

平成 31 年 5 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05294

研究課題名(和文) 激動進化期における銀河の星形成の研究

研究課題名(英文) Star formation in galaxies in the violent epoch of galaxy evolution

研究代表者

太田 耕司 (Ohta, Kouji)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：50221825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：銀河とはガスを星に転換しながら進化するシステムである。そこで、銀河内のガスをどのように星に転換して銀河構造を作っていくのか、どのような条件で星ができるのかという問題に、主に分子ガスの観点から調べた。銀河進化が最も活発であったと考えられる時代の、円盤銀河の進化過程を見ている可能性がある、「分子ガスクランプ銀河」の詳細な観測を行い、この銀河における分子ガスクランプの性質についての知見を得た。また、現在の宇宙における銀河を対象として、星形成効率が非常に悪い分子雲の性質について新たな知見を得た。この結果は、銀河形成進化の理論的研究で星ができ過ぎるという問題を回避するヒントになると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河とは、宇宙の中でガスを星に転換していくシステムであると捉えることができる。従って、銀河内でどのように星が形成されていくのかを明らかにすることが重要である。本研究では、今から約90億年前に円盤銀河がどのように形成されたか的一端を見ることができた点、星生成の母胎である分子ガスがあっても星ができない原因の可能性を見出したという点で、意義があると考えられる。宇宙の成り立ちを知ることは最終的には人類の世界観に寄与すると考えられ、社会的にも意義はあるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：How do galaxies convert gas into stars and form structure of galaxies? What is the condition for the star formation in galaxies? We studied these questions with respect to the molecular gas in galaxies. We revealed nature of the molecular gas clumps in a 'molecular clumpy galaxy', which may be in an evolutionary stage of a disk galaxy in the epoch of violent evolution of galaxies. We also found new insights for the cause for the very inefficient star formation in the present-day galaxies. The insights would be useful to understand the over production of stars in high redshift universe theoretically faced problem.

研究分野：銀河進化

キーワード：銀河 銀河進化 星形成

1. 研究開始当初の背景

銀河の進化・形成に関する観測的研究は、1990年代半ば頃から、8-10mクラスの大型望遠鏡やハッブル宇宙望遠鏡の稼動に伴って飛躍的に進展した。その結果、銀河は、宇宙誕生後7-8億年後にはすでに存在しており、宇宙における平均星形成率(銀河の成長率)は時間と共に急増し、赤方偏移2付近(宇宙年齢30億年頃。今から110億年前)でピークを迎える。その後、銀河成長率は現在にむかって徐々に下がっていく、という描像が得られつつある。すなわち赤方偏移2付近の宇宙は、銀河が最も激しく星形成を行っていた時代であると考えられるようになってきた。さらに、現在の宇宙に見られる銀河の形態の発露もこの時代であると考えられている。従って、赤方偏移2付近から1にかけての時代は、銀河の激動の進化期であり、この時代における銀河の星形成を知ることは、銀河進化を理解する上で極めて本質的と言ってもよい。

激動進化期における銀河の観測的研究は、これまで、個別の銀河の星質量・星形成率といった全体的な量を導出することで、どのような進化があったのかを描き出すといったものが主流であったと考えられる。次のステップとして、銀河内部での星形成の様子を探り、銀河構造の進化にも光をあてていく研究が必要になってきていた。例えば顕著な例として、いわゆるclumpy銀河と呼ばれる銀河が挙げられる。銀河内に複数の巨大な星形成領域が見られるものである。これらは銀河に流れ込むガスが円盤を形成し、重力不安定を起こしてできたとする説がある。また、これらのclumpsが銀河中心に落ち込んでバルジを形成するという考え方もあり、円盤銀河の形成途上を見ている可能性がある。このような観点から銀河進化の研究を進める必要があった。また、理論シミュレーションでは、銀河に星ができ過ぎるといった大きな問題があり、フィードバックと呼ばれる星形成を抑制する機構がいろいろ提案されているが、観測的には何が星形成を抑制するのかよくわかっておらず、近傍の銀河を見直すことでこの問題への手がかりを得ることが重要になっていった。

