

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14769

研究課題名（和文）アルマ望遠鏡で探る銀河衝突による円盤銀河の形成

研究課題名（英文）Study of disk galaxy formation via dynamical interaction using ALMA

研究代表者

植田 準子（Ueda, Junko）

国立天文台・アルマプロジェクト・特任助教

研究者番号：60749935

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：世界最高レベルの性能をもつアルマ望遠鏡で取得したデータから最新の解析技術を用いて電波画像を作成し、衝突末期段階の銀河に分布する分子ガスの広がりや質量を適切に測定することに成功した。サンプルの中には、円盤銀河にみられる安定した分子ガス円盤をもつ銀河もあり、円盤銀河への進化が期待される。また、新しい星の材料となる高密度ガスに注目し、その性質と星形成活動との関係を調べた結果、銀河の衝突や合体が星の形成メカニズムを変化させている示唆を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の主要な構成要素である銀河の形成・進化の解明は、我々が住む天の川銀河をはじめ多種多様な銀河の起源に迫り、宇宙の歴史を理解する上で重要課題である。近年、遠方宇宙において銀河の多様性がいつどのように出現したかという研究も活発に行われており、近傍宇宙でのより詳細な研究の必要性が高まっている。アルマ望遠鏡で取得した観測データをもとに進めた本研究では、銀河衝突・合体を経験した銀河の形成・進化シナリオを構築する上で有用な結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：High-sensitivity imaging achieved by the multiple arrays of ALMA allowed us to accurately measure the extent and mass of cold molecular gas in galaxies at the final stage of mergers. Some sources in our sample have stable molecular gas disks, which resemble those observed in local disk galaxies, possibly leading to the reformation of disk galaxies. In addition, I focused on the properties of the dense gas, which is the raw material for new stars. The relation between its properties and star formation activity suggests that galaxy interactions and mergers may change the mechanisms of star formation. These results would help us construct a scenario for galaxy formation and evolution through dynamical interaction and merger.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 銀河形成 銀河衝突

### 1. 研究開始当初の背景

星や星の材料となるガス、ダークマターなどで構成されている銀河は、互いに衝突することがある。衝突すると、互いの重力で銀河の形態は歪み、内部で星の形成活動が活性化することが知られている。最終的に衝突した銀河が合体した場合、新しい銀河が誕生する。このように、銀河は衝突や合体を繰り返して進化してきた。また、銀河が衝突する頻度は、昔の宇宙ほど高かったことがわかっている。したがって、衝突を起こしている銀河（衝突銀河）の研究は、銀河の進化だけでなく、宇宙の歴史を理解する上でも必須である。

銀河を形で分類した場合、我々の住む『天の川銀河』に代表される円盤構造を持つ「円盤銀河」と星が楕円体状に分布している「楕円銀河」の二種類に大きく分かれる。古くから「衝突を経て合体した銀河は楕円銀河になる」という説が支持されてきた。しかし、この説が正しければ、近傍宇宙で観測されている大多数の円盤銀河の存在が説明できないのである。この矛盾を解決するシナリオとして、「合体した銀河は楕円銀河だけでなく、円盤銀河にも進化する」という新しい説が数値シミュレーションをもとに唱えられ始めたが、その真偽は明らかになっていない。

先の説が支持される理由には、衝突銀河で誘発される活発な星形成活動も関係している。合体後の銀河では、星の材料となるガスを使い果たしながら一気に中心付近で大量の星が形成され、そのまま楕円銀河に進化すると考えられているのである。しかし、実際に衝突・合体後の銀河で起こっている星形成のメカニズムは明らかになっていない。そこで、合体後の衝突銀河における星の形成活動の性質を調査することも銀河の形成・進化を理解する上で鍵となる。

### 2. 研究の目的

銀河に分布するガスの特性から、衝突・合体した銀河の形成・進化経路を観測的に検証する。特に、衝突末期段階の銀河（合体後の衝突銀河）に形成されている円盤銀河の基礎となり得るガス円盤の性質に着目する。また、新しい星の材料となる高密度ガスにも注目し、衝突銀河でどのように星の形成活動が誘発されているかを理解することも本研究の目的のひとつである。

### 3. 研究の方法

銀河の形成や進化を調査するためには、偏りのないサンプルを使用して、統計的研究を行う必要がある。そこで、高感度・高空間分解能の観測が容易に可能である世界最高レベルの性能をもつ電波望遠鏡「アルマ望遠鏡」をはじめとする電波望遠鏡を使用して、近傍宇宙にある衝突末期段階の14の銀河に分布する分子ガスを観測した。

