

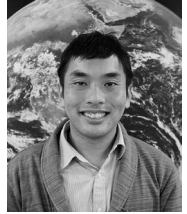
銀河衝突とスターバースト

道 山 知 成

〈大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉

〈国立天文台アルマプロジェクト 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: t.michiyama.astr@gmail.com



銀河は衝突を繰り返しながら進化する。銀河衝突は、銀河の形態を変化させるだけではなく、銀河の活動性にも影響を与えられている。特に、銀河衝突による「スターバースト」の誘発が理論と観測面から示唆されており、銀河衝突は銀河進化を理解する上で重要な現象であると考えられている。本稿では、VLTやALMAを用いた衝突銀河NGC 3256の最新の観測的研究を通して、銀河衝突によって誘発される銀河全体の円盤領域におけるスターバースト現象について論ずる。

1. スターバースト／銀河衝突

我々の住む天の川銀河では、1年間に数個程度の割合で星が新たに生まれている。単位時間あたりに新たに生まれる星の量を「星形成率」と呼び、太陽質量／年^{*1}の単位で評価される。星形成率は銀河によって様々である。星形成率が10-1000太陽質量／年という大きな値をもつ銀河もあり、「スターバースト銀河」と呼ばれている。

星形成率を測定する最も単純な方法は、生まれたての星からの紫外線放射強度を測ることである。その紫外線によって電離された周囲のガスから放射される水素輝線（H α やH β 再結合線、可視光輝線、図1）等の強度から推定することも可能である。一方で、紫外線や可視光輝線を用いた方法では、星間塵によって強く吸収されるため、星間塵を多く含む銀河の星形成率推定は困難である。このような場合でも、紫外線を吸収して暖まった星間塵が赤外線領域で熱再放射する性質を

利用して、赤外線強度をもとに星形成率を推定することが可能である^{*2}。スターバースト銀河の観測においては、特に赤外線が重要である。なぜなら、大規模な星形成の過程で大量の星間塵が形成されるため、紫外線や可視光輝線の観測からスターバースト銀河を観測することが難しいためである。そのため、スターバースト銀河は超／高光度赤外線銀河（U/LIRGs^{*3}）と呼ばれる種族に分類されることが多い[1]。

スターバーストと銀河衝突は密接に関連していると考えられている。最も単純で主要な観測的証拠は、近傍宇宙に存在するU/LIRGsのほとんどで、銀河衝突の証拠が確認されていることである。最近の研究でも、銀河衝突がスターバーストの引き金となり、星形成率が3-4倍高くなるという見解は概ね一致している。しかし、その詳細なメカニズムの解明には至っていない。例えば、衝突を起こしている銀河内部の「どの領域で」スターバーストが誘発されるのかは、論争が続いてい

^{*1} 太陽質量: およそ 1.99×10^{30} kg

^{*2} 天文学辞典から引用 (<https://astro-dic.jp/star-formation-rate/>)

^{*3} Ultra/luminous infrared galaxies

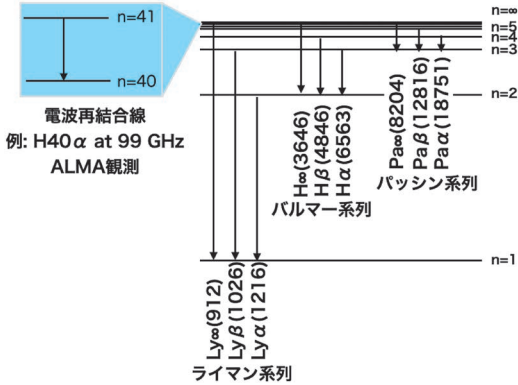


図1 水素原子のエネルギー準位と再結合線。括弧内の数字はそれぞれの遷移に対するスペクトル線の波長（単位はÅ）。例えば、n=2の準位に遷移するバルマー系列（H α やH β 等）は主として可視光領域で放射される。一方で、nが大きいと準位間のエネルギー差が小さく、電波帯で放射される。

