

相互作用銀河の電波観測から探る 銀河衝突がもたらす分子ガスの性質変化

金子 紘 之

〈新潟大学創生学部 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地〉

e-mail: kaneko.hiroyuki.astro@gmail.com



銀河の「進化」はさまざまな要因によって引き起こされるが、その重要なトリガーの一つが銀河間の近接重力相互作用である。こうした相互作用を受ける天体は「相互作用銀河」と呼ばれ、銀河同士の衝突が進むにつれて、元の形状や運動が変化するだけでなく、星形成活動が活発化することが広く知られている。この活発な星形成活動の要因として、衝突によって星間ガスが銀河中心へと運ばれ、ガス密度が高まることで恒星が効率よく形成されるというシナリオが一般的に受け入れられている。しかし、銀河中心だけでなく、それ以外の領域でも活発な星形成が観測されることから、このシナリオだけでは銀河間重力相互作用による星形成の活発化を十分に説明できない。本稿では、銀河衝突の初期段階における分子ガス（恒星の原料）の振る舞いとそれが星形成活動に与える影響に着目し、野辺山 45 m 電波望遠鏡やアルマ望遠鏡を用いた詳細な観測研究について、最新の成果を交えて紹介する。

1. 宇宙の進化と相互作用銀河

宇宙はどのように誕生し、どのように変化してきたのか。この問いは、人類が何者であるか、という問いとともに最も根源的な疑問の一つである。天文学ではこれを「進化」という文脈でとらえ、答えを出そうとしてきた。天文学における「進化」という言葉は、生物学のように「世代交代を繰り返し性質が変化する現象」という意味ではなく、「時間を経て性質が変化する」という意味で使われている。宇宙の進化を考えるには、その構成要素を考えることが重要である。現代天文学では、宇宙は階層構造をなしており銀河はその主要構成天体であると考えられている。そのため、銀河がどのような進化をするか、ということを探ると、宇宙が今までどのような進化を経験し、今後どのような進化をしていくのか、と

いう冒頭に挙げた謎に迫ることができる。

銀河の進化、といった場合、力学進化と化学進化の2つの意味でとらえることができる。銀河は渦巻銀河、棒渦巻銀河、楕円銀河など、様々な形状を持っており、それらは定常状態にない。力学進化はそうした銀河全体の運動や形が変化することを指す。一方、銀河は大きく分けて恒星、星間物質（ガスや塵）、ダークマターなどから構成されている。化学進化はそれら構成要素の割合の変化や、構成元素そのものが変化（原子、分子やプラズマなどの存在形態を含む）することが相当する。

いずれの意味でも、銀河は単体でも進化するが、他の銀河と影響を及ぼしあう場合はより劇的な進化を遂げることもある。銀河自体は数百 km s^{-1} の高速度で宇宙空間を飛び回っており、ときおり近くにある別の銀河と近づきあい、時には衝突や合

体を起こすこともある．ある程度まで接近すると，互いの重力が強く作用し始めるため，そのような銀河は「相互作用銀河」と呼ばれている．相互作用銀河では，その強い重力によって形や運動が大きく歪み力学進化が進むが，そのほかにも孤立した銀河にはない重要な特徴がある．星形成活動の活発化である^{*1}．衝突が進んだ相互作用銀河では，孤立銀河と比べて恒星がより多く作られる傾向にあることがわかっている．定量的には1年あたりに作られる恒星の質量（星形成率）で評価する．例えば，我々の住む天の川銀河では星形成率は太陽数個分（ $\sim$ 数 $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ）である．それに対し，相互作用銀河では $10\text{--}1000 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ という凄まじい勢いで恒星が作られている場合もある．

