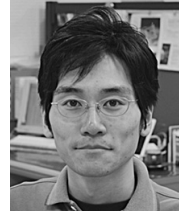


野辺山レインボー干渉計が解き 明かす暗黒の宇宙 —88億年前の怪物銀河で 星の材料が大量に見つかった！



田村



伊王野

田村 陽一

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻，国立天文台 ALMA 推進室，日本学術振興会特別研究員

〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yoichi.tamura@nao.ac.jp

伊王野 大介

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

e-mail: d.iono@nao.ac.jp

巨大銀河の形成を見てみたい。私たちはこのような目標のもと、野辺山レインボー干渉計を使って 88 億光年先の特異銀河 MIPS-J1428 に対する星の材料（分子ガス）探査を行いました。その結果、私たちの銀河系がもつ分子ガス量の実に 30 倍に及ぶ分子ガスを発見し、かつその分子ガスが MIPS-J1428 の爆発的星形成活動「スターバースト」と密接に関係していることを突き止めました。これは本銀河が大銀河へと成長を遂げるほどの潤沢な燃料を備えたスターバースト銀河であることを示しており、これによって、この特異銀河がじつは巨大銀河の赤ちゃんであることが決定的となりました。ALMA 完成後はいまだ謎に包まれたこのような若い銀河種族の詳細が解明されるでしょう。

1. 大銀河の形成を見る

私たちの宇宙を占める質量のほとんどは電磁波で観測することができません。しかしながらこれら見えない質量（暗黒物質）の存在こそが、私たちになじみ深い「見える物質」すなわちバリオンを重力的に集め形作ってきたと考えられるようになってきました。暗黒物質がいち早く構造を形成し、それに追従してバリオンが集中、物質世界の階層構造の一つとして「銀河」が形成されました。暗黒物質が強く集中することで強い重力が存在するような場所には、やはりバリオンも多く落ち込み、ガスが小銀河へ、小銀河が大銀河へと成長し

ていったと考えられます。実際、赤方偏移 2-3 の時代（現在から 100-120 億年前）の宇宙に、若い銀河が群れをなして大銀河へと成長を遂げるその途上にあると思われる特殊な領域や若い大質量銀河候補そのものが見つかってきています¹⁾⁴⁾。したがって、このような「大銀河形成領域」を見ることこそ、構造形成の強く進行した場所を見ることにつながります。さらに成長途上にある大銀河の“赤ちゃん”を詳細に知ること自体、銀河進化の極端に進んだショウケースを精査するうえで重要です。私たちの研究の一つの目標は、大質量銀河の形成・成長現場を見つけ、その性質を詳細に知りたい、というもの。急激な進化途上にある巨

大銀河は宇宙の歴史書を読み解く一つの手がかりにはかなりません。

2006年早春、私たちはこんな目標のもと、野辺山レインボー干渉計を使って88億光年先の特異銀河に大量の星の材料(分子ガス)を発見し、この特異銀河がじつは巨大銀河の赤ちゃんであることを決定づけることに成功しました。この結果は同年12月に記者発表されさまざまなメディアで取り上げていただきました。本稿ではその一部始終をご紹介します。

2. 分子ガスは星形成の直接的母胎

私たちは分子ガスを一つの目印として銀河の赤ちゃん探査を行っています。では、宇宙空間に存在する分子とはどんなものなのでしょう？そもそもなぜ分子ガスなのでしょう？

系外銀河の分子ガスを観測する研究者にとって、「高密度」ガスといえばおおむね1立方センチメートルあたり 10^5 個程度の水素数密度を指すことが多いようです。理想気体の状態方程式 $PV=nRT$ に従えば、標準状態(1気圧, 0°C)で粒子数密度は $2.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ となります。したがっていわゆる高密度分子ガスは、地上より14桁程度圧力の低い真空状態にあると言えます。スペースシャトルが飛ぶ300 km上空は、法律上は立派な宇宙空間ですが、それでも 10^{-12} 気圧程度の気体粒子が存在しています。地上で作ることができる超高真空でようやく 10^{-14} 気圧(電子顕微鏡・加速器の内部)となり、 0°C を仮定すれば気体粒子の数密度は 10^5 cm^{-3} となります。じつは、私たち天文学者が高密度分子ガスと呼んでいる状態は、(ちょっと皮肉な話ではあるけれど)人類が達成しうる超高真空状態と同じ程度なのです。