る。従来の主流な考え方は、中心核領域（<1 kpc^{*4}）でのスターバーストである。衝突の影響で角運動量を失ったガスが中心核に落ち込むことで圧縮され、星が誕生するというシナリオである（説1）。一方で、銀河衝突のスターバーストは中心領域のみに限らないというシナリオも近年提唱されるようになった。最新のモデルでは、衝突合体プロセスに付随する星間物質の乱流を精密に調査している。合体の際に速度場が急激に変化することで、星形成を引き起こす高密度ガスの割合が孤立銀河よりも著しく高くなる。これは、ガス流入による中心核でのスターバーストとは無関係に、銀河全体でスターバーストを誘発していると解釈できる（説2）。図2に簡易的な模式図を示した。これらのメカニズムに関する詳細は、参考文献 [2] に記述されている。

これらの論争に決着をつけるためには、衝突銀河を観測し、中心核領域と銀河の外側に広がる円盤領域で星形成率を実際に計測する必要がある。本稿では、近傍衝突銀河NGC 3256における事例

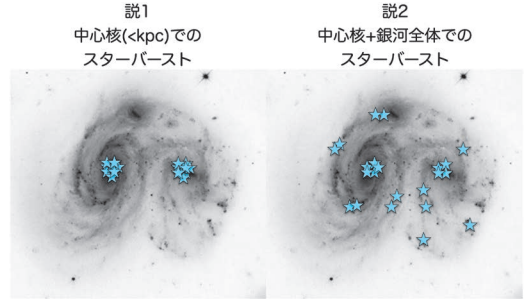


図2 本研究課題の模式図。銀河衝突によって誘発されるスターバーストに関して、説1と説2を観測的に検証する。

研究 ([3]) をもとに、銀河衝突によって誘発されるスターバーストの解明に向けたこれまでの研究成果と今後の課題を解説する。

2. 衝突銀河NGC 3256

では実際に衝突銀河の星形成率を計算してみよう。ここでは、衝突銀河NGC 3256の事例研究を紹介する。まずはハッブル宇宙望遠鏡で得られた画像（図3左）を確認し、銀河の全体像を把握する。NGC 3256では合体途中の二つの中心核が南北に確認できる（図3の丸印）。ひとつは、北側のface-on銀河の中心核であり、もうひとつは南側の星間塵に覆い隠されているedge-on銀河の中心核である。赤外線光度を用いた方法では、銀河全体での星形成率は約50太陽質量/年と推定される。NGC 3256についての詳細の情報は、参考文献 [4, 5] に記述されている。

2.1 VLT観測

星形成領域の空間分布を調べるためによく使われる方法は、可視光の面分光装置を用いた水素再結合線（H α やH β ）の観測である。例えば、ヨーロッパ南天天文台がチリに建設した4基の有効口径8.1 mの光学赤外線望遠（Very Large Telescope: VLT）に搭載されている、超広視野面分光装置（MUSE）が世界最高性能の観測装置であ