では，どうして衝突が進んだ相互作用銀河では激しい星形成活動が起こるのだろうか．恒星は星間物質のうち，低温の分子ガスの塊である分子雲（大きさ $\sim 1 \text{ pc}$ ）の高密度な領域から形成されと考えられている．そして分子雲を内包する巨大分子雲（大きさ $< 100 \text{ pc}$ ）の性質やその内部で起こる星形成は，銀河内の場所や構造（渦状腕や腕間，棒状構造など）によって影響を受けることがわかってきている．ということは，銀河相互作用によって巨大分子雲の何らかの性質に変化が生じたことが原因になったのでは，と推測できる．そのような考えから，星形成と星間ガスを考慮した様々な数値シミュレーションが行われてきた．主流のシナリオは「銀河の中心へとガスが運ばれ，狭い領域に集まりガスの密度が上がったことで効率的に恒星が誕生する」というものである [1]．ところが，確かに銀河の中心で星形成がみられる銀河もあるものの，銀河の中心ではないところでも活発に星形成活動をしている銀河も数多くある（相互作用銀河の代表格ともいえる触覚銀河でさえ！）．この現象を説明しようとする試

みもあり，近年では「衝突時に銀河内の速度場が大きく乱されることで，星形成に直結する高密度の巨大分子雲の割合が高くなるためである」というシナリオも提唱されている．筆者の研究テーマは，この銀河中心ではないところで起こる星形成の原因を分子ガスの観測によって解明することにある．なお，星形成率の側面からこの問題に取り組んだ研究は，道山知成氏の天文月報記事 [2] を参照されたい．

2. NGC4567/4568 と分子ガスフィラメントの発見

本稿の主役は別名ちょうちょ銀河とも呼ばれる，NGC 4567/4568 という二つの銀河からなる相互作用銀河である（図1）．形もあまり変化しておらず，銀河全体では星形成活動も孤立銀河とほとんど差がないことがわかっていて，相互作用銀河としては地味とも言える．しかし，この地味

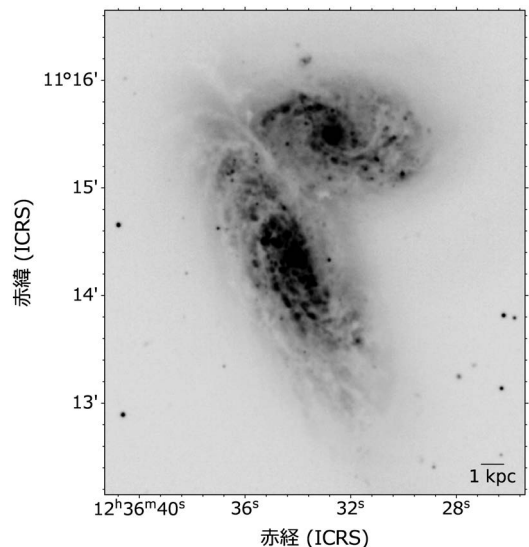


図1 NGC 4567/4568 のSDSS rバンドイメージ．衝突する前からあった古い星を見ている．左下がNGC 4568, 右上がNGC 4567．

^{*1} このほかに銀河中心超巨大ブラックホールの合体や活動銀河中心核の活動性にも大きな影響を及ぼすことが知られているが，本稿とは関連が薄いためここでは深く扱わない．

さが本研究にとって鍵である。というのも、衝突が進み星形成活動が活発になってしまうと、作られた恒星からのフィードバックが巨大分子雲の性質に影響を与えてしまう可能性があるためである。もし衝突が進んだ相互作用銀河の巨大分子雲に性質変化が見つかったとしても、銀河相互作用が直接もたらした変化かどうかわからなくなってしまうのだ。言わば活発な星形成活動の「原因」と「結果」が混ざってしまうので、そのような相互作用銀河は「原因を探る」という目的には望ましくないのである^{*2}。また、一般に相互作用銀河は衝突を繰り返しながら数億年程度のタイムスケールで徐々に1つになる一方、観測ではスナップショットしか撮ることができないため何回目の衝突かわかりづらい。しかし、この銀河ペアは形が大きく変わっていないのでおそらく1回目の衝突と考えられ、その点においても銀河相互作用が巨大分子雲に与える影響を調べるのに好都合である。