こんな希薄なガスが出す電波を受け止めることは本当にできるのでしょうか？こんな希薄なガスから本当に星は生まれるのでしょうか？

それでも 10^5 cm^{-3} という粒子数密度は、宇宙空間の平均的な水素個数密度 $2\text{--}3 \text{ cm}^{-3}$ と比べて

らやはり密度が高いことになります。このような粒子密度では、原子同士が結合し安定な分子という形で存在します。星間空間における分子ガスは、分子雲と呼ばれる差し渡し100光年程度の大きさの高密度領域を形成します。そして、分子雲は近くの星の強い紫外線にあぶられたり、はたまた超新星に吹き飛ばされたりしつつも、自らの重力で長い年月を経て少しずつ少しずつ収縮し、やがて星を生みます。

世の中何が起るかわかりません。宇宙だって謎だらけです。なにせこれほど医療が発達した時代に、突然はしかが大流行するくらいです。それでも、ただ一つだけ確実なことが言えます。星は必ず分子ガスという“相”を経て誕生するのです。私たちは分子ガスを通して星々の卵を、そして遠い昔の宇宙にいる若い銀河の姿を見ることができるとのことです。

3. 宇宙の塵と赤外線と星形成率

夜空を横切る流星も元々は星間塵(ダスト)です。ダストは炭素やケイ酸からなる微小な固体粒子で、生成される環境で異なりはするものの、おおむねその大きさは0.001–1ミクロン程度であると考えられています。銀河全体を見渡したとき、星間空間中のダストの多くは分子ガスと共存しており、すなわち分子雲をはじめとした星形成領域に強く集中していることが知られています。このため、生まれたての星の比較的近くに位置し、若い星が発する紫外線を吸収してしまいます。こうして若い星からエネルギーを受け取ったダストは数十~百K程度に暖まり、そのエネルギーを今度は遠赤外線で再放射します。したがって、ダストを多くもつ銀河ほど、分子ガスを多くもち、かつ遠赤外線で明るく輝く傾向にあります。比較的近傍の宇宙に位置する超高光度赤外線銀河(Ultra-luminous Infrared Galaxies; ULIRGs)⁵⁾はその代表例です。

若い星々からの放射を観測することで、その銀

河がどの程度の星形成活動を行っているかを推定することができます。天文学ではこの活動性の度合いをしばしば「星形成率」と呼び、1年間に誕生した星の総質量を、太陽質量を単位として測るのが慣例です。例えば、私たちの銀河系の場合、数太陽質量/年のように表現することができます。じつはこの星形成率は銀河の誕生と進化を理解するうえで重要な情報の一つです。いま、銀河の形成と進化をガスから星への相転移現象だととらえることにすれば、星形成率は銀河進化の時間微分量に相当します。形成途上にある銀河の星形成率を知ることは、その銀河の未来や現在の銀河種族との関連性を推定するための重要な手がかりになります。上にも述べたとおり、ダストを多くもつ銀河は、形成された星が放つエネルギーを吸収し、遠赤外線として再放射します。したがって、遠赤外線のエネルギー量（遠赤外線光度）を測定し、ダストに埋もれているであろう若い星の放つエネルギーを総和することで、星形成率を推定することが可能となるわけです。

4. 分子ガスハンターの悲しい性

さて、星形成率が銀河進化の時間微分量であるなら、星質量とガス質量の総和は時間積分量に対応します。あるいは、特にガス質量については、今後の銀河進化を決定する重要な初期条件と考えることもできるでしょう。例えば星形成率の大きい銀河があったとして、私たちが見ているものが果たして、今後大銀河へと成長を遂げるほどの潤沢な燃料を備えた爆発的星形成なのか、一瞬燃え盛りはかなく消える花火のようなごく短期間のエピソードにすぎないのか、残念ながら星形成率だけでは判断できません。私たちがその銀河の未来像を描くにはどうしても分子ガスの観測が不可欠なのです。