2. 研究の目的

本研究では、当時の申請者自身による最近の研究結果をベースに、銀河の中での星形成効率やメカニズム等を中心に、これまで知られてこなかった側面にメスを入れることを目的とした。

1つの目的は、独自に発見していた、激動進化期に存在する分子ガスでのclumpy銀河の性質を調べることである。CO輝線を用いた観測によって、銀河内部を分解して、分子クランプの物理的性質を調べ、その形成、銀河構造進化についてケーススタディ的に調べることを目指した。現状では、このようなサンプルはほとんどないが今後の研究展開のベースとなることが期待された。

また、この問題と深く関連する課題として、分子雲衝突による星形成の素過程の研究を目指した。ガス雲の衝突による星形成は初期宇宙で頻繁に起こっていると考えている人が多いと思われる。そしてそれによって星形成が非常に効率的に進むという考え方もある。果たして衝突で星形成が起こるのか?しかもそんなに高い効率で起こるのか?宇宙の歴史の中で激動進化期での星形成率が高いのはそれが要因なのか?このような問題にアプローチした。

更に、近傍銀河での星形成から星形成効率を決める要因を探ることも目的とした。近傍の棒渦巻銀河の棒部では(重い星の)星形成が抑制されていることがよく知られているが、その原因はいまだに不明である。ここ2-3年の高空間分解能のシミュレーションの結果、分子ガス雲の高速衝突が星形成の抑制の原因であるという可能性がでてきた。棒渦巻銀河で何故星ができないのかその原因を探ることで、宇宙初期の星形成の抑制機構についての新たな知見を得る。合わせて関連する研究も推進する。

3. 研究の方法

上記目的達成の方法は、主に電波領域でのCO輝線の観測である。野辺山宇宙電波観測所のシングルディッシュ望遠鏡や、アタカマ大型ミリ波サブミリ波電波干渉計(ALMA)による観測を行った。特に、ALMAではその角分解能の高さから銀河内部の詳細構造を明らかにできた。またCOのいくつかの遷移輝線を用いることでその物理状態を探ることもできた。シングルディッシュ望遠鏡では全CO輝線を観測することができるが、ALMAでは広がった構造を持つ成分を検出することはできない。このことから分子ガスの分布に制限をつけることもできた。

更に、本研究以前に行っていた研究から、激動進化期における銀河の分子ガス質量とその星質量の関係を得ていたので、この関係と銀河の星質量関数の進化の研究成果を利用して、宇宙の平均的な分子ガス量(密度)の進化計算を行った。

4. 研究成果

分子ガスで発見された分子ガスクランプ銀河は赤方偏移1.4(宇宙年齢約45億年、現在から90億年程度昔)の宇宙に存在するもので、まだこのような銀河の発見例は極めて少ない。ALMAによるCO(5-4)の観測で偶然このような銀河を発見していたので、野辺山宇宙電波望遠鏡やALMAによるCO観測でその性質に迫った。特に、ALMAによるCO(2-1)輝線観測で、いっそう明瞭に分子ガスクランプを同定することができたと共に、より信頼性の高い分子ガス質量も得られた。更に、分子輝線により銀河内でのガスの銀河回転運動もよりわかるようになった。その結果、分子ガス質量と銀河サイズがわかり、分子ガス質量は 10^{10} 太陽質量位で大きさは1kpc程度とわ

