんだ？」のセクショ

ンは、私が一番頭を使ったところです。干渉計がどのような経緯で考え出され、そこで得られたデータからどうやって、アルマのプレスリリースに見られるような美しい画像が得られるのか？私たちが天文普及の場で説明する際にも、一番悩みそうな部分とあって、多くの質問が飛び交いました。解像度が口径に比例し波長に反比例する法則から、実は電波望遠鏡には同じ口径の可視や赤外の望遠鏡よりも極端に解像度が悪くなってしまふ、という弱点があります。これを克服するために考えられたのが、干渉計というシステムです。複数の望遠鏡を遠く離して設置することで、その間の距離を口径とした電波望遠鏡に匹敵した解像度が得られるのです。次に、干渉計でとられたデータをどのように画像にするのか？については、「どんな景色も三角関数の重ね合わせで表現することができる」というフーリエの考え方に基づいているとのこと。景色を三角関数の形で表したものをフーリエ成分といい、フーリエ成分が得られれば、逆に、もとの風景を再現することができるのです。二つのアンテナで空に描いた干渉縞で天体をなぞると、「天体の姿の強度分布と干渉縞の掛



図1 長谷川さんの講義

算」の形でデータが得られるので、天体の景色のフーリエ成分を測定し、逆変換して天体の景色を得ることができるのだそうです。しかし、実際に画像にするには、一つのフーリエ成分だけではなく、たくさんの種類のフーリエ成分が必要です。そのためには、アンテナの距離をいろいろに変えて何度も観測しなければなりません。ところが、アルマ望遠鏡は沢山のアンテナがあるので、その沢山の2台の組み合わせで、一度の観測で多数のフーリエ成分がとれます。具体的には、欧米12mアンテナ50台によって $50 \times 49 \div 2 = 1,225$ 通り、日本の7mアンテナ12台によって $12 \times 11 \div 2 = 66$ 通り、併せて1,291通りものフーリエ成分が同時にとれます。ここにアルマがこれまでの電波観測に比べて極めて短時間で良質のデータが得られる秘密があったのです。

次の「③アルマ望遠鏡」のセクションでは、アルマ望遠鏡建設の経緯について詳しくお話しいただきました。もとになる大規模電波干渉計計画は、もっと高い解像度でもっと高い感度で観測したい、という学問的要請から持ち上がりました。さらに、天体誕生の現場を観測するために、電波の中では波長の短いサブミリ波での観測が不可欠です。しかし、サブミリ波は大気、特に水蒸気での吸収が激しく、乾燥していて標高の高い場所でしか観測できません。とはいえ、高い山の頂上のような場所では、広い場所が確保できないため、たくさんのアンテナを離れた距離に配置することはできません。つまり、最初の困難は建設場所探しでした。中国の奥地からインドはカシミール高原、果ては南極に至るまで候補に挙がった挙句、見つかったのがこのチリのチャナトル高原だったのです。実はこの時期、日本、アメリカ、ヨーロッパで、まったく独立に三つの大型干渉計建設計画が進行していました。情報交換や議論を重ねるうちに、1998年くらいから三つの計画をまとめて

一つの計画として進めようという流れになり、2001年4月、ついに日米欧の共同開発でプロジェクトを進めるという決議書に署名がなされました。ところが、この最初の段階で建設予算が承認されなかった日本は大きく出遅れました。プロジェクトは日本が参加しなくても成り立つ内容に修正され、予算がついた米欧の二者のみでスタートしました。なんとか研究開発予算だけはついた日本では、アンテナ開発を続けつつ参加の形を探っていました。そして、2004年に日本でも建設予算が承認され、晴れてプロジェクトに参加となったのです。しかし、この最初のつまずきにより、日本の分担は全体の4分の1となりました（実は、アルマの観測時間は、全体の100%から場所を提供しているチリの取り分10%をのぞいた90%を、貢献度によって配分しています。その結果、東アジアの配分は22.5%と米欧の33.75%に比べて少なくなっています）。

