

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800116

研究課題名(和文)ALMA望遠鏡で探る銀河衝突末期における円盤形成

研究課題名(英文)Investigating Disk Galaxy Formation Through ALMA Observations of Merger Remnants

研究代表者

伊王野 大介 (Iono, Daisuke)

国立天文台・チリ観測所・准教授

研究者番号：60425402

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,100,000円

研究成果の概要(和文)：銀河形成の標準モデルでは、銀河衝突や合体の繰り返しにより円盤銀河は成長していくとされるが、このプロセスは観測的には証明されていない。本課題では、ALMA望遠鏡を用いた衝突銀河の分子ガス観測から、円盤銀河の形成過程を調べることを目的とする。

観測の結果、37個の銀河のうち30天体で分子ガスからの放射が検出された。そして、30天体のうち実に8割に相当する24天体では、分子ガスが円盤状に分布していることがわかった。中には、天の川銀河の円盤に匹敵する大きさのガス円盤を持つ銀河も発見された。今回の研究で、少なくとも近傍の宇宙では銀河衝突によって分子ガス円盤が作られる可能性があるということが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The standard galaxy formation model predicts that galaxy collisions and mergers play an important role in the formation and evolution of disk galaxies. However, this process has not been proved observationally. Here we use the ALMA telescope to investigate whether galaxy collisions can lead to the formation of large disk galaxies.

We detected molecular gas emission from 30 galaxies out of the 37 galaxies that we have observed. Out of the 30 galaxies, 24 of them were found to possess rotating molecular gas disks. The size of the disks in a few of the galaxies were in fact comparable to the size of our own Milky Way galaxy. From this study, we suggest the possibility that galaxy collisions can indeed produce large rotating disk galaxies in the local universe.

研究分野：電波天文学

キーワード：銀河形成 電波天文学 銀河衝突 分子ガス観測 銀河進化

1. 研究開始当初の背景

銀河の衝突や合体は、その形態を大きく変化させるのみならず、星形成を誘発するなどの銀河の形成・進化に対して極めて重要な役割を担っていると考えられている。これは、大規模構造形成シミュレーションによる理論的考察から予測されている一方で、観測的にも近傍の超高光度赤外線銀河(U/LIRG)の多くが変則的な形態を示しており、銀河衝突による誘発的星形成を強く示唆している。銀河の衝突現象で重要なのが Major Merger (銀河の質量比が 1:1 から 1:3 までの衝突の総称) である。Major Merger は楕円銀河やバルジ成分が支配的な、いわゆる early type 銀河を主に形成すると考えられてきた。遠方宇宙においては、天の川銀河程度の質量を持つ銀河の約半分が Major Merger を起こしている事が観測的に知られているため【参考文献】、このモデルが正しいとすると、近傍宇宙には early type 銀河が数多く存在する事になる。しかし、実際の近傍宇宙における銀河の形態は、20%が early type 銀河であるのに対して渦巻(円盤)銀河が 70%の割合で存在し、円盤銀河が支配的である。この問題を解決する為に、近年では、Major Merger による円盤銀河の形成モデルが提唱されている【参考文献】(図 1)。このモデルでは、ガス-星質量比が高い円盤銀河を衝突合体させた場合は、銀河外周ガスは角運動量を失う事無くその残骸において回転する広がった(星の原料である)ガスの円盤を再形成する可能性がある事を示している。Major Merger のタイムスケールは数十億年であるため、今から数十億年前の宇宙における銀河のガス量が円盤形成を決める鍵となる。実際、赤方偏移が 0.2 (現在より 24 億年)以前の時代の銀河においては、分子ガス量が近傍の銀河より平均で 2-6 倍高い傾向にある事が分かってきた【参考文献】。そのため、このモデルを検証する事は極めて重要であるが、観測的な検証は進んでおらず、大規模なサーベイが急務である。