とはいえ、赤外線光度と分子ガス量の間にはそれなりに相関があることが知られています^{6),7)}。だから、遠赤外線光度あるいは星形成率のひどく

大きいものに敏感に反応してしまうのは、私たち分子ガスハンターの悲しい性(?)なのかもしれません。例えば最新の論文をチェックしているときには遠赤外線光度 $L_{\text{FIR}}=10^{12}L_{\odot}$ (L_{\odot} は太陽光度で $4 \times 10^{26} \text{ W}$)などの文字列には非常に敏感に反応してしまうし、これが $10^{13}L_{\odot}$ ならば胸が高鳴ってしまいます。 $10^{14}L_{\odot}$ などを見つけてしまった日には徹夜で観測提案書を書き始めてしまうでしょう。というのも、星形成の活発な銀河には多量の分子ガスが眠っている可能性が高いからです。

5. 怪物銀河 MIPS-J1428

2005年9月、ものすごい銀河の発見が報告されました⁸⁾。おうし座付近の深探査領域 (NDWFS Bootes field)⁹⁾ に対して行われた *Spitzer* 宇宙望遠鏡の中間赤外線観測の結果、24ミクロン中間赤外線以最も明るかった天体が今回の記事の主演、MIPS J142824.0+352619 (以下 MIPS-J1428 と略記、図1) です。その後の迅速な分光観測から赤方偏移が1.325 (現在から88億年前の宇宙) と決定され、遠赤外線光度が $10^{13.5}L_{\odot}$ 、すなわち 3×10^{13} 個の太陽が放つエネルギーを遠赤外線で放出していることが判明しました。これは私たちの銀河系が放つ総エネルギーの数百倍に相当します (ちなみに100Wの電球 2×10^{38} 個分)。このでたらめに大きい遠赤外線光度を生み出しているものはいったい何なのでしょう？ MIPS-J1428の赤外線光度を大きくする要因として考えられるものは、ダストの雲に深く埋もれた超巨大ブラックホール (活動銀河核)、重力レンズによる増光などいくつかの可能性がありますが、最も有力な推測は、大量の若い大質量星を効率よく生成する爆発的星形成活動「スターバースト」をもっている、というものでした。事実、中間赤外線スペクトルに基づく診断からは大規模な星形成活動を示す6.2–12.7ミクロンの多環芳香族炭化水素 (PAH) の特徴が見て取れるし¹⁰⁾、また、X線天文衛星 *Chandra* による追観測からも活動銀河核が存在す

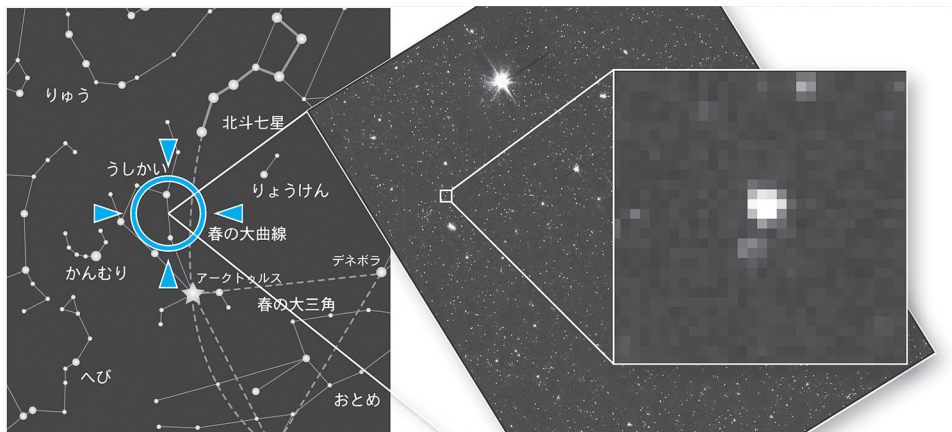


図1 おうし座深探査領域 (NDWFS Bootes Field) と *Spitzer* 宇宙望遠鏡に搭載された赤外線カメラ IRAC による MIPS-J1428 の中間赤外線 8 ミクロン画像 (星図は国立天文台より, 画像は *Spitzer* Archive より取得).

る明確な証拠は得られていません^{*1, 11)}. サブミリ波干渉計高分解能撮像からも, このあまりに大きい赤外線光度を説明できるほどの強力な重力レンズ効果の兆候は確認されていません¹²⁾.