*4 1 pc=2.0626 × 10⁵ au=3.09 × 10¹³ km=3.26光年

衝突銀河NGC3256の観測結果

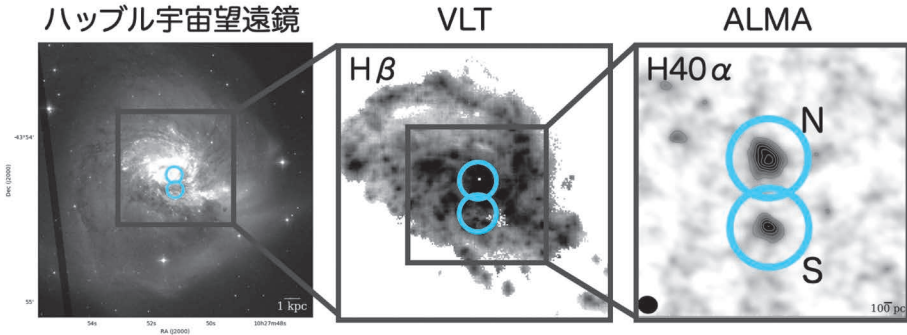


図3 NGC 3256の観測結果. (左) ハッブル宇宙望遠鏡の光学写真. (中央) VLTを用いて撮影された、 $H\beta$ 輝線の分布図. 北側の中心が最も明るく観測されている (色が濃いところが明るい). 一方で南側の中心核付近にはピーク構造がない. (右) ALMAを用いて観測された、電波再結合線 $H40\alpha$ の輝線強度図. 北側の中心核では、 $H\beta$ と同様に強い放射が確認された. 南側の中心核においても、ピーク構造が確認できた. 可視光観測では減光によって見逃してしまっているスターバースト領域である.

る. 図3中央がNGC 3256のVLT/MUSEで観測した $H\beta$ 輝線マッピングの観測結果である. 分布図から明らかなように, 南北の中心核の外側の円盤領域にも多数の星形成領域が存在することを示している. VLTの観測では, 銀河全体の星形成率は約40太陽質量/年, そのうち北側の中心核での星形成率が6.8太陽質量/年, 南側の中心核が1.7太陽質量/年と推定された. この観測から, NGC 3256では銀河全体でスターバーストが起きていることが判明し, 説2を支持する結果となった.

2.2 ALMA観測

VLTの観測では, 南側の中心核では天の川銀河程度しか星形成をしていないことが示唆されている. しかし, ハッブル宇宙望遠鏡の可視光画像が示すように, 南側の中心核は星間塵で覆われており, 可視光観測が苦手とする領域である. 南側の中心核領域における星形成率を正しく評価するためには, 減光の影響を受けない指標が必要である. 赤外線宇宙望遠鏡は, 口径が小さいため, 角度分解能の点で中心核部分のみの星形成率を見積もることは困難である. そこで私たちは, 電波帯域の水素再結合線に着目した. VLTなどの可視

光領域で観測されるのは, $n=2$ の準位に遷移するバルマー系列である (例えば, $H\alpha$ や $H\beta$). 一方で, n が数十以上の準位に遷移する場合は電波領域で放射される (図1). 電波再結合線は, 減光の影響を受けないため, 可視光観測では見落とししてしまう領域で「正しい」星形成率を見積もることができる. 一方で, 電波再結合線の最大の弱点は, 放射強度である. 例えば, 一酸化炭素分子の回転遷移 ($CO J=1\rightarrow 0/115\text{ GHz}$) と比較すると, 電波再結合線 (例: $H40\alpha/99\text{ GHz}$) の強度は, およそ0.05%程度であり, 極端に暗い.

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) を用いることで, このような暗い放射を観測することができる. ALMAを用いて得られた, NGC 3256における $H40\alpha$ 輝線の分布を図3右に示した. 我々の予想通り, 南側の中心核でもスターバーストが生じていることが判明した. $H40\alpha$ の観測から見積もられる星形成率は6.8太陽質量/年であり, 北側の中心核に匹敵する. 一方で, VLT観測では, ALMAの $H40\alpha$ 観測では感度の限界により観測できなかった外側のスターバースト領域を捉えている. つまり, VLTとALMAの得意分野を組み合わせることで初めて,

スターバーストの空間分布を定量的に評価することができたといえる。重要な点は、減光によって可視光観測で見落とされていた南側の中心核を考慮したとしても、NGC 3256では中心核で約34%、外側で66%の星形成活動が確認され、説2を支持する結果となったことである。今後は、様々な衝突銀河で同様の研究を展開することで、中心核以外の領域でのスターバーストが衝突銀河で普遍的に誘発されているのかどうかを確認する必要がある。