筆者らは、こうしたNGC 4567/4568の特徴に着目して、分子ガスのトレーサーである一酸化炭素分子からの放射であるCO ($J=1-0$) 輝線の撮像観測を進めてきた。まず、野辺山45 m電波望遠鏡で1.5 kpcスケールでの分子ガスの分布を調べ、どちらの銀河も分子ガスが銀河中心に集中していないこと、銀河の円盤部分が接触している領域（以降、オーバーラップ領域と呼ぶ）にやや分子ガスが偏って分布していることを発見した[3]。そして、同じようなガス量を持つ領域と比べて、星間ガス（原子ガスと分子ガスの和）に対する分子ガスの割合が高いこと、それが銀河の衝突による圧縮によって、効率的に原子ガスから分子ガスへ変換が起こったためであることを示した[4]。また、星形成のトレーサーであるH α 線や赤外線画像を調べると、銀河円盤同士が重なっているオーバーラップ領域付近にいくつか大きな

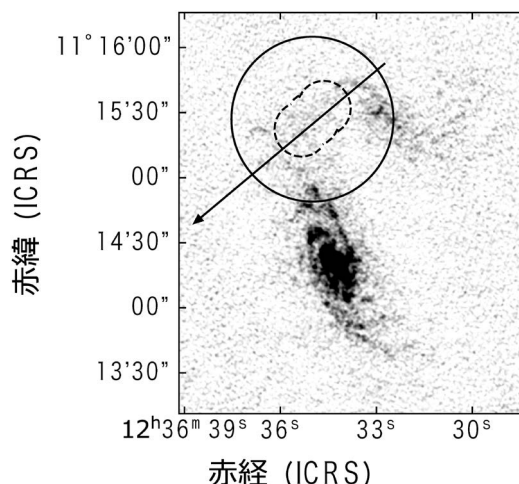


図2 これまでの筆者らのアルマ望遠鏡による観測[5]から得られたNGC 4567/4568全体でのCO ($J=1-0$) 輝線の分布。やや拡大されているがほぼ図1と同じ範囲を示している。本研究で新たに高分解能でCO ($J=1-0$) を観測した領域を円で、CO ($J=3-2$) を観測した領域を破線で示した。本稿では破線の内側をオーバーラップ領域として定義する。矢印は図3で示す位置速度図の作成に用いた範囲。

星形成領域が存在していることもわかった。こうした事実を踏まえると、オーバーラップ領域では、活発な星形成活動が起きかけているのかもしれない。

そこでより高分解能で分子ガスの性質を調べるために、アルマ望遠鏡を使って150 pcスケール（つまり野辺山45 m電波望遠鏡の10倍の視力）でより細かくNGC 4567/4568のCO ($J=1-0$) 輝線を観測した。CO ($J=1-0$) 輝線の2次元分布からはさほど分子ガスは大きな影響を受けていないように見える（図2）。さて、輝線観測では天体の視線方向のガスの運動を知ることができるという特徴がある。そのため、今度はデータの見方を変え、オーバーラップ領域周辺での分子ガスの視線方向の運動を調べるために位置速度図を描いて