この赤外線光度を星形成率に換算すると, 5,500 太陽質量/年, じつに天の川銀河の 1,000 倍以上に及ぶ凄まじい勢いで星を作っていると見られます. 想像してみてください. 乱暴な言い方をすれば, 1 時間半に一つ太陽が生まれているという計算です. このような銀河は宇宙広しと言えど, そう滅多にあるものではありません. 赤外線光度がほぼ純粋に星形成の寄与によるものとわかっているものの中では観測史上最大級, まさに怪物と呼ぶにふさわしい特異な銀河です.

2007 年現在, 赤方偏移が 1 を超える銀河で分子ガスの検出が報告された例は 40 例をわずかに上回る程度⁷⁾. まだまだ遠方宇宙の分子ガスをまとった若い銀河はその理解の発展途上にあると言わざるをえません. 私たちは迷わずレインボー干渉計 (後述) による MIPS-J1428 の分子ガス探査の観測提案書作成に着手し, 2006 年の年明けに無事観測のゴーサインが出ました. 差し迫るレイン

ボー干渉計セッションのスケジュールに滑り込ませていただいたミリ波干渉計運用マネージャ, 奥村幸子准教授のご好意にはただただ感謝するばかりです. こうして私たちの怒濤の 5 カ月の火蓋が切って落とされたのでした.

6. 最終兵器, 野辺山レインボー干渉計

電波干渉計とは二つの望遠鏡に到達する微小な時間差 (位相差) を測定することにより, 信号がやってくる方向を特定する装置です. 単一鏡と比較した場合の電波干渉計の利点はいくつかありますが, 特に分子ガスハンティングに際して重要な特長を三つ挙げることにしましょう. (1) 相関型電波干渉計では二つの望遠鏡に飛び込んでくる共通の信号しか検出しません. 逆に言えば, 各々の望遠鏡に独立に入ってくる信号は捨てているため, 大気や受信機が発する雑音などは干渉計出力に混入しにくいわけです. (2) 視線方向を雲が横切っただけで分光帯域特性が大きく変動してしまう単一鏡に比べ, 干渉計の帯域特性は非常に安定しており, 銀河が放つ幅の広い分子輝線の分光検

*1 活動銀河核と私たちの間の物質により X 線がさえぎられている (Compton thick) だけという可能性もありますが, X 線を遮蔽するほどの大量の星間物質が存在するというだけでも興味深いと言えます.



図2 野辺山レインボー干渉計の全景（国立天文台提供）。手前に見える6基の10mアンテナ群が野辺山ミリ波干渉計，左手奥に見えるひときわ大きいパラボラが45m電波望遠鏡。野辺山宇宙電波観測所は，1年間で最も気象条件が良い1-2月の2週間程度の期間をレインボー干渉計セッションに当ててきました。

出においては干渉計が圧倒的に有利です。(3)また，原理的には素子アンテナを増やすことでいくらでも集光面積を多く取ることができます。したがって遠方銀河のような微弱な点状電波源を精度よく観測するのは，じつは干渉計が得意とするところなのです。

レインボー干渉計は野辺山宇宙電波観測所45m望遠鏡と6素子ミリ波干渉計をケーブルでつないで合計7素子の電波干渉計を構成し^{*2}，強大な集光力を得ることが可能です(図2)。その集光面積は世界屈指。野辺山宇宙電波観測所の(文字どおり)最終兵器^{*3}だといっても過言ではないでしょう。

7. MIPS-J1428 がもつ大量の分子ガスの発見

2006年1月20日観測初日，私(田村)は東京都三鷹市の国立天文台の研究室にいました。この類いの観測の醍醐味は何といっても検出の瞬間。あ

の興奮をみすみす逃す手はありません。それまでに分子ガスハンティングに連敗を喫していた私は，今回のMIPS-J1428に多大な期待を寄せていました。しかし当時私はサブミリ波強度較正実験用測定装置の開発研究で修士論文を書いており，そのまとめの佳境を迎えていました。その合間を縫って観測準備を進め，あわよくば野辺山へ！と意気揚々に隙を狙っていたものの，共同研究者全員から無情にも(いま思えば当然ながら)待たががかってしまいました。まさにドクターストップ^{*4}，私はあえなく分厚い空のもと研究室に缶詰めするほかありませんでした。

