

## 衝突する銀河に見られる宇宙の「花火」

銀河は、数10億年にわたる宇宙史のなかで、定期的に自ら蓄えていたガスから星を形成し、成長してきました。時には、「スターバースト」と呼ばれる激しい星形成現象が起きますが、通常これは巨大銀河の衝突（図1参照）によるものです。（多くの場合、衝突した銀河は最終的に合体します。）こういった華々しい現象は比較的短寿命（～1億年）で、あっという間に終わってしまう日本の満開の桜シーズンのようにです。新しい星の生成に加えて、銀河の衝突合体は効率的に銀河中心部へガスを供給することを可能にし、銀河中心に超巨大ブラックホールを成長させ、また近傍宇宙の巨大銀河の普遍的な特徴である銀河中心部の星集中（バルジ）を形成します。

天体物理学者は専門が理論か観測かによらず、スターバースト現象を、星間物質の冷たいガス成分のより極端な物理条件（密度、温度、圧力）を研究するための重要な実験室と考えています。なぜ各々の銀河が異なる生成率で星を形成してきたかを理解するために、銀河内部から銀河全体にわたり存在する、星生成の元となる分子ガスの性質を測定することが重要です。

地球からの距離が50メガパーセク（1億6千3百万光年）までの近傍宇宙においては、私たちは銀河間の相互作用と合体が銀河の星形成率に与えるインパクトを明確に理解しています。もっと遠方の若い宇宙では、各々の銀河は分子ガスをより多く蓄えており、銀河の衝突合体の助けなしに、容易に星を形成できる可能性

があり、近傍宇宙とは状況は異なるかもしれません。ごく最近まで、さらに遠い銀河の分子ガスの性質を研究するのは非常に困難なものでした。

### ALMAが開いた遠方のスターバースト銀河観測の新しいウィンドウ

チリのチャナントール高原に設置された望遠鏡、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（ALMA）により、今や、最遠方まで、また従来よりも小さな物理的スケールでの銀河の分子ガス（およびダスト）の研究が可能となっています。これは干渉計として連動する66基のアンテナを、最大で直径16 kmの範囲内に展開することで、実質的に大きな集光面積と、9.6 mmから0.3 mmまでの広い波長域（あるいは31 GHzから1000 GHzの周波数帯域）に渡り、最高の空間解像度のイメージングが達成されたためです（図2参照）。

ALMAは国際的に運営される観測所で、日本が主要な貢献をし、台湾、韓国と共に東アジア参加国グループを構成しています。すばる望遠鏡による広天域かつ深い（暗い）サーベイにより発見されている宇宙初期の大規模構造に存在する遠方のクェーサーあるいは銀河など、興味ある天体を詳しく調べることをALMAは可能にします。

遠方のスターバースト銀河に関しては、干渉計による過去の研究対象は最も明るいものに限定されており、また十分な空間分解能が得られませんでした。しかし、



図1 ハッブル宇宙望遠鏡により観測された、相互作用している銀河ペアArp 87の画像（宇宙望遠鏡科学研究所（STSCI）提供）。

ALMA の登場により、私たちは遠方の銀河内のガスの空間分布と速度分布を容易に調べることができます。

### 遠方にある本物のスターバーストを探す

ALMAを最大限活用するには、まず天域のなかでどの銀河がスターバーストの段階にあるか同定する必要があります。これには、同じ天域を多波長で観測し、各々の銀河の現在（銀河の赤方偏移）また過去における形成史を明らかにする測定をすることが最善の策です。限られた観測施設へのアクセス、また限られたマンパワーでこのような多波長観測データを集めるためには、（各国の望遠鏡にアクセスがある）多国籍の国際共同研究が効果的です。本稿では、私たちのグループが関わる COSMOS 天域での成果について述べてみたいと思います。COSMOS 天域とは天球上で満月の約9倍の連続的な領域で、電磁波のスペクトルの大部分をカバーする地上（例えば VLT、すばる、Keck）と

宇宙空間（例えば、*Hubble*、*Spitzer*、*Herschel*）の多数の望遠鏡によってサーベイされてきました。日本は COSMOS サーベイの重要な参加国であり、超広視野イメージングカメラ（Hyper Suprime Cam）および数年後に続く主焦点超広視野多天体分光器（Prime-Focus Spectrograph）を搭載するすばる望遠鏡は、次世代の COSMOS 天域の可視光サーベイをリードすることが確実です。

