

アルコールで解き明かす銀河衝突

齊藤 俊貴

〈東京大学 理学系研究科 天文学専攻 〒133-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

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

e-mail: toshiki.saito@nao.ac.jp



銀河衝突は、さまざまな種類の銀河の形成・進化のプロセスをたどるうえで欠かせない現象である。二つの分子ガスが豊富な銀河が衝突すると互いに重力的に影響を及ぼし合いながら、最終的に合体して一つの新たな銀河へと進化していく。その進化の過程で、銀河同士の衝突面で衝撃波により分子ガスが圧縮され、数kpcほどもある星形成領域が生まれることが理論的に予測されている。しかし衝突面が直接観測された例はまだなく、その物理状態や母銀河にどのような影響を与えているかなど詳しい素性はよくわかっていない。われわれの研究グループではこの理論予測を実証するためALMA望遠鏡を用いてVV 114という衝突銀河の観測を行ってきた。結果として、VV 114の二つの銀河の間に連なる星形成領域では衝撃波をトレースするといわれているメタノール分子が豊富に存在していることがわかった。これは、衝突が星形成活動を促進している現場を捉えた初めての観測結果であり、衝突面での分子ガスの状態が二つの銀河そのものとは全く異なっていることを示している。

1. 銀河衝突と銀河進化

最近の観測的研究から、われわれの住む太陽系が属する天の川銀河はほかの銀河と衝突を繰り返して形成されたことが示唆されている。銀河は平均的に、一生に1回衝突または近接での相互作用を起こしたと考えられている¹⁾。現在の宇宙（近傍の宇宙）では銀河の衝突はあまり見られないが昔の宇宙（遠方宇宙）では銀河の密度も高かったため、現在よりも頻繁に衝突は起きていた²⁾。しかし遠方宇宙のこのような現象の観測においては、観測装置の感度や解像度の限界のため、得られる情報が限られてしまう。そのため銀河衝突は、理論シミュレーションなどの研究や近傍に存在する数少ない衝突銀河の観測的研究に限られてきた。

理論シミュレーションから、宇宙の歴史におい

て銀河衝突は銀河の形成や進化、星形成との関連においてとても重要な役割を演じていると予想されている。特に、衝突によってそれぞれの銀河円盤内ではガスが乱流状態となり、星の材料となる高密度な分子ガスの塊が圧縮により形成され、二つの銀河を横切るように「フィラメント」状に星形成が活発になると考えられている³⁾。また、衝突により角運動量を失った分子ガスが銀河中心（以後「中心核」と表記する）に大量に供給され、超巨大質量ブラックホールに落ち込み大量のエネルギーを放出すると考えられている。上記の理論予測のとおり、ほとんどの衝突銀河では分子ガスが中心核に集まっているため、中心核でより分子ガスが明るく観測しやすい。これに対して、薄く広がったフィラメント状の構造は表面輝度が低いいため観測することが難しい。そのため近傍の衝突銀河の観測では中心核の現象ばかりが目され

てきた。そこでわれわれは、そのような広がった構造をよく調べるため、分子ガスがとて豊富な衝突銀河として知られる VV 114 を最新鋭の電波望遠鏡である ALMA 望遠鏡を用いて観測を行ってきた。

2. ALMA 望遠鏡で見る衝突銀河 VV 114

VV 114 は衝突の中期段階として知られる銀河ペアだ。図1に、東京大学がチリ共和国で運用している miniTAO 望遠鏡で得られた近赤外線 (K_s バンド) 画像を載せている⁴⁾。 K_s バンドでは、衝突によって生まれた新しい星ではなく、古い星からの光をみているので、衝突している二つの銀河の構造そのものを見ているとみなす。逆に言えば、 K_s バンドとは異なる分布をしているものは衝突によって作られた構造である可能性が高い。VV 114 を構成する二つの銀河の中心核同士は約 6 kpc 離れている。天の川銀河の直径は約 30 kpc であることから、二つの銀河がかなり近い距離にあることがわかる。VV 114 の特徴の一つとして、古い星の分布は東西の銀河の中心に集中しているのに対して、活発な星形成領域は銀河円盤を横切るようにフィラメント状に分布していることが挙げられる。通常の渦巻き銀河などでは、古い星の分布と星形成領域の分布にここまで大きな違いは見られないので、このフィラメント状の星形成領域は銀河衝突の結果作られたものと推察される。われわれは過去5年間にわたって、このフィラメント構造の物理状態を検証するため ALMA 望遠鏡で観測してきた。