明るる日，メールに添付された解析結果はあまりに衝撃的でした。位相追尾中心に浮かび上がったのは，まぎれもなく一酸化炭素(CO)分子 $J=2-1$ 回転励起輝線の兆候。わずか一晩で検出に成功してしまったのです。簡易解析されたスペクトルは強度較正が済んでいないものの，ざっと見積もって軽く15 mJy^{*5}を超える輝線ピーク。こ，こ

^{*2} 虹の7色にたとえてレインボー干渉計と名づけられました。

^{*3} 野辺山ミリ波干渉計/レインボー干渉計は2007年春をもって20期にわたる共同利用観測を終了しました。今後はALMA計画(後述)への大切な足がかりとして規模を縮小して科学観測などが行われる予定です。

^{*4} もちろん医者ではなく博士(Doctor of Philosophy)です。

^{*5} 電波天文学では電波強度を宇宙電波発見者の名にちなんでJy(ジャンスキー)という単位で表現します。1 Jy = $10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ 。

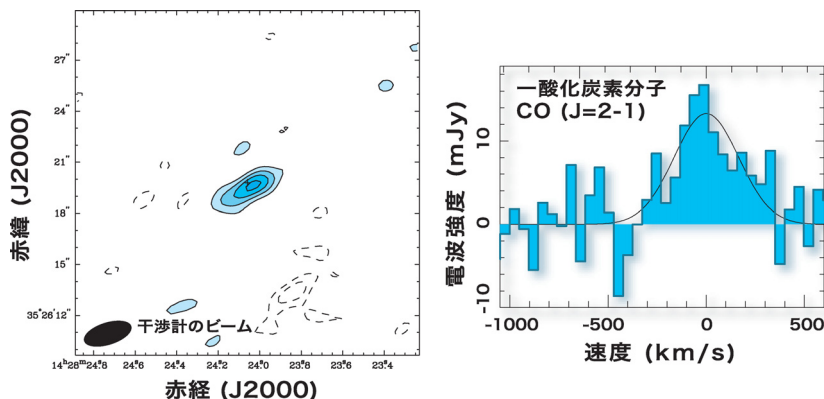


図3 (左) 私たちが得た MIPS-J1428 の分子ガス輝線 $\text{CO } J=2-1$ イメージ. ただし一酸化炭素分子ガスのイメージが伸びて見えるのは, 実際にガスがこのような分布をしているからではなく, 干渉計のビーム形状 (図中左下の楕円) を反映しているため. 実際の一酸化炭素分子の分布はほぼ点状であり, 銀河の中心部に強く集中していると考えられます. (右) 私たちが検出した MIPS-J1428 の一酸化炭素分子 $J=2-1$ 輝線のスペクトル. 銀河全体の分子ガスの運動を反映して, 輝線の半値幅が 400 km/s 近くに広がっています. 近傍の渦巻銀河がたかだか 200 km/s 程度の半値幅であることを踏まえると, MIPS-J1428 には激しいガスの運動 (銀河中心領域への落ち込み, 乱流) が存在すると見られます. 実線は予想される輝線の形状.

れは明るい. 急いで文献を掘り返し, これまで赤方偏移が 1 を超える銀河で発見された CO 輝線強度と比較をしたところ, (赤方偏移が比較的小さいことも功を奏して) 見かけ上の輝線強度としては最も明るいことがわかりました. MIPS-J1428 が巨大銀河の赤ちゃんであることを決定づけた瞬間でした.

さて, つづく割り当て時間は天候に恵まれなかったものの, それでも十分な信号雑音比でデータを取得することができました (図3). また, 幸いなことに同年 5 月の 6 素子ミリ波干渉計の観測時間をいただくことができ, より周波数の高い $\text{CO } J=3-2$ 輝線も検出することができました. これによって後に示すようにこの銀河がもつ分子ガスの物理状態について大きなヒントを得ることができたのです.

聞けば MIPS-J1428 の発見者である Colin Borys 氏らもフランス・ビュール高原のミリ波干渉計で $\text{CO } J=5-4$ 輝線を検出したとのこと. 私たちには

一刻の猶予も許されませんでした. データは田村が夜を徹して解析, 伊王野が速やかに執筆し同年 8 月に PASJ 誌に投稿, その年の 12 月 25 日に出版され¹³⁾, 同時に国立天文台記者発表^{*6}を経て全国の新聞各紙に取り上げていただきました. 私たちにとっては願ってもないクリスマスプレゼントになりました.

