

モンスター銀河

但木 謙一

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

e-mail: tadaki.ken@nao.ac.jp



アルマの高感度・高空間分解能でのサブミリ波観測によって、遠方宇宙にある爆発的な星形成銀河（モンスター銀河）は、概して中心1 kpc程度のコンパクトな領域で星を作っていることがわかってきた。ここで作られた星々が、現在の宇宙にある巨大楕円銀河の中心部の膨らみ（バルジ）を構成していると考えられ、この銀河中心の猛烈な星形成領域で起きている物理過程の理解はハッブル系列の起源の解明につながるかもしれない。私たちはアルマを使って $z=4.3$ にあるモンスター銀河の観測を行い、①銀河同士の大規模な衝突合体の兆候が見られないこと、②分子ガスが自らの重力によって潰れやすい状態にあることを明らかにした。この重力的に不安定なガス円盤をもつモンスター銀河では、普通の銀河よりも効率的に星を作ることができ、結果として猛烈な星形成活動を実現しているのだと結論づけた。

1. はじめに

「モンスター銀河とらえた」というアルマ望遠鏡の観測成果を紹介する記事が、2018年8月30日の新聞紙面の一面を賑わせた。よほど平和な日だったのだろう。幸運にもネイチャー誌に掲載された私たちの研究成果¹⁾は、124億光年彼方にある銀河の分子ガスが重力的に不安定な状態にあることを確かめたという、とても一般の方々の関心を得られるとは思えない内容だったのだが、「モンスター銀河」という言葉によほどインパクトがあったのか、有難いことに多くの新聞紙面・テレビのニュースで紹介して頂いた。研究成果の発表においても、ブランディングというのは重要であると貴重な教訓を得た。このモンスター銀河というのは、猛烈な勢いで星が誕生している巨大な銀河のことで、その星形成活動の規模が太陽系のある天の川銀河に比べて1000倍のペース（星形成率が年間あたり太陽1000個分の質量）というのが私の中の基準としてあるが、明確に定められて

いるものではない。2006年に伊王野大介氏（現国立天文台准教授）や田村陽一氏（現名古屋大学准教授）が88億光年彼方にある猛烈な星形成銀河の研究結果²⁾についてプレスリリースした際には、「怪物銀河」と表現されていた。はじめて「モンスター銀河」という言葉が使われたのは、2008年に谷口義明氏（現放送大学教授）が123億光年彼方にある銀河の研究結果³⁾についてプレスリリースした時だと認識している。

モンスター銀河という言葉は学術界では使われることはなく、論文などでは「サブミリ波銀河（submillimeter galaxies）」に近い表現に当たる。サブミリ波というのは赤外線と電波の中間にあたる1ミリ程度の波長のことで、20年ほど前から天文学の観測に応用されるようになった。銀河の中では、若い星が周囲にあるダスト（塵）を熱しており、その温められたダストからの放射がサブミリ波で観測される。そのためサブミリ波で明るい銀河ほど、その銀河内部では多くの若い星が生まれていることになる。激しい研究競争を経て⁴⁾、

1998年に発行されたネイチャー誌には、初めてサブミリ波銀河を発見したことを報告する2つの論文が掲載され^{5),6)}、サブミリ波観測による遠方銀河研究の開始を告げた。初期のサブミリ波観測では、10時間以上同じ領域を観測し続けて、2ミリジャンスキー（ジャンスキーは明るさの単位）程度の銀河をぎりぎり検出できる程度の感度であった。恐ろしいことに現在のアルマ望遠鏡を使えば、同じ明るさの銀河を10秒で検出できてしまう。このサブミリ波観測における劇的な感度の向上により、「サブミリ波銀河」=「モンスター銀河」という図式はもはや成り立っていない。研究者でもこの部分を正しく理解していない人をたまに見かける。アルマによって初めて見つかるような1ミリジャンスキーより暗いサブミリ波銀河は、もはやモンスターではないのだ。