そのうち10天体では、アルマ望遠鏡の初期科学運用期間に取得されたデータから、円運動をする分子ガス円盤の存在が確認されている。しかし、そのデータには欠点があった。電波望遠鏡には「電波干渉計」と「単一鏡型電波望遠鏡」の二種類がある。電波干渉計は、高空間分解能の観測が可能で天体の細かい構造を観測できるが、広がった天体を検出できない。一方、単一鏡型電波望遠鏡は、電波干渉計が不得意とする広がった天体を検出するのに優れているが、分解能の点で電波干渉計に劣る。現在のアルマ望遠鏡は電波干渉計（12mアレイ）と単一鏡型電波望遠鏡を含む望遠鏡群（ACA）の両方で構成されているが、初期科学運用時は12mアレイのみ使用可能であった。既存のデータは12mアレイのみで取得されていたため、広がった分子ガスを検出できず、ガスの分布を適切に測定できていなかった可能性があった。そこで、広がった天体の検出に優れたACAを用いてサンプル銀河を再観測し、分子ガスの分布を再評価した。

また、アルマ望遠鏡で取得した電波画像は、低温・低密度分子ガスの分布を表している。それに加えて、単一鏡型電波望遠鏡で取得した新しい星の材料となる高密度ガスのデータも利用した。異なる性質のガスを検出しているデータを組み合わせることで、衝突・合体後の銀河の進化・形成をより総合的に調査することが可能になった。

### 4. 研究成果

#### (1) 衝突末期段階の銀河に形成された分子ガス円盤の広がりとその質量

広がった天体の検出に優れたACAを使用して、14の銀河に分布する低温・低密度分子ガスを再観測した。最新の解析技術を用いて、ACAと12mアレイで取得した電波観測データを足し合わせて電波画像を作成した。これにより、細かい構造の情報を失うことなく、広がった分子ガスも検出することができる。その結果、10の銀河で分子ガス円盤の存在が確認され、以前の調査結果よりも広範囲に分子ガスが分布してい

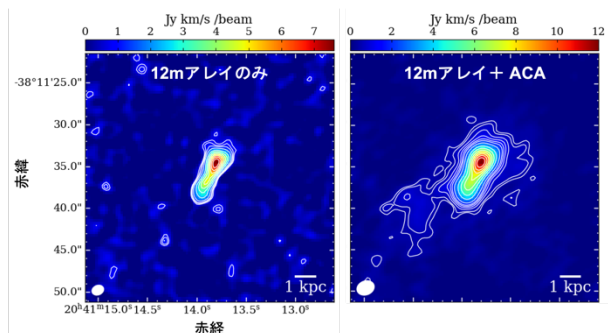


図 1: アルマ望遠鏡のACAで新規取得したデータを足し合わせる前（左図）と後（右図）の衝突末期段階の銀河「AM 2038-382」の電波画像。データを足し合わせた後は広がった構造を検出できている。

ることがわかった(図1)。また、検出された分子ガスの質量を比較したところ、平均して1.3倍増加した。銀河中心付近ではガスの検出量は同等であったが、中心から離れるにつれて検出量の差が大きくなる傾向があった。本研究の観測・解析により、衝突末期段階の銀河に分布する分子ガスの広がりとその質量を適切に測定できた。

## (2) 安定した分子ガス円盤

(1)で作成した電波画像を使用して、低温・低密度分子ガスの分布を三次元(および、二次元)モデルフィティングし、ガス円盤の性質を調査した。一般的に、銀河衝突・合体によって重力ポテンシャルが著しく乱れるため、ガス円盤は不安定な状態になると数値シミュレーションでは予想されている。その場合、ガスの速度分散( $\sigma$ )が増加し、速度分散に対する回転速度( $V_{rot}$ )の比( $V_{rot}/\sigma$ )が小さくなる。しかし、本研究のサンプルの中には、この比が1より十分に大きい値を示す天体が見つかった(図2)。このような大きな値は、安定した分子ガス円盤をもつ円盤銀河などで測定されており、これまでの描像と異なる結果が得られた。

## (3) 異なる衝突段階の間で優位な差がみられない高密度ガスの存在比

新しい星の材料となる高密度ガスのデータを併用して、衝突末期段階の銀河におけるガスの性質と星の形成活動との関係を調査した。数値シミュレーションから、銀河衝突が進むにつれて、直ちに星を形成しないガスも含まれる低温・低密度分子ガスが圧縮され、星の材料となる高密度ガスの存在比が増加すると予想されている。そこで、本研究のサンプル、および、衝突初期段階、後期段階にある銀河サンプルにおける高密度ガスの存在比を求めた。その結果、異なるサンプル間で有意な差はみられず、衝突末期段階の銀河で高密度ガスの存在比が増加していることを示す結果は得られなかった(図3(左図))。

## (4) 高い星形成効率

(3)に続き、ある一定の量のガスからどれくらいの星が形成されているか(星形成効率)を示す指標を求めた。その結果、衝突末期段階の銀河では、衝突初期段階の銀河に比べて2-3倍効率良く、衝突後期段階の銀河とは同程度の効率で星を形成していることがわかった(図3(右図))。これより、衝突段階が進むにつれて、星の形成効率が高まること可能性が示唆され、その影響は、合体後の銀河でも継続して見られた。