Cycle 0 では、このフィラメントには高密度な分子ガスの塊が数珠状に分布していることが明らかになり、星の材料が豊富に存在していることがわかった⁵⁾。東の銀河の中心核では、超巨大質量ブラックホールやコンパクトで激しい星形成領域に付随する分子ガスの塊も新たに見つかった(図1)。また、銀河衝突面付近からアルコールの

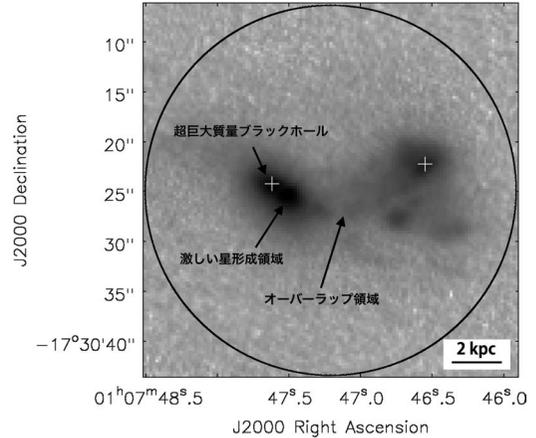


図1 miniTAO望遠鏡で得られたVV 114の可視光画像。十字はそれぞれの銀河の中心核を示す。円はCycle 2 ALMAでの観測視野を示す。

一種であるメタノール分子 (CH_3OH) ガスからの電波放射を僅かに検出することができた⁶⁾。本稿ではメタノール分子からの放射が見つかったこの領域をオーバーラップ領域と呼ぶ(図1)。ちなみに、衝突銀河において中心核以外でメタノール分子を見つけたのは世界で初めてのことであった。しかしながら、このデータは統計的に十分有意とは言えなかった。そこでCycle 2ではオーバーラップ領域のメタノール分子の起源をより詳細に調べるために、スペクトラルスキャンという観測モードを使う周波数方向に広い観測を提案した。このモードでは多くの分子からの電波を同時に検出することができるため、中心核とオーバーラップ領域での分子ガスの違いを明確にできるはずである。

3. 観測結果

図1で示した三つの特徴的な領域に対して、Cycle 2 ALMA で得られたスペクトルを図2に示している。観測提案時の目論見どおり、検出された分子が領域によって明らかに異なっていることが見て取れる。図2で最も目を引くのが観測周波数 142 GHz 付近にある最も明るい輝線なのだが、

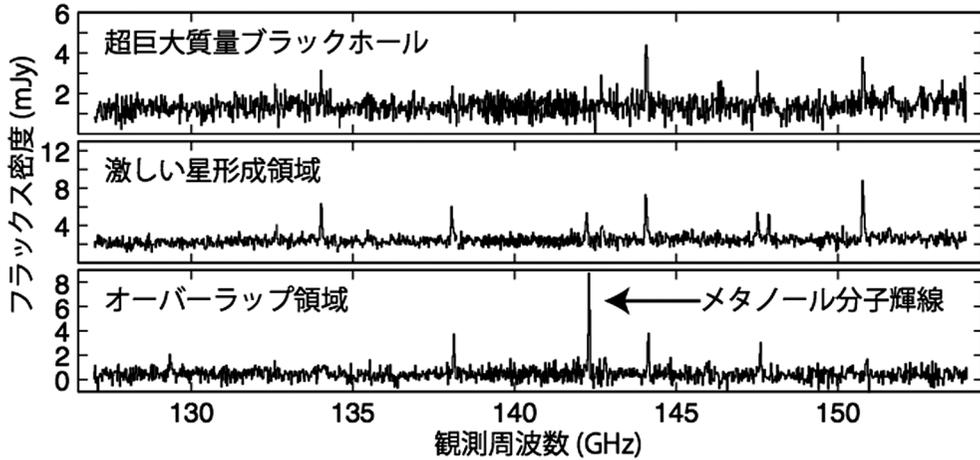


図2 VV 114の三つの特徴的な領域に対して得られた、Cycle 2 ALMAのスペクトラルスキャンモードのデータの一部。

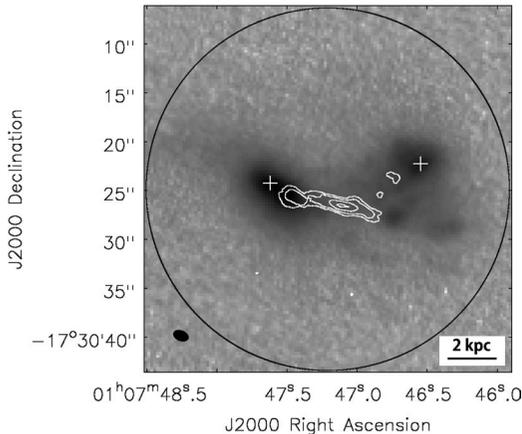


図3 miniTAO望遠鏡で得られたVV 114の可視光画像の上に、ALMAで得られたメタノール分子の分布を等高線で表示した画像。AMLA望遠鏡の解像度は左下の黒い楕円で示している。