かった。また、これらから、ガス円盤の重力不安定でガスクランプが形成された可能性も示唆された。クランプの分子ガス質量とサイズから分子ガス密度も求めた。更に、CO 輝線比からモデルを介して分子ガス密度を独立に導出した。これにより分子ガスクランプの分子ガスの数密度は $100\text{-}10000\text{ cm}^{-3}$ 程度であることがわかった。一方、クランプのビリアル比 (=ビリアル質量/分子ガス質量) が非常に小さいこともわかった。これは一見矛盾した結果のように見えるが、その解釈として、「ビリアル平衡状態ではなく重力崩壊途中」という解釈や、「クランプは、より小さい多数の分子雲の集合体である」といった解釈が可能であることがわかり、必ずしも矛盾していないと考えられる。分子ガスクランプについてはこれまでほとんどその性質は未知であったので、このような描像が得られたことは今後の研究の嚆矢になると期待される。一方で、クランプの中に小さな多くのクランプが存在するとしたらその成因は何なのか、フラグメンテーションなのか、今後の課題と考えられる。ただ、残念ながら、今回の観測結果からはバルジ形成に関してははっきりした結論は得られなかった。

近傍棒渦巻銀河を対象に、分子雲の高速衝突による星形成の抑制があるかどうかについて調べた。野辺山宇宙電波望遠鏡を用いて棒部にも分子ガスがあることをまず確認すると同時に、その輝線幅の大きさから高速衝突が示唆された。この結果を元に、ALMA による観測を行って、多数の分子雲の検出に成功した。このデータから分子雲を同定し、その性質を導出した。この過程には自明でない問題がいくつか含まれ難航したが、最近標準的とされる手法を採用することで、他の銀河における研究結果との比較も試みた。その結果、個々の分子雲のサイズや質量、ビリアル比といった緒元は、棒部でも腕部でも平均的には有意な違いがないことがわかった。また典型的な渦巻銀河である M51 のそれらともあまり変わらないことがわかった。このことは、分子雲の性質の違いが星形成の違いを起こしているわけではないことを示しており、いわば問題攻略の外堀を埋めた感じの成果となった。一方、野辺山での観測結果と ALMA での観測結果を比較すると、棒部では、広がった分子ガス成分が多く、腕部ではそのような成分がほとんどないことがわかった。これは予期せぬ結果であった。棒部では広がったガスが多く存在し、それが故に星形成が起こっていない可能性がでてきた。この結果と分子雲の高速衝突シナリオとの関係はまだはっきりしないが、ひとつの可能性として、分子雲の高速衝突によって、分子雲が破壊され、広がった分子ガス成分となったのかもしれない。この可能性については今後の研究課題である。分子ガス観測からあるいはガスシミュレーションから、分子ガスの速度場を出して、個別の分子雲のそれからのずれを調べて衝突の様子を探る予定であったが、まだ途中になっているので、今後この比較も進めていく。

宇宙の星形成の歴史では赤方偏移 1 - 2 付近が星形成のピークである。その原因として、当時は分子ガス量が多かったという見方と分子ガス量は同じだが星形成効率が高かったという見方に大別されていた。本研究に先行する自身の研究から銀河の星質量に対する分子ガスの割合の平均値を得ていたので、既存の銀河星質量関数と組み合わせるという独自の手法を用いて、その当時の分子ガスの量を導出した。その結果、現在の宇宙にみられる分子ガス量の 10 倍近い分子ガスが当時存在したことがわかった。これは赤方偏移 1-2 付近での星形成率が現在の宇宙のそれより約 10 倍位大きいことと符号した。すなわち、星形成率の増加の主たる原因は分子ガス量が多かったことであり、星形成効率が 10 倍も高かったわけではないということが明らかになった。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 13 件)

査読論文のみ

Maeda Fumiya, Ohta Kouji, Fujimoto Yusuke, Habe Asao, Baba Junichi
Large velocity dispersion of molecular gas in bars of strongly barred galaxies NGC1300 and NGC5383

Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 70, 37, 2018

DOI: 10.1093/pasj/psy028

The IceCube Collaboration, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S., INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool Telescope, Subaru, Swift/NuSTAR, VERITAS, VLA/17B-403 teams

Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A

Science 361, 1378, 2018 DOI:10.1126/science.aat1378

Hashimoto Tetsuya, Chaudhary Ravi, Ohta Kouji, 他 5 名

Why Are Some Gamma-Ray Bursts Hosted by Oxygen-rich Galaxies?