^{*2} もちろん、銀河相互作用が銀河の進化にどう影響するか、という視点で見れば、星形成活動が活発になった後の銀河を調べることも重要である。

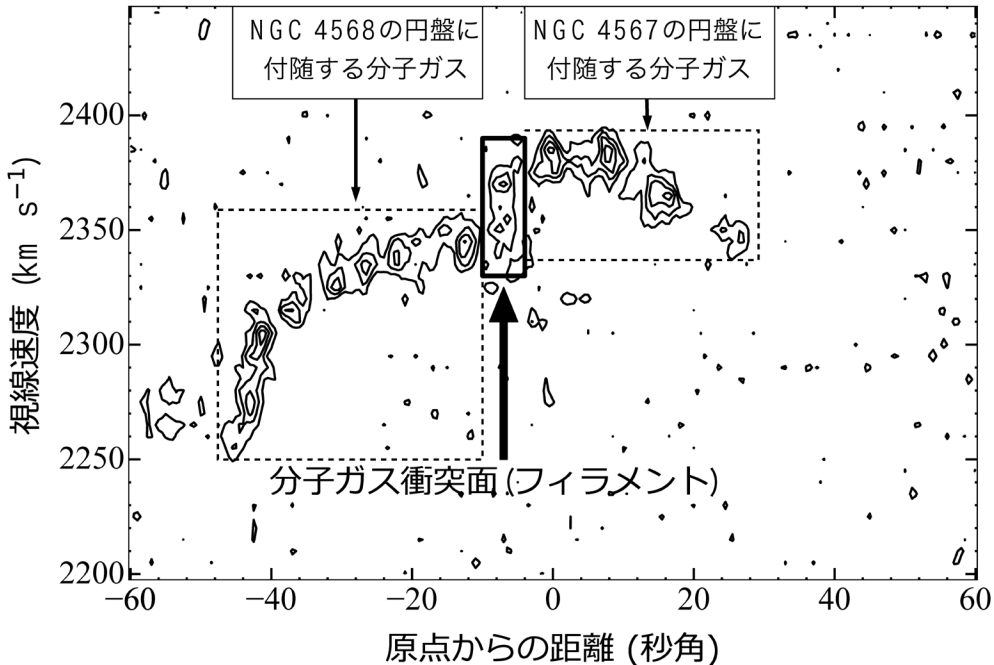


図3 オーバーラップ領域の位置速度図. 図2の矢印に沿って、横軸に原点からの距離、縦軸に視線方向の速度として図示したもの. 2つの銀河円盤に付随する分子ガスがぶつかっていないと、縦方向にそれぞれの分子ガス成分はつながらないはずだが、滑らかにつながっているのがわかる.

みた. すると、2つの銀河の円盤は 100 km s^{-1} 弱の速度差を持っていた. しかし、よく見ていくと2つの銀河が接触している $1800 \text{ pc} \times 350 \text{ pc}$ の(銀河のスケールで見ると)狭い領域では、銀河円盤をつなぐように視線方向に分子ガスが分布していたのである(図3). これは、2つの銀河の円盤に付随する分子ガスが、その場所で衝突していることを示している. 銀河衝突で分子ガスも衝突することは予想こそされていたが、このように観測的に明確な分子ガスの衝突面が発見されたのは初めてのことである. この構造(以後、細長い構造を持つためフィラメントと呼ぶ)は、数値シミュレーションによれば衝突時に生じた衝撃波で比較的低密度のガスが圧縮されて形成される[6]. その後、圧縮されたために高密度になった分子ガスフィラメントはすぐに千切れて、複数の巨大分子雲となり、それらが星形成へと至って、超星団を形作っていく[7, 8]. NGC 4567/4568の

巨大分子雲を同定してみたところ、フィラメントの中にも複数の巨大分子雲が存在していて、それらは重力的に束縛されていた[5]. 重力的に束縛されている分子雲は、その後自己重力で潰れて恒星を作るとされるので、まさにシミュレーションの予測通りに見える. とすれば、後はフィラメント内部が高密度なのかどうか如果能れば、この仮説を検証できるはずである.

3. フィラメントに高密度分子ガスを探して

筆者らはオーバーラップ領域に観測領域を絞って、アルマ望遠鏡のバンド3とバンド7受信機で観測を行うことを提案し、幸いなことに採択された. バンド3では主に $\text{CO} (J=1-0)$ 輝線を前回の2倍空間分解能が高い 78 pc スケールで観測するもので、このスケールになると大きめの巨大分子雲であれば直接空間分解して性質を調べるこ

ができる。バンド7の周波数帯には高密度分子ガストレーサーとして知られるHCN ($J=4-3$), HCO^+ ($J=4-3$), CS ($J=7-6$) 輝線があり、同時に衝撃波トレーサーのSiOなども観測できる。バンド7の観測では、空間分解能は150 pcで据え置きになる代わりに、包括的にフィラメントの形成メカニズムや物理的・化学的性質を調べられる。周波数帯により視野が異なり、バンド7の方が狭いため、本研究ではバンド7の視野をオーバーラップ領域と見なすことにする(図2参照)。