その点、私たちの研究対象の銀河である「COSMOS-AzTEC-1（コスモス・アズテック・ワン）」は真のモンスターだと言える。ハワイのマウナケア山頂にあるジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡に搭載された144画素のサブミリ波カメラ「AzTEC」を用いて、「COSMOS」と呼ばれるろくぶんぎ座の方向にある0.3平方度（満月の大きさの約1.5倍に相当）に渡る領域で観測を行い、発見した50個のサブミリ波銀河の中で最も明るかった天体がCOSMOS-AzTEC-1である⁷⁾。その明るさは16ミリジャンスキーであり、星形成活動の規模が天の川の1000倍というモンスター銀河の条件を完璧に満たしている。しかしながらこのような極めて明るい天体は、手前にある銀河によって光が増光する重力レンズ効果を受けていることがしばしばある⁸⁾。見かけ上明るくても、実際の明るさとは限らないのだ。その点、COSMOS-AzTEC-1はこの重力レンズ効果を受けていないことが確かめられており、お手本のようなモンスター銀河である。これ以降は「モンスター銀河」=「重力レンズ効果を受けておらず、サブミリ波で極めて明るい単独の銀河」と定義する。

2. モンスター銀河の観測的性質

100億光年を超えるような遠方宇宙にある星形成銀河までの距離（赤方偏移）を測定するためには、Ly α 輝線やH α 輝線などの電離した水素からの放射を観測することが多いが、これらの輝線放射の観測はモンスター銀河と相性が良くない。モンスター銀河は塵に覆われているせいで、Ly α 輝線やH α 輝線などの放射は激しく減光されてしまい、観測が難しい。このような銀河の場合は減光の影響を受けにくい、より長波長帯にある一酸化炭素分子（CO）や炭素原子（[C I], [C II]）の輝線放射を観測するのが効果的である。COSMOS-AzTEC-1においても、メキシコにある巨大ミリ波望遠鏡LMTやハワイにあるサブミリ波アレイSMAを用いた観測によって、CO輝線と[C II]輝線の両方が検出され、124億光年彼方（赤方偏移 $z=4.3$ ）にあることがわかった⁹⁾。他のモンスター銀河も100-120億光年彼方の宇宙に多く、現在の宇宙には存在していない。今から100-120億年前というのは、138億年の宇宙史上銀河の活動が最も活発な時代であり、銀河の形成・進化を理解する上で非常に重要である。

さて124億年前のモンスター銀河COSMOS-AzTEC-1は、現在の宇宙ではどのような姿をして存在しているのだろうか？ おそらく銀河団の中心にいるような巨大楕円銀河へと進化していると考えられる。モンスター銀河は新たな星を猛烈に作っているだけでなく、すでに大量の星が存在しており、その全星質量は太陽1千億個分（ 10^{11} 太陽質量）以上で、124億年前にも関わらず、天の川銀河の2倍以上の星が存在している。その上でまだなお猛烈に星を作り続けているので、モンスター銀河は最終的にはその2倍にも3倍にも成長し、星質量を増やすであろうと期待される。現在の宇宙でそのような星質量をもつ銀河と言えば巨大楕円銀河であり、モンスター銀河はその祖先

の最有力候補天体だと考えられている。従って124億年前のモンスター銀河を観測することで、楕円銀河がどのように誕生したのか直接観測ことができ、その歴史を紐解くことができるかもしれない、というのがモンスター銀河を研究する大きな動機の1つである。

3. アルマによる超高空間分解能観測

2016年、私はドイツにあるマックスプランク地球外物理学研究所のポスドク研究員として日々を過ごしていた。当時の私はモンスター銀河の研究には直接関わっていなかったのだが、ある日arXivのサイト（出版前の論文などをアップロードできるサーバー）でモンスター銀河に関する興味深い論文を見つけ、衝撃を受けた。アルマを用いてCOSMOS-AzTEC-1のダスト放射を観測したというものであったのだが、驚くべきはこの観測の空間分解能が0.02秒角（130 pc）という、ハッブル宇宙望遠鏡の観測や同時期に行われていた他のアルマの観測に比べて10倍も高かったことである¹⁰。このサブミリ波での超高空間分解能観測というのは、世界が一丸となってアルマを建設した大きな目的の1つであったが、私が思っていたより早く実現した。印象的だったのはハッブル宇宙望遠鏡の画像の上にアルマのダスト放射の空間分布を重ねた図（図1）で、数々の銀河を美しく描き出してきたあのハッブルの画像のピクセルがでかかど見えてしまっていたのだ。またアルマのような干渉計を用いて、0.02秒角のような超高空間分解能で観測してしまうと、ミッシング・フラックスの影響も大きくなり、遠方銀河の観測の場合、ほとんど検出できなくなるものだが、この観測画像には、モンスター銀河中心核の空間構造がしっかりと写っていた。