The Astrophysical Journal, vol 683, 95, 2018 DOI: 10.3847/1538-4357/aad2d1

Hatsukade B., Kohno K., Yamaguchi Y., Umehata H., Ao Y., Aretxaga I., Caputi K.I., Dunlop J.S., Egami E., Espada D., Fujimoto S., Hayatsu N., Hughes D.H., Ikarashi S., Iono D., Ivison R.J., Kawabe R., Kodama T., Lee M., Matsuda Y., Nakanishi K., Ohta K., et al.

ALMA twenty-six arcmin² survey of GOODS-S at one millimeter (ASAGAO): Source catalog and number counts

Publications of the Astronomical Society of Japan, vol 70, 105, 2018

DOI:10.1093/pasj/psy104

Ikarashi S., Ivison R. J., Caputi K. I., Nakanishi K., Lagos C. D. P., Ashby M. L. N., Aretxaga I., Dunlop J.S., Hatsukade B., Hughes D. H., Iono D., Izumi T., Kawabe R., Kohno K., Motohara K., Ohta K., et al.

Extremely Red Submillimeter Galaxies: New $z > 4$ -6 Candidates Discovered Using ALMA and Jansky VLA

The Astrophysical Journal, vol 835, 286, 2017 DOI: 10.3847/1538-4357/835/2/286

Ikarashi S., Caputi K. I., Ohta K., 他 20 名

Very Compact Millimeter Sizes for Composite Star-forming/AGN Submillimeter Galaxies

The Astrophysical Journal, vol 849, L36, 2017 DOI: 10.3847/2041-8213/aa9572

Ueda Y., Ohta K., 他 35 名 内 25 番目

ALMA 26 arcmin² Survey of GOODS-S at One-millimeter (ASAGAO): X-Ray AGN Properties of Millimeter-selected Galaxies

The Astrophysical Journal, vol 853, 24, 2018 DOI: 10.3847/1538-4357/aa9f10

Maeda, F., Ohta K., Seko, A.

Evolution of Cosmic Molecular Gas Mass Density from $z \sim 0$ to $z = 1-1.5$

Astrophysical Journal, vol. 835, 120, 2017 DOI:10.3847/1538-4357/835/2/120

Seko, A., Ohta K., Yabe, K., Hatsukade, B., Akiyama, M., Tamura, N., Iwamuro, F., Dalton, G.

Constraint on the inflow/outflow rates in star-forming galaxies at $z \sim 1.4$

Astrophysical Journal, Vol. 833, 53, 2016 DOI:10.3847/1538-4357/833/1/53

Seko, A., Ohta K., Yabe, K., Hatsukade, B., Aono, Y., Iono, D.

Gas-to-dust ratios in massive star-forming galaxies at $z \sim 1.4$

Publ. Astron. Soc. Japan, vol. 68, 62, 2016 DOI: 10.1093/pasj/psw060

Hatsukade, B., Kohno, K., Umehata, H., Aretxaga, I., Caputi, K. I., Dunlop, J. S., Ikarashi, S., Iono, D., Ivison, R. J., Lee, M., Makiya, R., Matsuda, Y., Motohara, K., Nakanishi, K., Ohta K., 他 6 名

SXDF-ALMA 2 arcmin² Deep Survey: 1.1-mm Number Counts in a Blank Field

Publ. Astron. Soc. Japan, vol. 68, 36, 2016 DOI: 10.1093/pasj/psw026

Okada, H., Totani, T., Tonegawa, M., Akiyama, M., Dalton, G., Glazebrook, K., Iwamuro, F., Ohta K., 他 9 名

The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). II. The emission line catalog and properties of emission line galaxies