ともあれ、国際アルマ天文台を「NRAO（アメリカ国立電波天文台）」「ESO（欧州南天文台）」「NAOJ（日本国立天文台）」の三つの組織が支え、さらにそれを北米、ESO加盟15か国、東アジアのコミュニティが支えるという組織構図で、ついに、2013年3月13日、待望の開所式を迎えたのです。

この講義の最後のセクションは「④つたえたいこと」というタイトルでした。プロジェクトを通して達成された「本当の国際化」、今も続く「世界に通用する人材の育成」そして、圧倒的なパワーを持つ観測機器と観測データを再配布するユーザーフレンドリーなシステム。ここでのお話では、アルマが単に高性能な観測装置だから、先進的なのではなく、ここに至るまでに交わされた道のりそのものや、アルマ望遠鏡の運営理念自体が、今後の未来における天文学、ひいては科学の発展において、きわめて重要な存在である、という長谷

川さんの思いが、ひしひしと伝わってくるものでした。

3. 講義 2 “How Does ALMA Work”

二つ目の講義は、「アルマの観測装置について」という題で、チリ観測所助教の浅山信一郎さんに講演頂きました。会場は、アルマ山麓施設です。

アルマの観測システムは、アンテナから先をおおざっぱにいうと、以下の構成で成り立っています。

- ① アンテナで受けた信号を受信するフロントエンド=受信機
- ② 信号を変換する AD コンバータ
- ③ 各アンテナから来た信号を集めて計算する相関器
- ④ すべてのアンテナを同期して動かすための基準信号系
- ⑤ アルマの膨大なデータを処理するためのコンピュータやサーバー

ここで、浅山さんが強調されたのは、「出来合いの既製品で間に合うようなものはひとつもなく、装置もソフトウェアもすべて新規に開発されたものである」ということです。

さて、まずは、アンテナの説明です。アルマ観測所には日米欧 3 種類の 12m アンテナとアタカマコンパクトアレイ(モリタアレイ)につかわれている 7m アンテナ、全部で 4 種類のアンテナがあります。3 種類の 12m アンテナのデザインは異なりますが、すべて厳しい要求仕様を満たしています。具体的には

- ① 熱や風による変形を抑えられる補正技術
- ② 理想的な放物面からの誤差 (12m で 25 μ 以下、7m で 20 μ 以下)
- ③ 太陽観測のために(副鏡が燃えないよう)鏡面を適切に処理

といったことがあげられます。

鏡面の状態を知るには、電波ホログラフイー法という方法を使います。これは、実は天

体を干渉計で観測することの裏返しで、わかっている信号(アルマの場合 104GHz)をホログラフイータワーから発信し、アンテナで受け、2次元の絵を作ってフーリエ変換することでアンテナの形状を知るというもの。ここから、鏡面を支えている多数のねじの一本一本に対する調整量をリスト出力します。そして、最終的には、このリストをもとに、マンリフトにのったエンジニアが、なんと手作業でねじ調整をしていきます。アルマのアンテナの信じられないほど高い仕様を満たしているのは熟練の職人技だったのです。もちろん、温度変化や姿勢の変化による、重力変形については構造解析によって、温度変化に対してはモデルを作って測定解析して、あらかじめ織り込み済みだそうです。

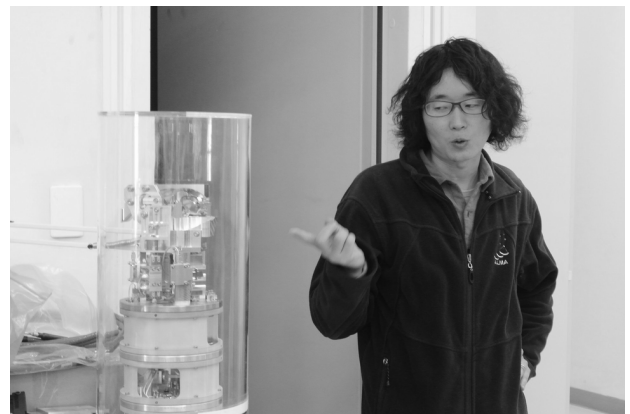


図 2 浅山信一郎さん(豊増伸治さん撮影)