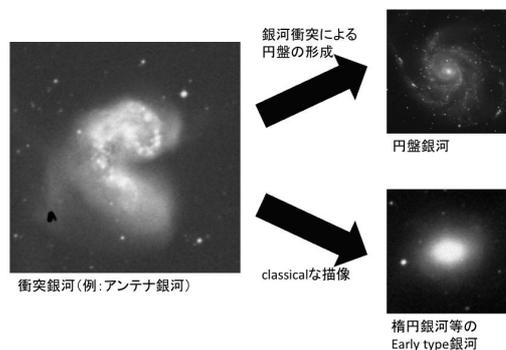


図 1: 銀河の衝突後に、円盤銀河もしくは楕円銀河が形成されるシナリオを表している。

2. 研究の目的

本課題では、衝突末期段階の銀河の分子ガス輝線をサーベイ観測し、銀河の衝突による円盤の形成過程に迫ることを目的とする。具体的には、(1)合計 37 個の銀河の CO 分子輝線画像を用いて、ガスの分布を調べ、銀河の力学的情報を引き出す事により、ガス円盤の存在の有無を系統的に調べる。円盤銀河は回転する事によってその形を維持しているため、電波画像に銀河回転固有の特性が見つかれば、円盤の証拠となる。また、円盤モデルを用いた定量的評価や、円盤系の力学的安定性を明らかにする。先行研究では、赤外線で見える天体の中心 1 kpc 以内の分子ガスの運動は円盤状に激しく回転している事が分かってきた【参考文献】。しかし、銀河全体に広がったガス円盤の検出は、良質な電波画像を系統的に取得する必要があるため、前例はほとんどなく、本課題は先駆的な研究となる。また、(2)分子ガス量と星質量を比較し、円盤形成の条件を探る。円盤形成は、ガス-星質量比に依存する可能性がある。これを明らかにする為に、近赤外線画像を用いて星質量を導出し、ガス質量との比較を行う。さらに、(3)衝突初期の天体や、衝突の痕跡が見られない孤立銀河(early type 銀河や渦巻銀河)の分子ガス量と比較する。これにより、衝突前後での分子ガス特性の違いを明らかにする。それらの結果をもとに(4)シミュレーションから予想される低温ガスの分布・運動と比較し、理論予想との一致を検証する。

3. 研究の方法

ALMA 望遠鏡を用いた分子輝線観測、およびデータ解析: (1) ALMA 望遠鏡を用いて一酸化炭素分子輝線の観測を 20 天体に対して行う。その他、SMA 干渉計、CARMA 干渉計でもデータを取得済みであり、ALMA 望遠鏡で得られたデータとあわせると、合計 37 天体の世界最大の衝突末期天体のサンプルが構築される。(2) 得られた電波画像の解析: 各画像に対して円盤モデルをフィットし、円盤の存在を明らかにするとともに、円盤の回転速度を求める。また、CO-H₂ 変換係数を用いて分子ガス輝線積分強度から分子ガス質量を導出し、さらに、出版済みの K-band 画像から (Mass-Luminosity 関係を使い) 導出した星質量との比を求め、円盤形成と質量比の相関(要するに、円盤形成の条件)を調べる。また、円盤の力学質量とガス質量を比較し、円盤系が重力的に安定かどうか明らかにする。(3) 他の銀河種族や、シミュレーションとの比較: Early type 銀河のデータは SAURON データ【参考文献】を用い、孤立円盤銀河のデータは【参考文献】を用いる。また、シミュレーション結果【参考文献】を、申請者が独自に開発したツールや手法【参考文献】を用いて観測結果と直接比較する。

4. 研究成果

観測の結果、37個の銀河のうち30天体で分子ガスからの放射が検出され、その分布と運動を描き出すことに成功した(図2)【参考文献】そして、円盤モデルのフィットから、30天体のうち実に8割に相当する24天体では、分子ガスが円盤状に分布していることがわかった。今回の研究で、少なくとも近傍の宇宙(約4000万~6億光年)では銀河衝突によって分子ガス円盤が作られる可能性があるということが明らかになった。また電波のドップラー効果から、これらのガス円盤がそれぞれの銀河中心のまわりを回転していることもわかった。また、調査の結果、巨大な円盤はどれも力学的に安定していることがわかったが、ガス-星質量比と円盤形成に特