3. 今後の展望

3.1 2030年代の天文学への期待

VLTとALMAを使った我々の研究では、衝突銀河NGC 3256の場合は中心核以外の部分におけるスターバーストが無視できないことがわかった。一方で、図3右に示したように、ALMAを用いたとしても、電波再結合線の複雑な空間分布を調べることは困難であり、現在の観測技術の限界に達していると判断できる。本研究の目的達成には、観測装置の性能向上が必要不可欠である。特に筆者が期待しているのは、次世代の電波干渉計である。例えば、アメリカが率先して計画しているnext generation Very Large Array (ngVLA)はALMAよりも10倍以上の良い感度が達成することが期待されている。運用が開始されると電波再結合線の観測が一気に展開するだろう。ngVLAを用いると、NGC 3256において、星形成率が0.02太陽質量/年のような小さな(1-10 pc)星形成領域に付随する「塊」を観測できると予想している。これは、天の川銀河に存在する星形成領域(例えば、SgrB2)をNGC 3256のような銀河系外の衝突銀河で観測可能であることを意味している。ngVLAを用いた観測によって「衝突によって誘発された円盤領域での爆発的星形活動と、天の川銀河のような通常の星形成銀河での星形成活

動の違いが生じる物理過程は何か」という問いに挑戦することが可能である。ngVLAを用いた電波再結合線観測に関する詳細は、筆者らによるngVLA-J memo series^{*5}を参照いただきたい。

3.2 “いつ”スターバーストが生じたのか

最後に、より挑戦的な課題について述べる。ここまで、「衝突銀河の“どこで”スターバーストが生じているのか」という問いに焦点を当てて説明してきた。一方で、これまでの議論では、衝突の前からスターバーストをしていた可能性を考慮していない。銀河衝突の時間スケールは数億年であるため、私たちが生きている間にその変化を直接確認することはできない。そのため、「若い」スターバーストと「古い」星形成活動を切り分けることができる指標を見つけることが必要である。

このような、スターバーストのタイムスケールに関する調査にも、電波再結合線が重要であると考えている。電波再結合線を用いることで、星形成領域にある電離光子の数を推定することができる。一方、赤外線の光度は、星間塵によって吸収された「若い」大質量星からの紫外線の再放射と「古い」星からの放射の合算である。これら両者の比を調べることで、スターバーストのタイムスケールを調べることができると考えている。実際にこの手法を用いて簡易的にスターバーストのタイムスケールを見積もると、NGC 3256の場合はおおよそ1億年程度であり、銀河衝突が始まった時期と同じくらいであると推定できた。

さらに筆者らは、衝突銀河NGC 6052の最新観測を通して、スターバーストが誘発されてまだ時間が経っていない銀河では、炭素原子からの放射が一酸化炭素分子からの放射と比較して極端に暗くなる“[CI]-deficient”な銀河として観測される可能性があることを示した [6]。どちらのアイデアも構想段階であり、今後の詳細なモデル化が

*5 <https://ngvla.nao.ac.jp/researcher/memo/pdf/Michiyama.pdf>

必要であるが、今後の目標は銀河進化の研究において“時間軸”を追加する解析方法を開発することである。時間軸を追加することで、「現在の星形成率」だけでなく「これまでの星形成史」を紐解くことで、銀河進化において、銀河衝突がどのような役割を果たしているのかを、正しく理解することが可能である。

4. おわりに

本稿で紹介した研究は主に2020年コロナ禍で進めたものである。筆者は2019年11月から2021年2月まで、北京大学カブリ天文天体物理学研究所でフェローシップ研究員として採用されているが、そのほとんどの期間を日本の自宅で過ごした。このような特殊な環境で、筆者がどのように研究を進めてきたかを簡単に紹介したい。