最初のステップとして、各々の銀河の星の形成率を（通常は1年あたりに形成する星の総質量として）評価することが必要になります。星は通常は密度の高い分子ガスの領域で生成されるため、その領域はダストで覆われており、可視光または紫外線の放射は吸収され、波長の長い赤外線として再放射されます。ダストで隠された星形成を調べるため、代わりに赤外線波長での銀河の明るさを星形成率の尺度として用います。この目的には、地上での明るい赤外線放射のため、数ミクロンより長い波長での赤外線宇宙望遠鏡（すなわ

ち *Spitzer*, *Akari*, *Herschel*) の観測が必要となります。過去10年あるいはそれ以上の研究により、可視光のデータのみでスターバースト段階にある銀河の星の形成率を評価した場合、赤外線で評価した値よりも一桁もずれてしまうことがあると分かりました。

固有の星形成率を測定するためには、銀河までの距離を知る必要があります。*Herschel* あるいは *Spitzer* の装置は遠方銀河の「見かけ」の明るさだけを測定し、固有の明るさを測ることができないためです。さらに、後に述べるように、各々の銀河までの距離は適切な波長帯で ALMA の測定を実行するためにも必要です。銀河の距離を測ることは、銀河からの光を可視光あるいは近赤外線の波長帯で分散させてスペクトル上の特徴を捉え、その銀河の赤方偏移を測ることで可能になります（膨張宇宙のモデルを仮定すれば、銀河の赤方偏移からその銀河までの距離を推定することができます）。

私たちは、すばる望遠鏡で60夜を費やし、ファイバー多天体分光器 (FMOS) で3500個以上の星形成をしている銀河を分光観測しました。その結果、電離水素由来の H $\alpha$  輝線などを検出し、赤方偏移が1.4～1.7の範囲にある1500個近くの銀河について、その

赤方偏移を測定することができました。このプロジェクトは日本、ヨーロッパ、アメリカの研究者による共同研究で可能となりました。将来の技術的進展のために、すばるの主焦点超広視野多天体分光器 PFS を用いれば、たった数夜で同じ成果が得られるでしょう。それでも、私たちは（赤方偏移を測定した1500個の銀河から）*Herschel* 宇宙望遠鏡により遠赤外線波長帯で検出され明るさが測定された約150個の銀河のサンプルを作ることができました。このユニークな銀河サンプルにより、それらの銀河の固有の星形成率を正確に推定することができ、私たちは典型的な銀河より十分に高い星形成率を示すスターバースト銀河を選び出すことができました。

## 一酸化炭素をトレーサーとした分子ガスの観測

本物の高赤方偏移のスターバースト銀河のサンプルが手に入ったので、星形成をしている領域の分子ガスの放射を検出するために適した波長帯に調整した ALMA を使い、スターバースト銀河を調べることができます。水素分子 (H $_2$ ) が主成分である銀河の分子ガスの全成分を推定するためには、これまでは一酸





図2 アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA; credit: ESO)。

化炭素 (CO) の観測が用いられてきました。これは、水素分子との衝突で励起された高い回転準位の一酸化炭素分子が低い回転準位に遷移する際に電磁波を放射するためです。異なる準位への励起は、温度と密度の違うガスの存在を示します。周波数 (波長) の関数として異なる空間分解能を有する望遠鏡 (ALMA) を用いることから、高次の励起の輝線は、対応する周波数が高いため、より高い空間分解能でそのガス分布を明らかにすることができます。私たちの目的は、与えられた回転準位間の遷移 (例えば回転準位  $J = 2$  から  $1$  への遷移; 静止周波数 = 230.54 GHz) の CO 輝線の光度を ALMA で測定し、その明るさを分子ガスの総質量に換算するという方法を用いることです。一酸化炭素の光度とガスの質量の関係については、私たちの天の川銀河、低赤方偏移および高赤方偏移の銀河に存在する分子雲の観測に基づき、知見が得られていま

す。系外銀河については、銀河内のガスの質量を一酸化炭素の光度とは独立に測定する必要があります。この CO 光度とガス質量の関係は、高赤方偏移のスターバースト銀河とは大きく異なっている可能性があり、またその関係のそもそもの精度・信頼性も含めて、現在かなりの論争が進行中です。