これはやはりメタノール分子からの放射であった。驚くべきことにこのメタノール分子輝線、今回観測した周波数帯の中で最も明るい輝線であった⁷⁾。図3では、図2で示した明るいメタノール分子の空間分布を載せている。通常の銀河では、中心核付近でよりガスが大量にありさまざまな現象が起こっているため、より化学的に複雑になり多くの分子が検出される。しかし、VV 114のオーバーラップ領域ではVV 114の中心核に比べ

分子ガスの総量は少ないにもかかわらず（～1/5）、より多くの分子が検出された。一例としてHNCやSOといった分子もオーバーラップ領域でのみ検出されている。以上の結果から、VV 114のオーバーラップ領域では、通常の銀河では見られない現象が起きているのは明らかである。

4. メタノール分子の起源と銀河衝突

より定量的な議論をするために、複数検出されたメタノール分子輝線を使って輻射輸送方程式を解くことで、メタノール分子の存在量を推定した。この結果、オーバーラップ領域での水素分子に対するメタノールの存在量（相対存在量と呼ぶ）は、ほかの二つの領域に比べ約10倍高いことがわかった。ちなみに、高密度な分子ガスのトレーサーであるHCN分子の相対存在量は三つの領域でほぼ同じであったことから、10倍という数字がいかに大きいかを察していただければと思う。

ところで、宇宙空間ではメタノール分子はどのように作られるのだろうか？ さまざまな反応経路が知られているが、そのうち最もメタノール分子「ガス」を効率よく作り出す方法は、星間塵

(ダスト) 上での反応であると考えられている。ごく低温 (<25 K) の環境にあるダストの表面には、一酸化炭素 (CO) の氷がたくさん付着している。COの氷に水素原子が付加されていく反応がどんどん進むことで、最終的にメタノール (CH₃OH) 分子の氷ができあがる⁸⁾。そしてその氷を気体へと昇華させることができれば、メタノール分子がガス中に豊富に供給され、メタノール分子ガスで明るいオーバーラップ領域のような場所が形成される。ここで問題になるのが、一体「誰」が「どうやって」メタノールの氷を気体へと昇華させているのかということである。この昇華という言葉は聞き慣れないが、常温の部屋などに放置されたドライアイス (二酸化炭素の氷) を思い浮かべてもらえるとわかりやすい。白いもくもくを出してどんどん氷が小さくなっていく様子が想像できるだろう。昇華とは、低温環境下にあった固体が高温になることで気体へと変化する現象である。メタノールの氷の場合、約100 K以上で昇華が起こると知られている。

宇宙空間でダストを暖める方法は大まかに二つある。(1) 高温な天体現象で温度を上げる⁹⁾、もしくは(2) 衝撃波によって星間物質の運動エネルギーを熱として加える¹⁰⁾ 方法だ。しかし、メタノール分子は強い紫外線やX線で壊されてしまうため、これらの光から遮蔽された場所である必要もある。以下では、実際に銀河系内でメタノール分子が観測されている(1) 高温、(2) 衝撃波領域についてまとめる。

(1) ホットコアと呼ばれる、生まれたばかりの大質量星が存在する高密度分子ガスの塊でメタノール分子は検出されている。ホットコアでは、生まれたばかりの星からの熱が周囲の分子ガスを暖める。しかしその星からの紫外線は、高密度なガスが遮蔽して内側まで届かない。そのためメタノール分子が豊富に存在する領域ができあがる。

(2) 原始星から吹き出す高速な分子ガスのジェットと周りの星間物質が衝突する場所でメタ

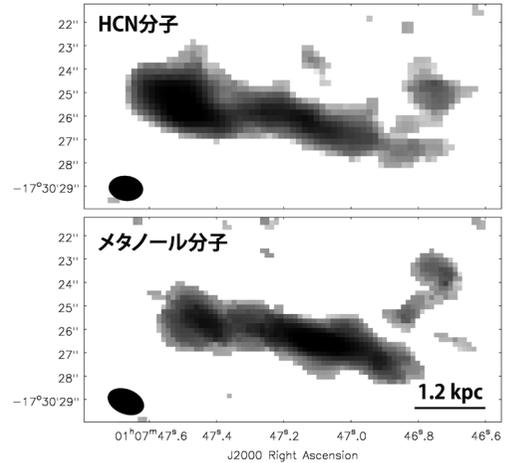


図4 ALMA望遠鏡で得られたVV 114のHCN分子とメタノール分子の拡大画像。AMLA望遠鏡の解像度は左下の黒い楕円で示している。

ノール分子が検出されている。ここでは、ジェットが原始星を取り囲んでいる(ダストを含む)星間物質と衝突するときに衝撃波が発生しダストが暖められた結果、メタノール分子が豊富になっている。