アルマ望遠鏡では観測提案が採択されてもすぐに観測されるわけではない。実は、採択が決まったタイミングで、NGC 4567/4568は、別のチームによって提案されていたHCN ($J=1-0$), HCO^+ ($J=1-0$) 輝線の観測が行われていた。アルマ望遠鏡ではデータ占有期間があるため、他の研究者によるデータはすぐには見ることはできない。しかし、筆者らの観測データが届くまでにそのチームの占有期間が切れたことに気づいたため、まずはそちらを眺めてみることにした。これらの輝線も高密度分子のガストレーサーであるため、どのような分布になっているか興味深し、もし十分な信号対雑音比で検出できていればいずれ届く筆者らのデータと組み合わせることで、より精密に分子ガスの密度を調べることができるからだ。ところが、である。なんとHCN ($J=1-0$), HCO^+ ($J=1-0$) 輝線いずれも全く検出されなかったのである。これは筆者らの観測でも同様の結果になることを示唆するもので、かなり不安に駆られた。それから間もなくして、筆者らの観測データも届き、解析を進めるもやはり高密度分子ガストレーサーも衝撃波トレーサーも未検出という結果であった。元々、この観測は普通の銀河の円盤部での典型的な輝線強度を仮定して提案していたため、仮に高密度な分子ガスが少なかっ

たとしても全く検出できないということは想定していなかった。こうして今後データをどう扱うべきか悩みながらも本プロジェクトは一時的に塩漬けされることになった。

4. 一酸化炭素ガス再び

その後、筑波大学の大学院生だった錫田翔哉氏から、このデータを元に研究をしたいという提案を受けたことをきっかけにこの研究は再稼働した。バンド7の周波数帯には一酸化炭素分子の高励起準位からの遷移であるCO ($J=3-2$) 輝線が含まれていた。CO ($J=3-2$) 輝線はCO ($J=1-0$) 輝線と比べると、やや密度が高い環境をトレースする。一方、 HCO^+ やHCN輝線に比べると星形成に直接関連するほど高密度でなくても励起されること、密度以外にも温度が高くなると励起されることなど、やや扱いが難しい性質を持つ。しかしこの輝線はやや弱いながらも検出できており、CO ($J=1-0$) 輝線との比を取ることで、温度と密度のどちらに起因するかまではわからないものの、周囲とは異なる物理状態にある巨大分子雲の有無などを調べることはできる。そこで、これら2本のCO輝線から分子ガスの性質を詳しく調べていくことで方針が固まった。

図4 (a) は本研究によって得られたCO ($J=1-0$) 輝線の分布である。図2からは直接確認できなかったフィラメント構造がはっきりと見えている他、空間分解能が上がったことで、オーバーラップ領域には、渦状腕に沿っていないややコンパクトな巨大分子雲がいくつも存在していることもわかる。視野内にある巨大分子雲を同定してみたところ、この新たなデータではオーバーラップ領域(CO ($J=3-2$) 輝線の観測視野内)に44個、フィラメントに8個^{*3}、そして円盤部(オーバーラップ領域以外にある分子雲)に62個あり、こ