鏡面調整の方法がわかったら、次はポインティングのお話です。電波望遠鏡においても光学望遠鏡の光軸合わせに相当する作業が当然必要です。これは、仰角方向と方位角方向について多数の指向精度器差パラメータを求めて行います。その際、アンテナの構造に起因するパラメータは同架の光学望遠鏡で、光学ポインティングで、電波の光軸に関するものは電波ポインティングでおさえます。これによって最終的には全天で 1.5" 以下を実現しています。

次に、アンテナのフロントエンドは受信機です。受信機の仕組みを大雑把にいうと、

- ① アンテナで集光した電波を楕円ミラーで受ける。
- ② 楕円ミラーから跳ね返った電波をホーンで受け取る。
- ③ ミキサで基準信号と合わせ、天体と基準信号の差分を取り出す。
- ④ 差分を増幅して受信機の外に取り出す。ということになります。

しかし、宇宙からくる非常に弱い電波を検出するためには、損失なく、かつ、余分なノイズを避けられるものでなければなりません。そのため受信機は、直径 1m の冷却装置の付いたデュワーのなかに納められており、超伝導を用いた増幅器を使っています。デュワーは 3 層構造になっていて、段階的に真空引きによって冷却され、受信器のある最上部はマイナス 270 度まで冷やされているのです。

ひとつのデュワーの中には、Band1 から Band10 までの受信機が納められていますが、この開発は、完全に国際分業で行われました。日本が担当したのは、Band4 (150GHz)、Band8 (500GHz)、Band10 (900GHz) の 3 種類。そして、開発されたコンポーネントを一つにして冷却試験を行い、性能を測るための受信機センターが、アメリカ、ヨーロッパ、台湾に作られました。各所で分担して性能評価を行って、確実に動くという評価されたもののみ、アルマ現地へと運ぶという方法でスケジュールに間に合うように、開発が進められたのです。

さて、いよいよ、得られた信号から天体の絵を作るための段階になります。この役目を負うのが相関器(コリレーター)。アルマには、欧米が製作した 12m アンテナ用のものと日本が製作した 7m アンテナ用という 2 種類の相関器があります。さらに、アンテナ制御、観測制御、データ解析、観測所運用まで含ん

だアルマのソフトウェアシステム も日米欧で分散開発されました。これによって、コントロールルームからすべてリモートで、アンテナを制御し、基準信号を制御し、変換された信号を処理する…ということが同時に行われているのです。

最後に、アルマにおける観測手法について。アルマの観測する電波においては、可視光における補償光学に相当するものは、水蒸気ラジオメータによる位相補正です。大気層に存在する水蒸気の塊による位相のずれを、水蒸気をモニタする 183GHz の受信機で監視することで、位相を補正します。また、視野が狭いというアルマの弱点は、モザイク観測によってカバーします。効率が悪いようですが、そもそも、アルマのシステムは非常に感度が高いため、観測時間が従来よりも非常に短く済むため、銀河などの大きな面積をもつ天体の観測も可能になっています。

講義の最後を浅山さんは次のような言葉でまとめました。

『アルマについては、そのすべてが前例のない新規開発でした。開発の各段階でさまざまな人が集まり、その時にできる最高の仕事を一人一人がしてきました。「大の大人がそこまでやるか」これは、長谷川さんの言葉ですが、「やった」からこそ、アルマ観測所はできたのです。それは現在でも続いています。だから今日もアルマ望遠鏡はきちんと動き、素晴らしい成果を続々と私たちに届け続けているのです。』