2017年4月、海外でのポスドク生活にも疲れ、私は日本学術振興会の特別研究員として日本へ帰り、先の論文の筆頭著者である伊王野准教授と共にモンスター銀河の研究を始めた。アルマによる

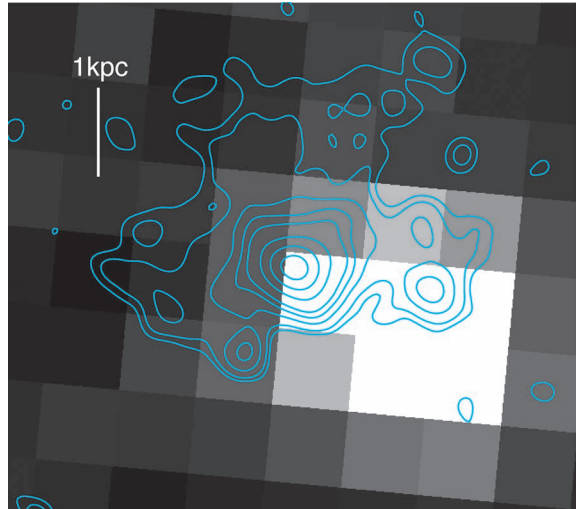


図1 アルマの観測によって得られたCOSMOS-AzTEC-1のダスト放射の空間分布（青い等高線）を、ハッブル宇宙望遠鏡の観測画像上に重ねたもの。アルマ望遠鏡の超高空間分解能観測によって0.015秒角の空間分解能を達成しているが¹⁰、この図におけるアルマデータの空間分解能は0.07秒角である。それに対してハッブルデータの空間分解能は0.18秒角である。白い棒は1キロパーセク（0.15秒角）のスケールを示している。

0.2秒角（1-2 kpc）程度の空間分解能のダスト放射の観測は、多くの研究者によって行われており、ダストの放射のほとんどが銀河の中心1-2 kpc程度のコンパクトな領域に集中しているということはコンセンサス（一致した意見）となっていた。しかし1 kpcを切るようなさらに高い空間分解能で観測してみると、話はそう単純ではなく、もっと複雑な空間構造をしていることがわかったのだ。z=4.3にあるCOSMOS-AzTEC-1の場合、中心に集中したダスト放射だけでなく、中心から離れた場所で複数のクランプ（塊）が検出されていた。z=1-4にある星形成銀河のハッブル宇宙望遠鏡の静止系紫外域での観測画像には、しばしばこのようなクランプ構造が見られる。シミュレーションなどを用いた理論的な研究によれば、この時代の星形成銀河はガスが豊富なため、円盤中の

ガスが重力的な不安定な状態にあり、つぶれてクランプになると考えられている¹¹⁾。これらの局所的に密度の高くなったクランプは円盤中のガスとの動的摩擦により角運動量を失い、銀河の中心部へと移動し、バルジ形成のためのガス供給源としての役割を果たしうる。そのためこのクランプ構造というのは銀河の形態進化を理解する上で重要な構成要素かもしれない。

上記の仮説を実証するためには、分子ガスの観測が必要不可欠であり、私はアルマでCOSMOS-AzTEC-1の分子ガス（一酸化炭素分子、CO）の輝線放射を0.06秒角の空間分解能で観測する提案書（プロポーサル）を提出した。観測天文学者が新たな観測データを取得するためには、まずこのプロポーサルを書き、審査に通らなくてはならない。2017年のアルマの観測公募サイクル5期では、その採択倍率は約4倍であった。4つプロポーサルを出せば1つは通る計算だが、世界中の一流天文学者達が出すわけなので、アルマの観測時間を獲得することはそんなに簡単ではない。幸いにも私たちが出したCOSMOS-AzTEC-1の観測プロポーサルは最優先課題として採択されたのだが、実のところ審査員による科学的評価はあまり高くなかった。というよりも真ん中よりも下の順位であり、本来であればフィラー（穴埋め観測）プログラムとしても採択されるような評価ではなかった。本稿をここまで読んでくださった読者の方だけに特別な情報を教えるが、2017年の時点では、アバンギャルドなアルマの性能に研究者が追いついておらず、超高空間分解能観測（一番広がったアンテナ配列での観測）に挑戦する人があまりいなかった。そのため予め用意された観測時間に対して、申請数が少なく、科学的評価がそれほど高くないプログラムも採択されたのだ。ただ当時の傾向とは逆に、今後は超高空間分解能観測に挑戦する人が増えてくる可能性が高いことに加え、一番広がったアンテナ配列で観測できる機会が2年に1回に減ってしまったため、超高空間分解能の