^{*3} 図4 (a) ではもっと多くあるように見えるが、速度構造まで考慮するとそのうちのいくつかはフィラメントに属していない。

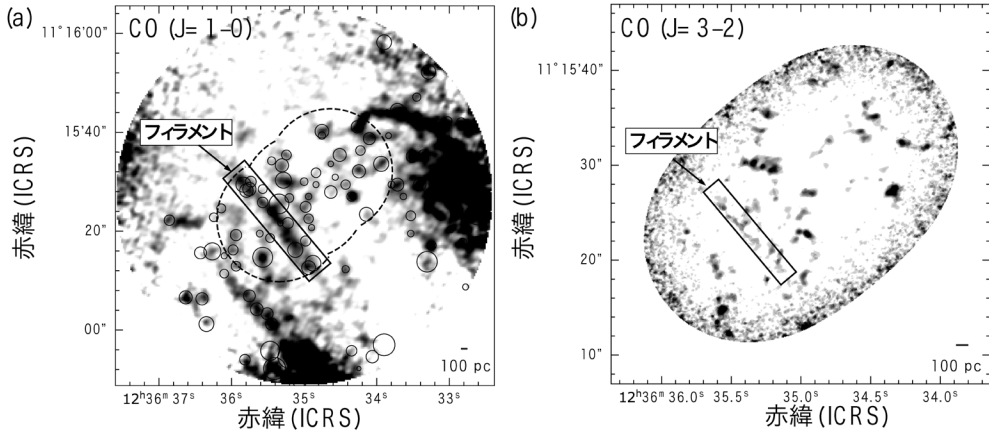


図4 (a) 今回のアルマ望遠鏡による新たな観測 [9] で得られた CO ($J=1-0$) 輝線の分布. 図2ではよくわからなかったフィラメントが明瞭に見える. 円は同定した巨大分子雲で, 大きさは半径に対応している. 破線で囲われた領域は CO ($J=3-2$) 分子輝線の観測範囲である. (b) CO ($J=3-2$) 輝線の分布. こちらでもフィラメントが見て取れる.

これらの領域間にある巨大分子雲が持つ性質の比較をするには十分な数があることがわかった. これらの巨大分子雲の物理的性質を比べてみると, 半径には領域間で差はないが (平均 40 pc), 速度分散はフィラメントの巨大分子雲のみ有意に大きく, 質量はオーバーラップ領域がやや小さい, というように領域間での差がみられた. このような違いは, 銀河相互作用によってもたらされたと考えられる. 次いで CO ($J=3-2$) 輝線も見よう. 図4 (b) に示した CO ($J=3-2$) 輝線の分布でもフィラメントの存在がわかる. オーバーラップ領域にも CO ($J=1-0$) 輝線で見られるコンパクトな構造がところどころにあるが, 必ずしも CO ($J=1-0$) 輝線が強く検出された場所で CO ($J=3-2$) 輝線も検出される, というわけではないようである.

これらを踏まえて, 同定した巨大分子雲ごとに CO ($J=3-2$)/CO ($J=1-0$) 比 (以下, R_{31}) を導出した. 得られた R_{31} の平均値は 0.05 ± 0.04 , 最大値が 0.17 ± 0.04 であった. 例えば, 爆発的星形成を起こしている相互作用銀河 VV 114 では $0.2-0.8$ [10] であるし, 普通の渦巻銀河である M 33 でさえ平均値が 0.26 [11] であるので, 観測された

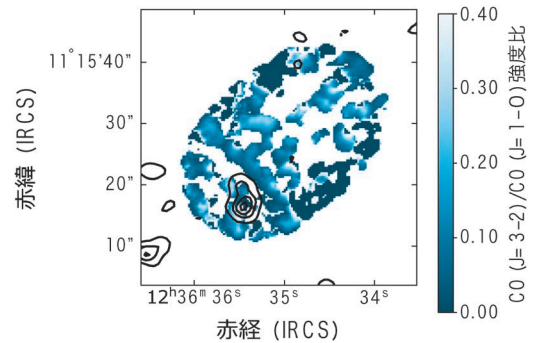


図5 CO ($J=3-2$)/CO ($J=1-0$) 輝線強度比の分布図. 星形成のトレーサーである H α 線を等強度線として重ねた. フィラメントを含むオーバーラップ領域全域で強度比が小さいのがわかる.

R_{31} は巨大分子雲としては極めて低い. この結果は, NGC 4567/4568 のオーバーラップ領域の巨大分子雲の温度も密度も低い可能性を示唆していて, HCN や HCO⁺ といった高密度分子ガストレーサーが検出されていない観測事実とも合致している. そして, 観測提案時に予想していた分子ガスの圧縮現象は, 少なくともこの衝突段階では起きていないことも示唆される.

最後に, R_{31} の分布の上に星形成トレーサーの H α 線を等強度線として重ねたものを図5に示す.