Publ. Astron. Soc. Japan, vol. 68, 47, 2016 DOI: 10.1093/pasj/psw043

Okumura, T., Hikage, C., Totani, T., Tonegawa, M., Okada, H., Glazebrook, K., Blake, C., Ferreira, P. G., More, S., Taruya, A., Tsujikawa, S., Akiyama, M., Dalton, G., Goto, T., Ishikawa, T., Iwamuro, F., Matsubara, T., Nishimichi, T., Ohta K., 他 6 名

The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). IV. New constraint on gravity theory from redshift space distortions at $z \sim 1.4$

Publ. Astron. Soc. Japan, vol. 68, 38, 2016 DOI: 10.1093/pasj/psw029

〔学会発表〕(計 16 件)

前田郁弥, 太田耕司, 羽部朝男, 藤本裕輔, 馬場淳一
強い棒渦巻銀河 NGC1300 における分子雲の性質

日本天文学会 2019 春季年会

羽部朝男, 藤本裕輔, 前田郁弥, 太田耕司

強い棒渦巻銀河 NGC1300 における星形成の抑制

日本天文学会 2019 春季年会

前田郁弥, 太田耕司, 羽部朝男, 藤本裕輔, 馬場淳一

棒渦巻銀河 NGC1300 における星形成の抑制 3

日本天文学会 2018 秋季年会

Fumiya Maeda, K. Ohta, A. Seko

Evolution of Cosmic Molecular Gas Mass Density from $z \sim 0$ to $z = 1-1.5$

The role of gas in galaxy dynamics (国際学会) 2018

太田耕司

すばる PSF による銀河分光サーベイへの期待

日本天文学会 2018 春季年会

前田郁弥, 太田耕司, 羽部朝男, 藤本裕輔, 馬場淳一

棒渦巻銀河の棒部における星形成の抑制 2

日本天文学会 2017 秋季年会

田中康之, 内海洋輔, 井上芳幸, 太田耕司

150MHz TGSS, 1.4GHz NVSS データを用いたブレーザー候補天体カタログと Pan

STARRS データによる可視対応天体の同定

日本天文学会 2017 秋季年会

世古明史、太田耕司、他 8 名

$z=0.1-0.2$ の一般的な星形成銀河における分子ガスの性質

日本天文学会 2017 春季年会

前田郁弥、太田耕司、世古明史

宇宙の分子ガス密度の進化 2

日本天文学会 2017 春季年会

廿日出文洋、太田耕司、他 5 名

ガンマ線バースト母銀河における分子ガス探査

日本天文学会 2017 春季年会

世古明史、太田耕司、他 6 名

分子ガス観測から制限する $z\sim 1.4$ における星形成銀河のガスの流入率・流出率

日本天文学会 2017 春季年会

松林和也、太田耕司、長尾透、嘉数悠子

極端に輝線等価幅の大きい近傍矮小銀河の可視光面分光観測

日本天文学会 2017 春季年会

矢部清人、太田耕司、他

大規模近赤外分光サンプルで明らかにする銀河環境とガス金属量との関係

日本天文学会 2017 春季年会

太田耕司、世古明史、青野佑弥、羽部朝男、藤本裕輔、馬場淳一

棒渦巻銀河の棒部における星形成の抑制

日本天文学会 2016 秋季年会

前田郁弥、太田耕司、世古明史

分子ガス密度の宇宙論的進化

日本天文学会 2016 秋季年会

Seko, A., Ohta, K., Yabe, K., Hatsukade, B., Akiyama, M., Tamura, N., Iwamuro, F., and Dalton, G.

Constraint on the inflow/outflow rates in star-forming galaxies at $z\sim 1.4$ from molecular gas observations

The galaxy life-cycle : From activity to quiescence, and back, across cosmic times(国際学会) 2016

〔図書〕(計 1 件)

谷口義明、岡村定矩、祖父江義明、太田耕司、他 日本評論社

銀河 第 2 版 2018 p167-p189

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：世古明史

ローマ字氏名：Seko Akifumi

研究協力者氏名：前田郁弥

ローマ字氏名：Maeda Fumiya

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。