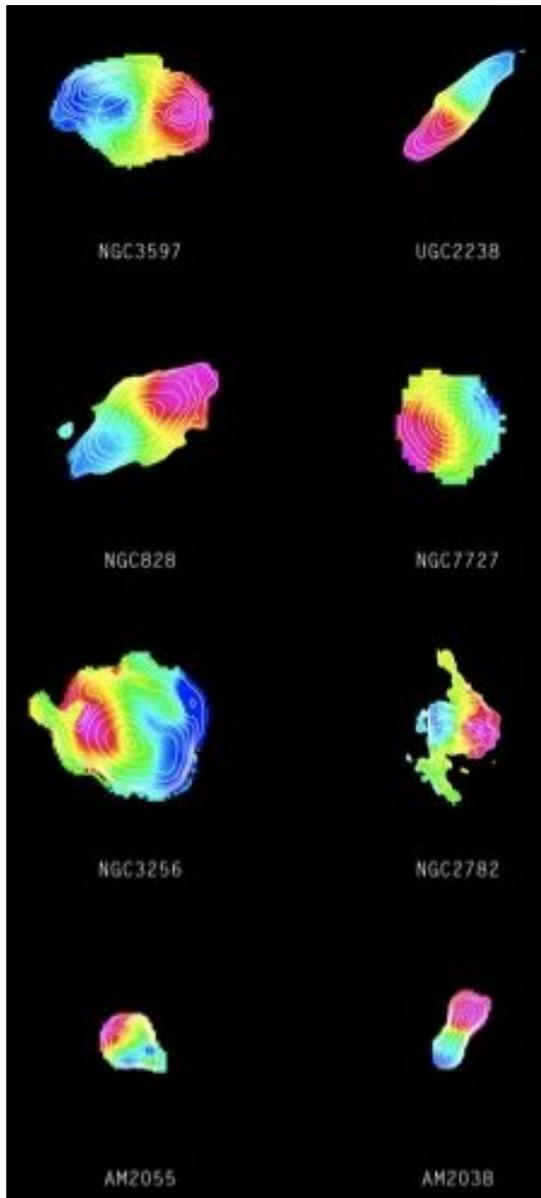


図2: 今回の観測で得られた結果の一部。色は回転速度を表しており、ここにあげるとの銀河も回転する広がったガス円盤を持つことがわかった。

に強い相関は見られなかった。さらに、分子ガスの円盤が見つかった24天体のうち11天体では、銀河の中心部に密集した星の集団(銀河のバルジに相当)よりも分子ガスの円盤の広がりのほうが大きくなっていった。中には、天の川銀河の円盤に匹敵する大きさのガス円盤を持つ銀河も発見された。衝突の最終段階にある銀河に高い割合でガス円盤が存在することが観測で直接示されたのは、今回が初めてであり、今後は、他の銀河種族との比較や、シミュレーションとの詳細な比較を進め、同様の手法を初期宇宙に存在する衝突合体銀河に応用する予定である。

研究成果は、科学雑誌「Newton」の紙面をはじめ、米国雑誌「National Geographic」や「Sky & Telescope」のウェブで取り上げられた。

<引用文献>

- Bell et al., 2006, *Astrophysical Journal*, 652, 270
Hopkins et al., 2009, *Astrophysical Journal*, 691, 1168
Combes et al. 2011, *Astronomy & Astrophysics*, 528, 124
Downes & Solomon 1998, *Astrophysical Journal*, 507, 615
Crocker et al. 2011, *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, 410, 1197
Kuno et al. 2007, *Publication of Astronomical Society of Japan*, 59, 117
Xu, Narayanan & Waker 2010, *Astrophysical Journal*, 721, 112
Iono, Yun & Mihos 2004, *Astrophysical Journal*, 616, 199
Ueda et al. 2014, *Astrophysical Journal Supplement*, 214, 1

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

- Ueda, J., Iono, D., Yun, M., Crocker, A., Komugi, S., Espada, D., Hatsukade, B., Kaneko, H., Matsuda, Y., Tamura, Y., Wilner, D., Kawbe, R., Pan, H. "Investigating the evolution of merger remnants from the formation of gas disks", 2015, *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 309*, 283-284, 査読無, DOI: 10.1017/S1743921314009879
Ueda, J., Iono, D., Yun, M., Crocker, A., Komugi, S., Espada, D., Hatsukade, B., Kaneko, H., Matsuda, Y., Tamura, Y., Wilner, D., Kawbe, R., Pan, H. "Cold Molecular Gas in Merger Remnants. I.