観測時間が取りにくくなるかもしれない。革新的な研究成果を挙げるためには、やはり周りと同じことをしてはだめなのだ。

4. ダストから分子ガスへ

2017年11月、予定していた全ての観測が完了するのをウェブ上で確認した。観測後はチリ観測所のスタッフの方々によってデータの一時処理がなされ、要求していたデータの品質に到達していることが確認されてから、研究者の手に渡る。観測されてからデータが届くまでの間、私の心は楽しみな気持ちだけではなかった。ミッシング・フラックスの影響を先に少し述べたが、干渉計による超高空間分解能の観測は、細かい構造を捉えるのは得意だが、広がった構造があってもそれを見逃してしまうというデメリットがある。もし14時間もの貴重なアルマの時間を使ってCOSMOS-AzTEC-1を観測して、分子ガスが思っていたよりも広がっており、画像に何も写っていなかったらどうしようかと不安に思っていた。

2017年12月、観測データが私の元に届いた。結果は大成功、0.06秒角（400 pc）というCO輝線観測ではかつてなく高い空間分解能のおかげで、ダストで見えていたクランプや広がった円盤構造を分子ガスでも捉えることができた（図2）。さらにはダストの観測ではわからない、ガスの速度構造まで調べることができた。COSMOS-AzTEC-1にある分子ガスは北西から南東にかけて速度が単調減少しており、その速度場は回転する円盤銀河の動力学モデルによって特徴付けられた。銀河なのだから回転していて当たり前だと思われるかもしれないが、巨大楕円銀河の祖先だと考えられ、爆発的な星形成現象が起きているモンスター銀河においては自明ではなかった。

5. 銀河同士の衝突合体の影響

「巨大楕円銀河はどのように誕生したのだろうか？」という疑問に対して、この数十年間広く受

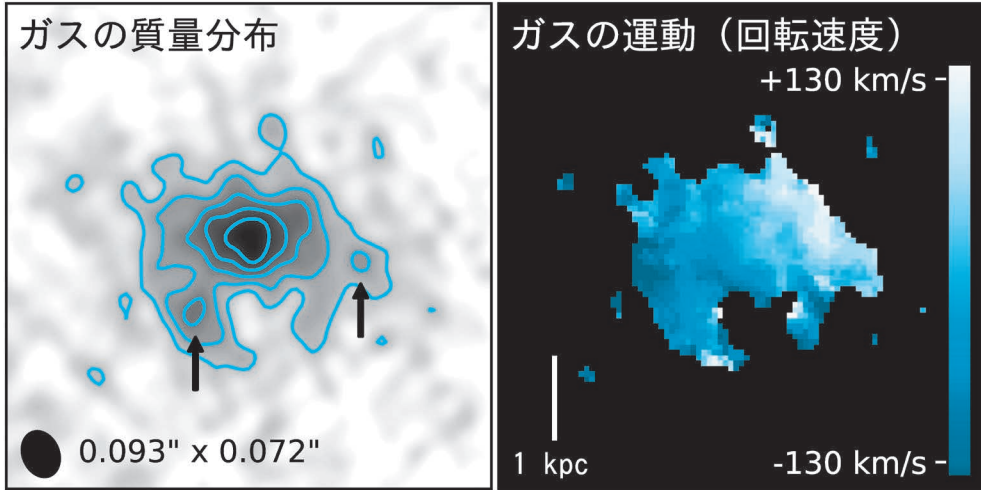


図2 アルマの観測によって得られたCOSMOS-AzTEC-1の分子ガスの質量(左)と回転速度(右)のマップ. 左の図から, 分子ガスの大部分が中心から1キロパーセクの領域に集中していることだけでなく, 中心から離れた位置に2つの塊(矢印の位置)があることがわかる. 右の図からは, 銀河の回転速度が北西方向(右上)から南東方向(左下)にかけて, 単調的に減少しており, 衝突合体によって運動が乱されているような様子は見られないことがわかる. 左下の楕円の黒丸は, この観測画像の空間分解能を表している.