この図では巨大分子雲に付随していない分子ガスの寄与も含むため、巨大分子雲での R_{31} と同じではないことには注意されたい。とはいえ、フィラメントも含め、オーバーラップ領域内の R_{31} はほとんど0.2よりも低い。一方で、 $H\alpha$ 線がみられる場所の多くは局所的に R_{31} が0.4より高くなっている。このことから、 R_{31} が高く $H\alpha$ 線は観測されていない場所では、今後星形成活動が生じるのかもしれない。

5. まとめと今後

フィラメントを構成する巨大分子雲は、他の領域の巨大分子雲と比べて速度分散が大きく銀河相互作用によって影響を及ぼされていることがわかった。しかし、予想されていたオーバーラップ領域における分子ガスの圧縮現象を示す高密度ガスやその兆候は見られなかった。それは、銀河相互作用が分子ガスに働く物理が想定より複雑であるか、あるいは数値シミュレーションの予測よりも分子ガスの圧縮現象はゆっくり進むということと解釈できる。地味な相互作用銀河から得られた地味な結果ではあるが、銀河衝突現象の奥深さが垣間見える研究成果と言えよう。

また、この結果だけからはフィラメントの形成メカニズム自体には結論が出せていない。理論シミュレーションが予測するように、低密度な原子ガスが圧縮されて分子ガスとなり、その結果としてフィラメントが形成されるのであれば、原子ガスと分子ガスの比がフィラメント周辺で大きく変化することが期待される。これまでの水素原子ガスの観測からは、分子ガスの増加傾向はみられたものの、空間分解能が低く巨大分子雲を分解することができていないため、フィラメント形成メカニズム解明の決定打にはなっていない。高い空間分解能での水素原子ガス観測は、フィラメント形

成の物理プロセス解明において本質的である。筆者らはこの方向性に基づいて、新たに高空間分解能水素原子ガスデータを取得し解析しているところである。本研究で得た分子ガスデータと組み合わせ、理論シミュレーションとの比較を通じ、相互作用銀河、そして星間ガスの基礎物理プロセスの理解につなげていきたい。

そして、フィラメントが銀河衝突において一般的に生じるものなのか、衝突が進行することで今回では見られなかった分子ガスの高密度化が起こるのか、という大きな問いも残されている。これらの課題の解決には、多数の相互作用銀河の分子ガス分布を取得することが不可欠である。その試みとして、筆者らは活発な星形成活動が起きているかどうかには捉われない、無バイアスな相互作用銀河の分子ガス撮像観測を進めている。その結果についても、近いうちにまとめて発表したいと考えており、ご期待いただければ幸いである。

謝 辞

本稿で紹介した一連の研究成果は、筆者らの投稿論文及び鵜田翔哉氏の修士論文に基づいています。久野成夫氏、斎藤貴之氏をはじめとした共同研究者の方々に感謝いたします。最後に、本稿執筆の機会を与えていただきました天文月報編集委員の小山翔子氏に篤く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Barnes, J. E., & Hernquist, L., 1996, ApJ, 471, 115
- [2] 道山知成, 2022, 天文月報, 115, 6
- [3] Kaneko, H., et al., 2013, PASJ, 65, 20
- [4] Kaneko, H., et al., 2017, PASJ, 69, 66
- [5] Kaneko, H., et al., 2018, ApJ, 860, L14
- [6] Saitoh, T. R., et al., 2009, PASJ, 61, 481
- [7] Saitoh, T. R., et al., 2010, ASPC, 423, 185
- [8] Teyssier, R., et al., 2010, ApJ, 720, L149
- [9] Kaneko, H., et al., 2023, PASJ, 75, 646
- [10] Saito, T., et al., 2015, ApJ, 803, 60
- [11] Onodera, S., et al., 2012, PASJ, 64, 133

Galactic Waltz: Unveiling Changes in Molecular Gas Properties in Interacting Galaxies through Radio Observations

Hiroyuki KANEKO

*Niigata University, College of Creative Studies,
8050 Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata 950-
2181, Japan*

Abstract: Galaxy-galaxy interactions contribute to the evolution of galaxies not only by altering their morphology and kinematics, but also by driving star formation activity. One widely accepted explanation for this increased star formation is that collisions drive interstellar gas toward the galactic center, increasing gas density and resulting in efficient star formation. However, active star formation is also frequently observed the off-center region, suggesting that this scenario alone cannot fully account for the star formation enhancement caused by gravitational interactions between galaxies. To overcome this problem, I have focused on how molecular gas, the raw material for star formation, behaves in the early stages of interacting galaxies and how it influences star formation activity. Using observations from the Nobeyama 45-m Radio Telescope and the ALMA telescope, I present detailed investigations along with the latest findings.