### 高赤方偏移での銀河衝突により引き起こされる典型的スターバースト

Kavli IPMUで、私たちは赤方偏移  $z \sim 1.6$  (宇宙年齢が現在の 30 % だった時代) の 123 個のスターバースト銀河からの CO (2-1) 遷移の全輝線放射を検出するため、ALMA の観測を実行しました。これらの銀河サンプルは、星形成率がもっと典型的な銀河の 4 倍以上という条件で選ばれたもので、1 年当たり形成される星の質量が太陽質量のほぼ 100 倍から 700 倍の

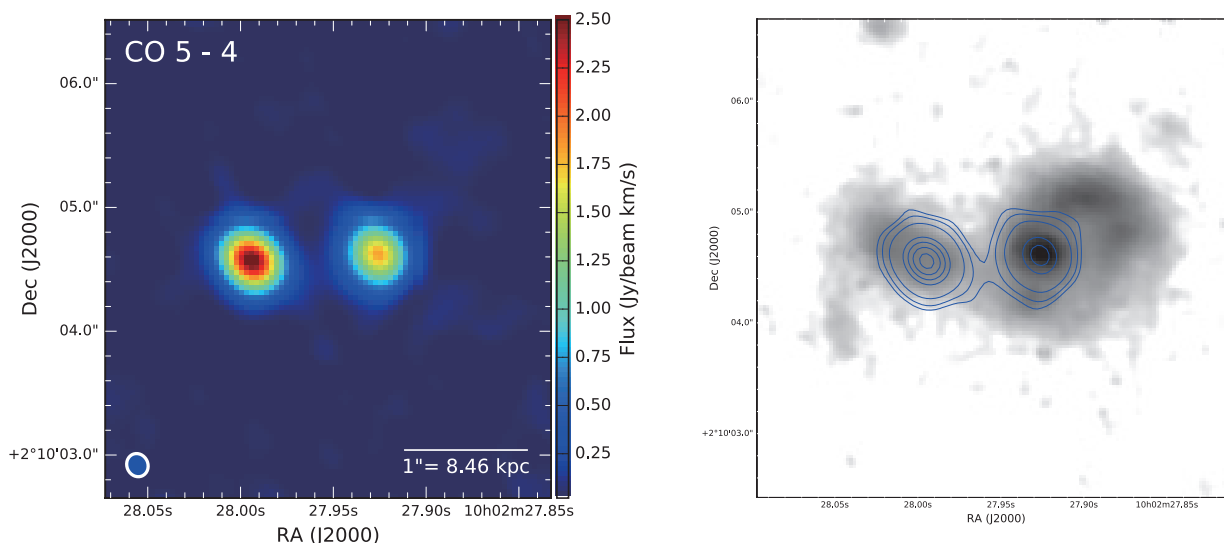


図3 (左) ALMAで観測した PACS-787 の2つの銀河からの CO(5-4)遷移の輝線放射の分布。(右) ハッブル宇宙望遠鏡の広視野カメラ3を用いて撮像した赤外線イメージ。青い等高線はCOの分布を示す。

範囲にも及ぶ、非常に活発なスターバースト銀河です。一酸化炭素の輝線は1個の銀河を除き有意に検出され、これらのスターバースト銀河に大量のガス貯蔵(燃料)が存在することを明らかにしました。

一酸化炭素からの輝線が最も明るい銀河は、星形成率が最も高く1年当たり太陽質量の720倍という銀河、PACS-787であったことは、驚くべきことではないかもしれません。しかし、高赤方偏移宇宙で期待される、ガスを豊富に含む銀河同士の衝突合体の数値シミュレーションは、PACS-787で見られるような爆発的な星形成を再現することはできず、どのような物理現象が爆発的な星形成を誘発しているのか謎が深まり、ますます私たちの興味をかき立てました。

この疑問に迫るために、私たちは静止周波数が576.27 GHzのCO(5-4)遷移の輝線放射を検出することにより、より高い空間分解能でPACS-787を再観測しました(図3左参照)。驚いたことに、その一酸化炭素の輝線は8.6キロパーセク離れた2つの異なる銀河から放射されていることが判明しました。PACS-787

の非常に高い星形成率から、シミュレーションに見られるように、2つの銀河が合体する最終段階に近いと予想していたのですが、そうではなく、2つの銀河はまだ相互作用の開始段階にあることが分かったのです。最近ハッブル宇宙望遠鏡で撮像した赤外線イメージ(図3右参照)によると、潮汐力により星がはぎとられ2つの銀河の間にブリッジを形成している形跡があり、またそれは一酸化炭素の輝線放射でも明らかであることから、私たちは進行中の2つの銀河の衝突のはっきりした証拠を得たのです。