け入れられている説の1つは, 「銀河同士の衝突合体」である. ある円盤銀河が別の銀河と力学的に相互作用すると, 銀河内にあるガスは非軸対称なポテンシャル場を作り, 共回転半径より内側にあるガスは角運動量を失い, 銀河の中心へと落ちていく¹²⁾. それに伴う中心部での爆発的な星形成によって, 円盤銀河はバルジ成分が卓越した形態へと変形し, 何らかの物理機構によって星形成活動が止まれば, 楕円銀河の出来上がりとなる. 星形成活動を止める物理機構は銀河形成研究における最重要課題の1つであるが, ここでは触れなくておく.

アルマによるダスト放射の観測によって, 楕円銀河の祖先の最有力候補天体であるモンスター銀河では中心集中した星形成活動が実際に確認されているが, これは銀河の衝突合体によって引き起こされたものなのだろうか? もし衝突合体の影響を受けている最中であれば, その銀河の速度場は乱れている可能性が高い.

話をCOSMOS-AzTEC-1の分子ガスの観測に戻

すと, COSMOS-AzTEC-1の速度場は回転円盤モデルとよく合っており, 円盤中にあるガスの動きの激しさ・乱れ具合(局所的な速度分散)も回転運動に比べて小さいことがわかった. 衝突合体の影響が100%ないと言い切ることは難しいものの, 衝突合体中であることを積極的に支持する観測結果は得られなかった. 私はプレスリリースなどでこの点を強調することが多いのだが, 決してアンチ衝突合体説という立場ではない. 細かいことを言うと, 衝突合体はその銀河の質量比に応じて2種類に分けることができるのだが, 私がその影響は小さいだろうと主張しているのは, 同程度の質量をもつ銀河同士の衝突合体いわゆる「メジャー・マージャー」のことである. 本体の銀河に対して, はるかに質量の小さな銀河との衝突合体「マイナー・マージャー」や大規模構造に沿ったガスの流入「コールド・ストリーム¹³⁾」については, むしろ積極的に支持する立場である. こちらについてはその証拠を集めるべく, 現在研究を進めている.

6. 星形成活動を自己制御する銀河

アルマの観測によってCOSMOS-AzTEC-1は回転する分子ガス円盤をもっていることがわかった。観測したCO（一酸化炭素分子）輝線の明るさから1) 分子ガスの表面質量密度、速度構造から2) 回転速度や3) 速度分散を見積もることができる。この3つの物理量が得られれば、回転している系におけるガスの重力不安定性を議論することが可能である¹⁴⁾。これは分子ガスが自らつぶれようとする重力と、それに抗うコリオリ力や内部圧力のどちらの力が勝つかという問題である。重力が勝っている重力的に不安定な状態では、分子ガスがつぶれ、効率的な星形成へとつながり、反対に重力が負けている重力的に安定な状態では、星形成活動を抑圧する。多くの銀河では、ガスはその境界付近の状態（ぎりぎり重力的に不安定な状態）にあり、星形成を自己制御していると考えられている。

ここでいう重力を支える圧力というのは、大質量星からの星風や超新星爆発による衝撃波に起因するものであり、星形成率と共に大きくなる。①分子ガスが重力的に不安定な状態にあると、星形成活動が活発になり、一時的に内部圧力も大きくなる。②この内部圧力が自己重力に打ち勝った時点で、分子ガスは重力的に安定な状態になり、今度は星形成活動が弱まり、内部圧力も小さくなる。③その一方で銀河に新たなガスが降着すると、分子ガスの表面質量密度は増加し、また自己重力が内部圧力に打ち勝ち、ガスは重力的に不安定な状態になる。この①②③を繰り返すため、ガスはぎりぎり重力的に不安定な状態を維持し、銀河はその星形成活動を自己制御しているというわけである。

しかしながらCOSMOS-AzTEC-1では分子ガスが完全に重力的に不安定な状態にあった。この結果はCOSMOS-AzTEC-1で分子ガスクランプを検出できたことや猛烈な星形成活動が見られるこ

とど実に整合的である。モンスター銀河では、分子ガスのほとんどが中心1-2kpcの領域に集中しており、自己重力によって潰れクランプとなり、また同時に効率的な星形成によって、天の川銀河の1000倍もの猛烈な星形成活動を実現していると考えられる。

7. 今後の展望

COSMOS-AzTEC-1の研究成果について、2018年4月にネイチャー誌に論文を投稿し、6月には無事に受理の連絡を受けた。アルマの観測による研究は競争が非常に激しいが、共同研究者の方々の長年に渡る努力に加えて、いくつかの幸運にも恵まれ、プロポーサル執筆から論文受理まで、1年3ヶ月の期間でなんとか結果をだすことができた。モンスター銀河をモンスターたらしめる要因は重力的に不安定な分子ガスにあるとわかって実に気持ちが良い。ここで研究を止めてしまうのが一番幸せに終われるのだが、あえてさらなる謎に挑もうと思う。