今回の私たちの観測結果の主要部分は以下の二つです.

一つ目は, 分子ガスの「量」. MIPS-J1428 がもつ分子ガス質量は私たちの銀河系がもつ分子ガス質量の優に 30 倍はあるという点です. 二つ程度のガスの豊富な円盤銀河同士の衝突 (major merger) ではこのような分子ガス量を再現することはまず不可能です. ガスの豊富な複数の銀河が, 暗黒物質の作る深い重力ポテンシャルにとらえられて落ち込み, 劇的な星形成を経て大銀河へと成長しているまさにその途中と考えるのがむしろ自然です. あるいは近年ライマン α 輝線^{*7}の挟帯域

*6 記者発表の内容はウェブに掲載中です (<http://alma.mtk.nao.ac.jp/~diono/press/index.html>).

*7 主に大質量星形成領域などの電離ガスに観測される紫外線の一種.

撮像で発見されているような巨大なガス天体¹⁴⁾が自らの重力でつぶれて急激に星を形成している途中かもしれません。これに似た若い巨大銀河候補は赤方偏移 2-3 の宇宙 (100-120 億年前の宇宙) にいくつか見つかっている程度でした。

二つ目は分子ガスの「質」。高密度な分子ガスは星が誕生する直前の段階にあり、往々にして若い大質量星形成領域に付随しています。それゆえ、若い大質量星からの紫外線放射や超新星の衝撃波などのエネルギー流入を反映して、温度が高くなると考えられています。すなわち、分子ガスは星形成活動の母胎であると同時に、星形成活動を映す「鏡」でもあるわけです。こういった点で、異なる複数の回転量子数 J の遷移に伴う相対的な放射強度は、分子ガスの物理的性質や星形成活動を反映する「鏡」として用いることができます。今回 MIPS-J1428 において検出された CO $J=2-1$ 輝線強度と CO $J=3-2$ 輝線強度の比は輝度温度スケールにしてほぼ 1 でした。輻射輸送モデル¹⁵⁾ が示すところによれば、(CO $J=3-2$ 輝線の信号雑音比がそれほど良くないために強い断定こそできませんが) 分子ガスが暖かく密度の高い状態にあるというのがもっともらしいようです。これは近傍の ULIRG や遠方のキューサーで見つかっている分子ガスと同様の性質であり¹⁶⁾、銀河全体の分子ガスが高いエネルギー状態まで励起されると推測されます。したがって、私たちが観測した分子ガスが大規模な星形成活動環境下にあることはどうやら間違いなさそうです。

こうして、MIPS-J1428 の本質的な描像が明らかになってきました (図 4 (表紙))。この銀河には分子ガスとダストに包まれ覆い隠された大規模なスターバースト現象が存在することは確実で、短命の大質量星が巻き散らす紫外線や頻発する超新星爆発の影響で銀河全体の分子ガスの平均温度は上昇し、各所に電離水素領域を形成していると推測されます。ガスやダストは波長の短い光、すなわち青い光を選択的に吸収するため、若い星々が

作る大質量星団は赤い光として観測されるでしょう。図 3 に示した CO 分子の広い輝線幅は乱流などの激しいガスの内部運動の証拠で、これは複数の銀河が衝突したためかもしれません。であるとすれば、子持ち銀河 M51 のような美しい渦巻模様などは見られず、巨大な分子雲の複合体が複雑に入り組んだ不規則な形状をしているでしょう。もし私たちが MIPS-J1428 を間近に観察できるとすれば、きっと怪物の名にふさわしい巨大で不気味な、しかしにぎやかにたくましく成長する若かりし大質量銀河の姿を目の当たりにするのかもしれない。

8. 赤方偏移砂漠

さて、赤方偏移 7 の銀河¹⁷⁾が見つかる昨今、この MIPS-J1428 は「高」赤方偏移というにはあまりにおこがましい赤方偏移 1.3 (88 億年前) という時代に見つかりました。「なーんだ、そんな近いんだ」と言うことなかれ、じつを言えば、赤方偏移 1-2 に位置する分子ガスをもつ銀河はわずか 3 天体しか知られていませんでした。