## (5) 活発な星形成が誘発されるメカニズム

本研究のサンプル(衝突末期段階の銀河)と、それらと同程度に活発に星を形成しているが衝突していない星形成銀河に付随するガスの性質を比較した。平均的に、本研究のサンプルでは、星の材料となる高密度ガスの存在比は高くないが、星形成効率が高い傾向が見られた。一方、衝突を起していない星形成銀河では、星形成効率は高くないが、高密度ガスの存在比が高いことを示す結果が得られた。これより、銀河同士の衝突や合体が星の形成メカニズムを変化させる可能性が示唆された。

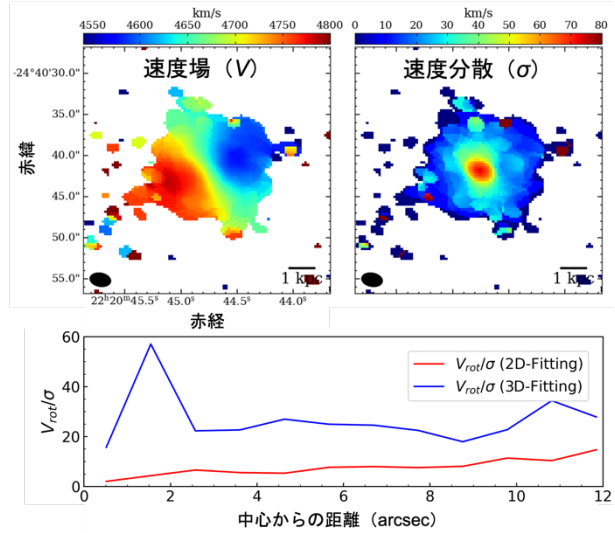


図2: 衝突末期段階の銀河「NGC 7252」に分布する一酸化炭素分子ガスの運動を表す速度場(左図)および速度分散(右図)。中心からある一定距離におけるガスの速度分散に対する回転速度の比(下図)。

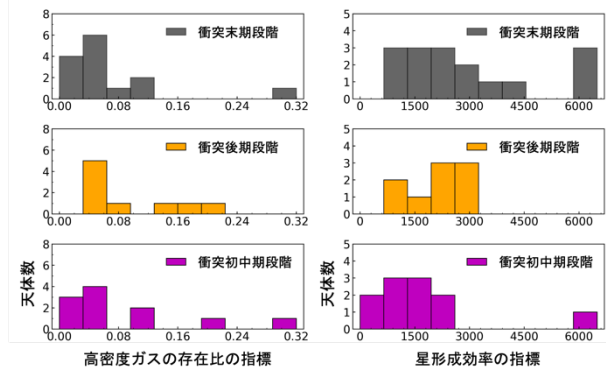


図3: 異なる衝突段階の銀河サンプルにおける高密度ガスの存在比、および、星形成効率の指標の比較。

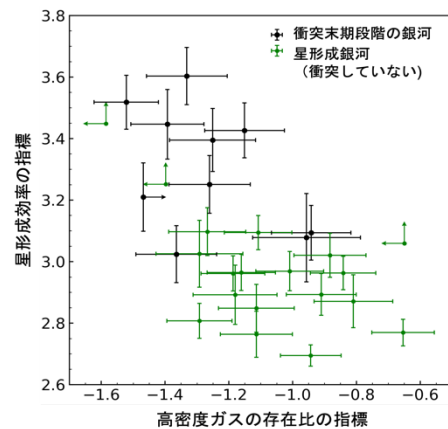


図4: 「衝突末期段階の銀河」と「衝突していない星形成銀河」における高密度ガスの存在比と星形成効率の比較。衝突末期段階の銀河では、高密度ガスの存在比が高くないが、星形成効率が高い傾向がある。

さらに空間分解した高密度ガスの分布や星形成活動との関係を調査するために、アルマ望遠鏡に高解像度、かつ、高感度のシアン化水素分子の追観測を提案したが、採択には至らなかった。内容を見直し、再度観測提案を行いたいと考えている。これまでの解析から得られた結果を論文にまとめて発表した(Ueda et al. 2021)。

<引用文献>

Ueda, J., Iono, D., Yun, M. S., et al. (2021) “Cold Molecular Gas in Merger Remnants. II. The Properties of Dense Molecular Gas,” *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 257, pp. 57-76, doi:10.3847/1538-4365/ac257a

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Junko Ueda, Daisuke Iono, Min S. Yun, Tomonari Michiyama, Yoshimasa Watanabe, Ronald L. Snell, Daniel Rosa-Gonzalez, Toshiki Saito, Olga Vega, Takuji Yamashita	4. 巻 257
2. 論文標題 Cold Molecular Gas in Merger Remnants. II. The Properties of Dense Molecular Gas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 57～57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4365/ac257a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 植田 準子
2. 発表標題 The enhancement of dense gas star formation efficiency in merger remnants
3. 学会等名 日本天文学会 2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junko Ueda
2. 発表標題 Recovering extended structures in merger remnants
3. 学会等名 日本天文学会 2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 植田 準子
2. 発表標題 輝線観測から探る衝突銀河におけるガスの性質の変化
3. 学会等名 様々なスケールの衝突流による誘発的星形成-大質量星から超大質量星団まで-（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of Massachusetts			
メキシコ	Instituto Nacional de Astrofisica			