それはなぜモンスター銀河では分子ガスが中心1-2 kpcの領域に集中しているのかという問題である。今回メジャー・マージャー説には否定的な観測結果が得られたものの、それに代わる物理機構についてまだ全く説明できていない。この問いに答えることは、銀河の形態（すなわちハッブル系列）の起源の謎を解き明かすことにつながる。星形成活動が活発な銀河の形態は円盤成分が卓越しているのに対して、星形成を終えた銀河の形態はバルジ成分が卓越している。モンスター銀河の中心に集中した分子ガス、そして猛烈な星形成活動は、銀河の形態を円盤卓越型からバルジ卓越型へ変えることができる可能性を秘めているのだ。銀河の回転円盤にある分子ガスを中心領域に集めるためには、非軸対称なポテンシャル場を作るなどして、なんとかガスの角運動量を失わせなくてはいけない。マイナー・マージャーがトリガーなのか？ コールド・ストリームなのか？ それと

もこの時代のモンスター銀河には近傍銀河に見られるような棒構造や渦巻き構造をすでに獲得しているのか？ アルマの観測によって、これらの可能性を1つ1つ検証していくしかない。

また現在のモンスター銀河研究は、その強いダスト減光のため、サブミリ波や電波の観測に頼らざるを得ず、ダストやガスと行った星間物質の理解に偏っている。ハッブルの後継機であるジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡はダスト減光に強い3-4ミクロンの波長帯での高空間分解能観測を実現し、ダストに埋もれた銀河における星の空間分布を調べることが可能となる。星・ダスト・ガスを網羅したモンスター銀河研究が今から楽しみである。

謝辞

本稿で紹介した研究成果は伊王野准教授を始めとした共同研究者の方々の長年に渡る観測の蓄積の上に成り立っています。新参者であるのにも関わらず、私にCOSMOS-AzTEC-1に関する研究をリードする機会を与えてくださった共同研究者の方々にたいへん感謝しています。また私を研究者としてここまで育ててくださった児玉忠恭教授（東北大学）、迅速に観測データの較正・解析を行ってくださった東アジア・アルマ地域センターのスタッフの方々、本稿を執筆する機会を与えてくださった天文月報編集委員の松田有一助教（国立天文台）に御礼を申し上げます。なお、本研究は日本学術振興会の特別研究員制度の支援を受けて行われました。

参考文献

- 1) Tadaki, K., et al., 2018, *Nature*, 560, 613
- 2) Iono, D., et al., 2006, *PASJ*, 58, 957
- 3) Capak, P., et al., 2008, *ApJ*, 681, L53
- 4) 谷口義明, 2008, *モンスター銀河狩り* (NTT出版)
- 5) Hughes, D. H., et al., 1998, *Nature*, 394, 241
- 6) Barger, A. J., et al., 1998, *Nature*, 394, 248
- 7) Scott, K. S., et al., 2008, *MNRAS*, 385, 2225
- 8) Ikarashi, S., et al., 2011, *MNRAS*, 415, 3081
- 9) Yun, M. S., et al., 2015, *MNRAS*, 454, 3485
- 10) Iono, D., et al., 2016, *ApJ*, 829, L10
- 11) Noguchi, M., 1999, *ApJ*, 514, 77
- 12) Bournaud, F., et al., 2011, *IAU Symp* 271, 160
- 13) Dekel, A., et al., 2009, *Nature*, 457, 451
- 14) Toomre, A., 1964, *ApJ*, 139, 1217

Monster Galaxy

Ken-ichi TADAKI

*National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Recent ALMA deep and high-resolution submillimeter observations reveal that starburst galaxies in the early Universe (monster galaxies) form stars within the central 1-2 kpc region. Understanding physical processes in the extreme star-forming region may shed light on the origin of the Hubble sequence as monster galaxies are the most likely progenitors of giant ellipticals in the local Universe. Exploiting the ALMA data from our new observations of a very bright submillimeter galaxy at $z=4.3$, we found that the galaxy is less affected by a major merger and the gas in the galaxy is gravitationally unstable. The gravitational instability makes the extreme starburst galaxy “monster”.