分子ガスの検出には最低でも有効数字 3 桁程度の正確な赤方偏移値が決定していないと受信機をチューニングすることができません。そして正確な赤方偏移の決定は可視近赤外分光に完全に頼っていましたが、しかし、この赤方偏移帯は往々にして可視近赤外分光でアクセスし赤方偏移を決定するのが難しく、このため「赤方偏移砂漠 (redshift desert)」として知られていました。実際 MIPS-J1428 の可視近赤外線スペクトルには、赤方偏移を決定できる輝線がほとんど見られず³⁾、赤方偏移の決定は *Spitzer* 宇宙望遠鏡に搭載された中間赤外線分光計の威力の賜物です。

「赤方偏移砂漠」と呼ばれるこの時代に今後大銀河へと成長しうる大規模な星形成銀河を見つけた意義は大きいと私たちは考えています。じつは百億年前を境に大質量銀河の形成は終息し、その後は宇宙の大部分を占めるより質量の小さい平均

的な銀河 (L^* 銀河) の進化が台頭してきたと考えられており¹⁸⁾, 赤方偏移 1-2 の時代は, 言わば“庶民的な”銀河の成長期であったとされています. その時代に発見された MIPS-J1428 は巨大銀河としては明らかに「大器晩成型」. いや, もしかすると今回はその発見の端緒, 氷山の一角に過ぎず, この時代にも活発な巨大銀河の形成と大規模構造の成長が続いていた可能性を示しているのかもしれない. あかり衛星による今後の赤方偏移砂漠の開拓が待たれます.

9. そして ALMA へ

アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA, アルマ) は, 日本・北アメリカ・ヨーロッパ・チリの諸国が協力して, 南米チリ・アンデス山中の標高 5,000 m のアタカマ砂漠に建設している大型電波望遠鏡です (図 5). ALMA は直径 12 m のアンテナ 64 台と, 日本が建設を担当している「ACA システム」と呼ばれる高精度アンテナ 16 台 (7 m 鏡×12 台と 12 m 鏡×4 台), 計 80 台のアンテナで構成される予定です. 野辺山と同様のミリ波に加えて, もはや赤外線の一歩手前, 最短波長電波であるサブミリ波を受信します. その威力は凄まじく, レインボー干渉計の約 70 倍

の感度^{*8}とハッブル宇宙望遠鏡の 10 倍に相当する解像力を実現し, 銀河の誕生はもとより太陽系外惑星系の誕生, 生命材料の源の解明へと期待が高まっています^{*9}.

今回の MIPS-J1428 の観測には計 6 時間の時間を要しました. これでもミリ波干渉計観測としては短いほうです. しかし, ALMA の集光力と抜群のサイトをもってすれば, まったく同様の観測をわずか 5 秒で完了してしまいます. これは東海道五十三次渡り歩くのにひと月かかっていた江戸時代に突如新幹線が登場してしまったようなもので, 綿密な計画なしには ALMA の能力をもて余しかねません. より暗い「種銀河」を長時間費やして探す, あるいはより広い天域を効率よく観測して MIPS-J1428 のような特異銀河を探す, 若い大銀河を目印として宇宙の大規模構造がどのように走っているのかを知る, などさまざまな可能性を見据えた精緻な観測戦略を立てておかなければなりません. 現在日本と台湾を中心とする ALMA-JT サイエンスワーキンググループで議論が始まったばかりです.

2012 年に ALMA は本格運用を開始します. この頃を境に遠方銀河の分子ガスの検出例は飛躍的に向上するでしょう. これらの発見は, 宇宙の構

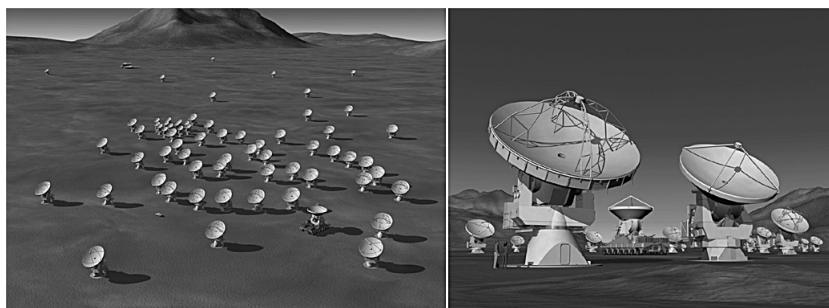


図 5 アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA の完成予想図 (提供: ヨーロッパ南天天文台/ALMA). 現在, 2012 年からの本格運用開始を目指して, 日本・北アメリカ・ヨーロッパ・チリの諸国が協力して, 南米チリ・アンデス山中の標高 5,000 m のアタカマ砂漠に建設中です.