私たちの矢継ぎ早の質問にも一つ一つ丁寧に答えいただきながらの浅山さんの講義は、あまりにも面白く、時間を大幅にオーバーしてしまうほどの熱のこもったものでした。

4. 講義 3 「アルマ望遠鏡の最新成果」

講義の最後は、チリ観測所助教の平松正顕さんによるアルマ望遠鏡による天文学的成果

についてです。先の浅山さんの講義への私たち参加者の食いつき具合(?)をみて、プレスリリースされている内容だけでは不十分、と平松さんが配慮されたのか、「実際の天文学者がどういうデータを見ているのか?」という説明からお話は始まりました。測光観測をしたことがある人ならわかりますが、もちろん最初のデータは、アンテナが受け取ったエネルギーを数値化したものを時間に対して並べたものです。観測データは複数のアンテナから来たたくさんのデータを足し合わせて求めますが、周波数分解能が高いアルマでは周波数方向の点数も多くなり、ひとつの観測データが 100GB に上る場合もあるため、専用のソフトウェアが開発されたそうです。次の段階で、観測天体だけのデータを取り出し、周波数方向を横軸に時間方向に足し合わせして SN を上げることで微弱な電波からスペクトルを取り出し、フーリエ変換にかけてプレスリリースや論文で使われるような画像にもっていくのです。具体的に、各段階でのグラフを提示しながらの説明だったのでとてもわかりやすかったです。



図3 平松正顕さん

さて、データ処理の経過が頭にはいったところで、次は、アルマでの観測計画がどのように組まれるのかというお話です。世界中から集まった観測提案は、世界中の 70~80 人

の審査員による審査を経て優先順位が決まり、貢献度で割り振られた日米欧チリの “Highest Priority” つまり、“最高優先度観測” 枠 (以下、HP と省略) に収められていきます。枠は研究者の国籍ではなく所属研究組織の所在地に依存します。この枠に入らない国の組織の研究者は、北米の枠の中にオープンスカイという誰でも使える枠が少しだけあるので、ここを狙うことになります。HP となった観測提案については、日米欧の地域センターでまず「望遠鏡セッティング指示書」が作られ JAO (Joint ALMA Observatory) に送られます。これをもとに、JAO で天体の位置やアンテナの配置などを考慮して観測計画を立てられますが、例えばすばる観測所などでは 1、2 か月先まで綿密な計画があるのに対して、アルマは天候などの条件によってフレキシブルに入れ替えられます。これは、観測の内容によって、ベストな条件が必要なものとそうではないものがあるためで、観測提案の優先順位によるものではありません。そのため、HP になったとしても、自分の観測がいつ行われるのかわからないので、観測自体は研究者ではなく、JAO のスタッフが行います。観測で得られたデータは JAO や地域センターのスタッフによって品質保証のためのデータ解析が行われ、品質が満たされていない場合は追加観測を行うなどの判断がなされます。つまり、フーリエ変換で絵やスペクトルの形になって初めて、研究者の手元にデータが届くので、干渉計や電波観測のエキスパートでなくても、アルマを使って研究することは可能なのです。さらに 1 年たつとデータは公開されて、登録者の誰でも使えるようになります。このように蓄積された Delivery List に掲載されているデータは、現在およそ 530 天体。観測提案者とは別の視点から一つのデータを使うこともありますから、時には同一のデータから 5 本以上の論文が出