2020年1月後半、武漢を訪問した友人と食事をしたことをきっかけに、隔離生活が始まった。これ以降、北京大学のオフィスには出勤していない。実は、この隔離期間は大いに研究が進んだ。研究に没頭する時間が「現実逃避」となっていたのだと思う。春節が明けた後も、大学への出勤は厳しく制限されており、強制的にリモートワーク生活が始まった。着任後間もない頃の出来事であり、生活に不安があったため、上司の許可を経て2月下旬に日本に帰国した。その後、世界規模でコロナウイルスが流行し、中国への入国が厳しく制限された。研究費が許す限り、筑波大学や東京大学宇宙線研究所でビジターとして出勤することはできたが、その後研究費が尽き、実家の大阪でポケットwifiとラップトップPCのみを用いた研究生活が始まった。

実験を必要としない研究者は、リモート勤務に切り替えることが容易である。しかし、自宅での研究は捗らなかった。与えられた業務内容は、研究して論文を書くのみである。自由な研究時間を与えられたフェローシップ研究員に採用されていたことが裏目にでた。仕事とプライベートの境目

が全くなくなる。友人の最新の論文を見つけるたびに、自分の研究者としての自信がなくなる。僕が研究者になったのは、「研究をしたかった」のではなく、「ただ仲間と研究談義がしたかった」だけではないのか、などネガティブなことばかり考えていた。オンラインミーティングでは元気な様子を振る舞うため、僕の精神的な不調に気がつく人はいない。研究時間自体は十分に取れていたため、深刻な進捗の遅れがなかったのは救いである。

このような精神的不安から脱却するための選択は、「転職」であった。大変ありがたいことに、2021年4月から大阪大学宇宙進化グループで研究員として採用していただいた。現在もリモートワークは続いている。しかし、精神的な辛さは全く違う。在宅に疲れたら、オフィスに行けば良い。自分の所属と生活拠点が一致しているだけでこれほど気が楽になるものか。コロナ前までは「ネットとパソコンさえあればどこでも研究ができる」と思っていたが、「コミュニケーション」と「研究拠点」が必要である。特にコロナ禍で居場所を失い、同様の悩みを抱える研究者は多いのではないかと。朝日新聞隔週連載「時空自在」第43回にて、村山齊先生が「人間は社会的動物だ」と記し、リモートワークによる研究者の観点での悩みを訴えていた。記事を読み、自分よりも遥かに優れた研究者の方々でも、同様の悩みを抱えているとわかり、救われた。この記事も、誰かの心の悩みに寄り添えることができたなら幸いである。

謝辞

本稿の内容は、筆者らが発表した論文及び筆者の博士論文に基づいています。大学院の指導教員であり、研究の助言をいただいた伊王野大介氏、中西康一郎氏に深く感謝いたします。また、多くの時間を割いて議論して下さった、植田準子氏をはじめとした共同研究者の方々に感謝いたしま

す。さらに、コロナ禍の中、快適な研究環境を提供していただいた、東京大学宇宙線研究所大内正己氏、大阪大学井上芳幸氏、筑波大学橋本拓也氏に大変感謝しております。最後に、本稿執筆の機会を与えてくださった天文月報編集委員の松田有一氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] Sanders, D. B., et al., 2003, AJ, 126, 1607
- [2] Bournaud, F., 2011, EAS Publications Series, 51, 107
- [3] Michiyama, T., et al., 2020a, ApJ, 895, 85
- [4] Michiyama, T., et al., 2018, ApJ, 868, 95
- [5] Sakamoto, K., et al., 2014, ApJ, 797, 90
- [6] Michiyama, T., et al., 2020b, ApJ, 897, L19

Mergers and Starburst Galaxies

Tomonari MICHİYAMA

Department of Earth and Space Science, Osaka University, 1-1 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

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

Abstract: Galaxies evolve via galaxy and galaxy merger events. Merger processes not only affect the morphology of galaxies but also affect their activities. In particular, theoretical and observational studies have suggested that starburst activities are triggered by galaxy mergers. Therefore, a merger process is an important phenomenon in understanding galaxy evolution. In this document, we investigate the starburst phenomenon in the disk region of the entire galaxy triggered by galaxy collisions through the latest VLT and ALMA observations toward the merging galaxy NGC 3256.