これらの観測に基づき、PACS-787の高い星形成率は、ガスを豊富に含む2つの銀河の相互作用とそれぞれの銀河の運動の軌道がうまく組み合わせり、それぞれの銀河の中心領域へのガスの流入が誘発され、それぞれの銀河で爆発的なスターバーストが起こったのではないかと考えています。私たちはさらに、各々の銀河からのCO輝線が回転運動することを発見しました。(回転速度は重力によって起こるので)これはCO輝線の光度とは独立にガス総質量を知る手がかりになります。

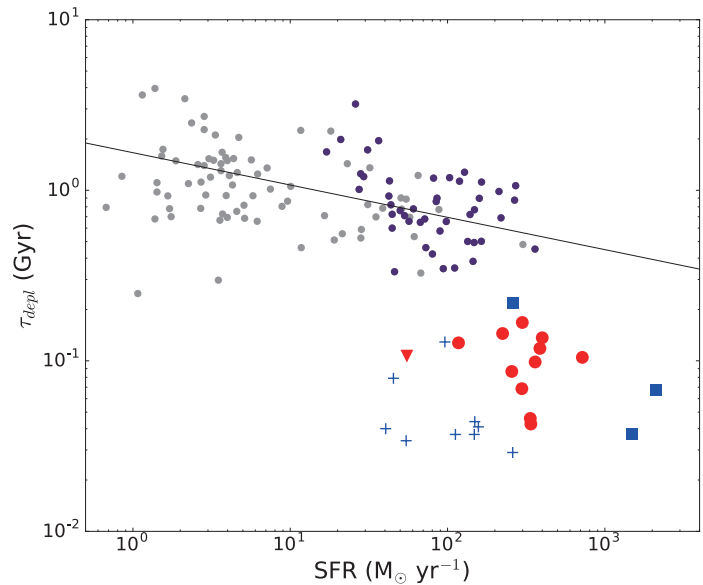


図4 星形成率(SFR)と銀河のガスを完全に消費するまでの時間 ( $t_{\text{depl}} = M_{\text{gas}} / \text{SFR}$ ) の関係。色つきの大きな記号はスターバースト銀河を示す (赤い点は本稿で述べたALMAのサンプル)。黒い小さな点はもっと典型的な星形成銀河のサンプルを示す (直線はそれらのベストフィット)。

## 遠方のスターバーストのエンジンは高効率

遠方のスターバースト銀河の星形成率が、(典型的な星形成銀河よりも) 大きなガス質量によるものか、ガスから星への転換効率が (典型的な星形成銀河よりも) 高いことによるのか、あるいはその2つの組み合わせによるものなのかを決めることは非常に面白い問題です。これらのシナリオを区別するため、私たちは適当な関係を使い、12個のスターバースト銀河のサンプル全部について一酸化炭素の光度を分子ガスの質量に換算してみることにしました。効率に関しては、ガスの質量を星形成率で割ったものを銀河がガスを全て消費するのに必要な時間スケールとして用います。結果として、効率的に星を形成している銀河では短時間でガスが枯渇することを示唆することが分かりました。

図4から、スターバースト銀河のガスが枯渇するまでの時間は5千万年から1億5千万年で、もっと典型的な星形成銀河の10億年程度に比べて著しく短いこと

が分かります。星を形成する時間スケールがこのように違うことは、星形成が非常に速く進行するのに適した条件を誘発する銀河の衝突合体のような機構が、スターバーストを引き起こすきっかけになっているのではないかということを示すと考えられます。しかし、まだ高赤方偏移のスターバースト銀河 (およびもっと典型的な銀河) について、一酸化炭素の光度をガスの質量に換算するために必要な正確な比例係数の値に不定性が残っているため、論争は完全には終わっていません。

ALMAを用いてもっと高い分解能で観測を行い、銀河内の星形成領域の物理的特徴を100パーセク程度までの精度で決定することにより、さらなる進展が得られることでしょう。さらに、すばる望遠鏡のサーベイから得られる高赤方偏移の銀河の新しいサンプルを用いることにより、私たちの宇宙の星形成史の理解が大きく進展することも間違いありません。