ることもあるそうです。もちろん学生が使うことも可能なので、卒論や修論のネタとして全国の大学の研究室でどんどん使ってほしいとのこと。

では、具体的にアルマ望遠鏡では何が見えるのでしょうか？

代表的なものとしてまず、星間塵があげられます。星間物質のおよそ1%を占める星間塵は、分子と分子の出会いの場として非常に重要です。希薄な星間雲の中で分子同士が出会う確率は非常に低いですが、塵の表面で動いている分子なら出会って化学反応を起こしてより複雑な分子となることが可能なのです。星間ガスもまた、ミリ波・サブミリ波の得意分野です。この範囲には「分子輝線の森」といわれるほど、多種多様な分子の輝線が存在していて、それをとらえることで、星間ガスの物理状態や化学状態を知る手がかりになります。つまり、アルマと可視観測を組み合わせることで恒星本体と恒星を作ったガスや塵を同時に見ることが可能になるのです。しかも、アルマはすばる望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡をしのぐほどの圧倒的な視力とこれまでの電波望遠鏡の100倍の感度を誇っています。つまり、より暗い天体を細かいところまでみることができるのです。そうしてもたらされた最初の科学成果が「フォーマルハウトを取り巻くリング」でした。電波望遠鏡とは思えない高い解像度で得られた画像はハッブル宇宙望遠鏡がとらえた姿と合成してもなんら違和感のないものでした。この成果に裏打ちされたアルマの性能は、次の三つの宇宙の謎に挑むことを期待されています。

「① 銀河の誕生」「②星/惑星系の誕生」そして、「③宇宙での物質進化」です。

まず①については、星でできた銀河ではなく、星の材料になっている星間物質の塊を見ることが、爆発的に星を作っている時代の昔の銀河を見ることができます。また、遠方の

天体からくる光は赤方偏移によって引き延ばされていますが、黒体放射の特性によって、ミリ波サブミリ波の領域ではほとんど暗くならないため、より遠方の銀河を見ることができます。次に、アルマはその高い解像度で、120pc先の原始惑星系円盤をすっぽり1視野の中に収め、地球軌道くらいまでの細かさを見ることができます。つまり、②の星/惑星系の形成～系外惑星の多様性や、惑星形成期のガス雲の状態を探るのに最適の望遠鏡なのです。最後に③においては分子輝線の観測から、さまざまな物質の存在比や、分子雲の温度や密度、さらにドップラー効果からガスの運動の様子などを求めることが期待されています。

ここからは、プレスリリースされた結果を一つずつ解説していただきました。紙面の都合もありますので、タイトルとプレスリリースの日付のみ列挙いたします。

「124億光年先の銀河の成分調査」

(2012/6/12)

「遠方の爆発的星形成銀河の観測」

(2013/3/14)

「ダストに埋もれた銀河の“人口調査”」

(2013/5/31)

「宇宙の巨大天体ヒミコ」 (2013/11/22)

「円盤銀河も衝突銀河から」 (2014/9/17)

「爆発的星形成の終焉の原因に挑む」

(2013/7/25)

「ガンマー線バースト母銀河で分子ガスを初検出」

(2014/6/12)

「惑星誕生領域の化学組成に迫る」

(2014/2/13)

「原始惑星系円盤の高解像度観測」

(2014/11/6)

「惑星のへその緒」

(2013/1/4)

「外縁惑星の起源に迫る」

(2014/1/17)

「惑星の現場に糖を発見」

(2012/8/29)

「年老いた星の不思議な渦巻き模様」

(2012/10/11)

「超新星で作られた塵を発見」 (2014/1/7)

人の講師の方と、今回のWSを企画運営してくださった天文台スタッフの方々に、ここで改めて、お礼申し上げます。本当にありがとうございました。

5. おわりに

以上、長くなりましたが、今回のWSで行われた講義の内容をまとめました。先にも述べましたが一方的に拝聴する講義はひとつもなく、休憩時間の間にも質問にお答えいただくような活発なやり取りによるものでした。

平松さんにおきましては、チリでは時間が足りなくなり、日本に帰ってからの報告会の場で補講までしていただいたので、今回の内容にも一部含めました。講義と講義の準備のために、大切なお時間を割いていただいた3



高嶋 規子

non@libra-co.com



アルマ山麓施設での記念写真（川村晶さん撮影）