*8 レインボー干渉計による MIPS-J1428 の観測と同様の観測条件の場合. 観測時間としては約 5,000 分の 1 に短縮.

*9 ALMA についての詳細はぜひホームページ (<http://www.nro.nao.ac.jp/alma/>) をご覧ください.

造形成についての深い理解をもたらしてくれるに
違いありません。宇宙の創成と進化、そして私た
ちが暮らすこの天の川銀河のようなごく身近な銀
河の生い立ちまでもが克明に記された宇宙の歴史
書がひも解かれる日はそう遠くないかもしれませ
ん。

謝 辞

本研究は中西康一郎，川辺良平，河野孝太郎，
奥田武志，山田健吉，廿日出文洋，鮫島昌弘の各
氏との共同研究です。本研究に際し，奥村幸子氏
をはじめとする野辺山宇宙電波観測所のみなさま
から多大なサポートをいただきました。また，議
論に多くの時間を割いていただいた齋藤正雄，
高桑繁久両氏に感謝いたします。この場をお借り
して厚くお礼申し上げます。本研究に際し筆者
(田村)は日本学術振興会からサポートをいた
だきました。

参 考 文 献

- 1) Ivison R. J., et al., 2000, ApJ 542, 27
- 2) Stevens J. A., et al., 2003, Nature 425, 264
- 3) Hayashino T., et al., 2004, AJ 128, 2073
- 4) Eales S., et al., 1999, ApJ 515, 518
- 5) Sanders D. B., Mirabel I. F., 1996, ARA&A 34, 749
- 6) Kennicutt R. C., 1998, ARA&A 36, 189
- 7) Solomon P. M., Vanden Bout P. A., 2005, ARA&A 43, 677
- 8) Borys C., et al., 2006, ApJ 636, 134
- 9) Soifer B. T., et al., 2004, BAAS 36, 746
- 10) Desai V., et al., 2006, ApJ 641, 133
- 11) Murray S. S., et al., 2005, ApJS 161, 1
- 12) Iono D., et al., 2006, ApJ 640, L1
- 13) Iono D., Tamura Y., Nakanishi K., Kawabe R., Kohno K., Okuda T., Yamada K., Hatsukade B., Sameshima M., 2006, PASJ 58, 957

- 14) Matsuda Y., et al., 2004, AJ 128, 569
- 15) Sakamoto S., 1999, ApJ 523, 701
- 16) Tamura Y., Nakanishi K., Kohno K., Kawabe R., 2007, in IAU Symp. 235, *Galaxy Evolution Across the Hubble Time*, eds. Combes F. & Palous J. (Cambridge University Press, Cambridge) p.430
- 17) Iye M., Ota K., Kashikawa N., et al., 2006, Nature 443, 186
- 18) Dickinson M., et al., 2003, ApJ 587, 25

CO (3–2) and CO (2–1) Detections in a $z=1.3$ Hyper-Luminous “Monster” Galaxy

Yoichi TAMURA

*The University of Tokyo/ALMA Office, National
Astronomical Observatory of Japan, Osawa 2–21–
1, Mitaka, Tokyo 181–8588, Japan*

Daisuke IONO

*ALMA Office, National Astronomical Observatory
of Japan, Osawa 2–21–1, Mitaka, Tokyo 181–
8588, Japan*

Abstract: We present a first detection of molecular gas in a hyper-luminous infrared galaxy MIPS-J1428 at $z=1.3$. We find that MIPS-J1428 has an enormous amount of the molecular gas ($1.2 \times 10^{11} M_{\odot}$) located under warm and dense conditions, providing a new evidence that the extremely high FIR luminosity of MIPS-J1428 is powered by its starburst activities and MIPS-J1428 is likely to be a progenitor of a massive elliptical galaxy. Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) will allow us to investigate the detailed properties of such a kind of massive young galaxies in the near future.