これらの銀河系内での観測結果を元に、VV 114のオーバーラップ領域でのメタノール分子の起源について考察する。

まずは(1)のようなホットコアがオーバーラップ領域を占めていると仮定する。このときVV 114を観測すると、メタノール分子と高密度分子ガスの空間分布がほぼ同じになるはずである。図4に代表的な高密度分子ガストレーサーであるHCN分子の画像との比較を載せている。図から明らかなように、二つの分子の分布は似通っているもののピークの位置は一致しておらず、また明るさに相関が見られない。この違いはホットコアのみでは説明ができない。次に(2)のような原始星のみがオーバーラップ領域を占めている場合を考える。この場合も、原始星がたくさん生まれる場所は高密度分子ガスが豊富に存在しているはずなのでHCNとメタノール分子の空間分布はほぼ同じになるはずである。

以上の考察から、オーバーラップ領域の星形成領域がメタノール分子の起源ではなさそうだ。考えられる起源は、高温または衝撃波を伴う、銀河系内の星形成領域では見られない現象ということになる。また、メタノール分子の分布が6 kpc程度の広がりをもつことから、その現象は銀河スケールの現象であることが推測される。銀河スケールで高温状態を作り上げる現象はブラックホールなどが考えられるが、オーバーラップ領域でそのような激しい現象は見つかっていない。むしろ中心核のほうが激しい領域である。というわけで、最終的に残る可能性は、「銀河スケールの大きさをもち衝撃波を伴う現象」だ。オーバーラップ領域が二つの銀河のちょうど中間に位置することや、以上のすべての議論から、VV 114で見つかった明るいメタノールの起源は、二つの銀河の衝突による衝撃波だと考えられる。前述のHNCOやSO分子などの検出もこの説をサポートする。

すべての観測結果を説明するシナリオはこうだ。二つの銀河が衝突してオーバーラップ領域が形成された。ここでは衝撃波がまだやまず、メタノール分子が観測されている。それと同時に、一部のガスは衝撃波により圧縮され星形成領域となっている。もしこのシナリオが正しいならば、オーバーラップ領域は銀河の衝突が星形成活動を促進している現場であり、われわれの観測は理論シミュレーションで予測されたガスの振る舞いを直接とらえることに成功したということになる。

5. 今後の展望

もしVV 114で見つかったメタノール分子が、本当に銀河衝突の現場を直接見ているのなら、メタノール分子は衝突銀河を調べていくうえで重要なツールになっていくと考えられる。そのためにも、今回VV 114で発見した現象を別の角度から研究する必要があるのと同時に、ほかの衝突銀河でも同様の現象が見られるのかを調べていく必

要がある。今後、われわれの研究グループでは、ALMAを用いたほかの衝突銀河のメタノール分子の観測や、ほかの波長での衝撃波の観測を行っていく予定である。

謝辞

本稿の手直しをしてくださった、川邊良平さん、伊王野大介さん、山口正行さんに感謝申し上げます。また本研究は、独立行政法人日本学術振興会の特別研究員奨励費の助成を得ています。

参考文献

- 1) Xu C. K., et al., 2012, *ApJ* 747, 85
- 2) Goto T., et al., 2010, *A&A* 514, A6
- 3) Saitoh T. R., et al., 2009, *PASJ* 61, 481
- 4) Tateuchi K., et al., 2015, *ApJS* 217, 1
- 5) Iono D., et al., 2013, *PASJ* 65, L7
- 6) Saito, T., et al., 2015, *ApJ* 803, 60
- 7) Saito, T., et al., 2017, *ApJ* 834, 6
- 8) Yamamoto T., 1985, *A&A* 142, 31
- 9) Garrod R. T., et al., 2008, *ApJ* 682, 283
- 10) Viti S., et al., 2011, *ApJL* 740, L3

Alcohol Emission in the Nearby Merging Galaxy VV 114

Toshiki SAITO

Department of Astronomy, School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

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

Abstract: Galaxy merger is one of the most important population of galaxies. Here we present our recent ALMA results in a merging galaxy VV 114. We detected bright methanol (CH_3OH) emission between the two galaxy's disks (Overlap region), not their nuclei. The methanol abundance is an order of magnitude enhanced at the Overlap region relative to other regions. The origin of the bright methanol emission might be large-scale shocks due to violent galaxy-galaxy collision.