Formation of Molecular Gas Disks”, 2014, The Astrophysical Journal Supplement, 214, 1-29, 査読有, DOI: 10.1088/0067-0049/214/1/1

Iono, D., Ueda, J., Yun, M., Crocker, A., Espada, D., Hatsukade, B., Kaneko, H., Kawabe, R., Narayanan, D., Tamura, Y., “Charting the Evolution of Merger Remnants Through Molecular Gas Observations”, ASP Conference Series, 477, 2013, 297, 査読無, <http://aspbooks.org/custom/publications/paper/477-0297.html>

Ueda, J., Iono, D., Yun, M., Wilner, D., Narayanan, D., Hatsukade, B., Tamura, Y., Kaneko, H., Crocker, A., Espada, D., Kawabe, R., “Reformation of Cold Molecular Disks in Merger Remnants”, ASP Conference Series, 476, 2013, 61-64, 査読無, <http://aspbooks.org/custom/publications/paper/476-0061.html>

[学会発表](計 12 件)

植田準子「Investigating the evolution of merging galaxies via cold molecular gas」Revolution in Astronomy with ALMA - the 3rd year-, 2014 年 12 月 8 日, 東京国際フォーラム(東京都)

植田準子「衝突末期段階の銀河における分子ガスの観測的研究」日本天文学会 2014 秋季大会、2014 年 9 月 11 日, 山形大学(山形県)

伊王野大介「ALMA Science Highlights」, International Union of Radio Science, 2014 年 8 月 16 日、北京(中国)

植田準子「A Kiloparsec Scale Molecular Gas Disk in Late -Stage Mergers」, Transformational Science in the ALMA Era: Multi Wavelength Studies of Galaxy Evolution, 2014 年 8 月 4 日、シャーロットビル(米国)

植田準子「Cold Molecular Gas in Merger Remnants」, East Asia ALMA Science Workshop 2014, 2014 年 7 月 14 日、済州島(韓国)

植田準子「Investigating the evolution of merger remnants from the formation of gas disks」IAU Symposium 309: Galaxies in 3D Across the Universe, 2014 年 7 月 7 日、ウィーン(オーストリア)

植田準子「The CO survey of Merger Remnants with ALMA」日本天文学会 2014 春季大会, 2014 年 3 月 22 日、国際基督教大学(東京都)

植田準子「Probing the evolution of merger remnants through formation of cold molecular gas disks」3D2014: Gas and stars in galaxies: A

multi-wavelength 3D perspective, 2014 年 3 月 12 日, ヨーロッパ南天天文台(ドイツ)

植田準子「ガス円盤の形成から探る衝突末期段階の衝突銀河の進化」日本天文学会 2013 秋季大会、2013 年 9 月 12 日, 東北大学(宮城県)

植田準子「Formation of Molecular Gas Disks in Merger Remnants」Asia-Pacific Radio Science Conference, 2013 年 9 月 5 日, 台北(台湾)

伊王野大介「Charting the Evolution of Merger Remnants Through Molecular Gas Observations」, Galaxy Mergers in an Evolving Universe, 2013 年 10 月 23 日, 台北(台湾)

伊王野大介「Synergy with ALMA beyond 2020」, GLAO Workshop, 2013 年 6 月 13 日-14 日, 北海道大学(北海道)

[その他]

ウェブページ:

(公開データ)

<http://alma-intweb.mtk.nao.ac.jp/~jueda/data/mr/index.html>

(プレスリリース: 和文)

<http://alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/pressrelease/201409177435.html>

(プレスリリース: 英文)

<http://www.almaobservatory.org/en/press-room/press-releases/751-violent-origins-of-pancake-galaxies-probed-by-alma>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊王野 大介 (IONO, Daisuke)
国立天文台・チリ観測所・准教授
研究者番号: 60425402

(2) 研究協力者

植田 準子 (UEDA, Junko)
国立天文台・チリ観測所・特任研究員
研究者番号: 60749935