

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540230

研究課題名(和文) 激動進化期における銀河の観測的研究

研究課題名(英文) Observational studies of galaxies in the era of violent evolution

研究代表者

太田 耕司(Ohta, Kouji)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50221825

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙が始まって30～50億年頃の宇宙における銀河は激しい成長過程にあったと考えられており、その時代の銀河進化を研究することは重要である。

宇宙年齢約40億年頃の星形成銀河中の分子ガスの質量、その割合をALMA望遠鏡を使って求めた。また、すばる望遠鏡による観測から同時代の星形成銀河のガスの重元素量を求めた。これらの結果を銀河の化学進化モデルと比較することで、銀河進化は、ガス流入量と星形成で使用されるガス量と流出量がバランスしながら進んでいるらしいことがわかった。また、星形成銀河の形態進化についても調べ、統計的には「丸い」円盤銀河の出現時期が宇宙年齢60億年頃であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Studies of evolution of galaxies at redshift = 1~2 (cosmic age of 3-5 Gyr) are important, because galaxies are considered to be evolving violently in the era.

We estimated molecular gas masses and the fractions for star-forming galaxies in the universe with an age of about 4 Gyr with ALMA telescope. We also derived gas metallicity in galaxies in the same era by using the Subaru telescope. Comparing these quantities with galaxy chemical evolution model, we found that gas inflow and out flow into/from galaxies play an important role for galaxy evolution; galaxies have been evolving by blancing gas inflow and star formation and gas out flow. We also studied evolution of galaxy morphology; the epoch of emergence of round disk galaxies is turned out to be around at the cosmic age of 6 Gyr.

研究分野：天文学

キーワード：銀河 電波天文学 光赤外線天文学

1. 研究開始当初の背景

研究開始以前には、宇宙の初期に存在する銀河を静止系紫外線や可視光或いは赤外線で見守ることによって、銀河の星質量や星形成率の歴史を明らかにする研究が大きく発展してきた。その結果、銀河は赤方偏移 1-2 付近 (宇宙年齢 30-50 億年頃) の時代に最も激しく進化したと考えられるようになってきた。また、現在の宇宙にみられる「円盤銀河」や「楕円銀河」といった形態が発露するのもこの時代ではないかと考えられる観測的示唆も得られつつあった。このため、この時代は「銀河の激動進化期」と考えられ、そこでの銀河進化の様子を探ることが、銀河進化の理解のためには必須であると認識されつつあった。

(1) しかし、これまでの研究は星の量や星形成率の評価が主であり、星形成の材料になる分子ガスの研究は非常に難しい状況であった。星は分子ガスから誕生することを考えると、銀河における分子ガスの進化を知ることが非常に重要である。ALMA の稼動が始まり、このような新たな側面の研究が可能となってきた。

(2) また、銀河は単に星とガス (とダークマター) の集合体というだけでなく形態という特徴を有するが、形態の露の研究もまだ緒についたばかりであった。我々の先行研究で、赤方偏移 2 付近 (宇宙年齢 30 億年頃) の星形成銀河が棒状の構造を示すことを見出していたので、このような銀河が円盤銀河に進化するのかどうかという問題が身近に存在していた。

2. 研究の目的

研究の目的は大きくわけて以下の二つであった。

(1) 激動進化期における星形成銀河の分子ガス量とその割合、またこれらの量と銀河の他の量との関係を調べる。特に、既にすばる望遠鏡によって得られていた銀河のガ

ス金属量との関係を調べるのが大きな目標であった。

(2) 激動進化期とそれ以降の銀河の内部構造の進化の様子を探ること。特に、まずは形の統計解析から真の銀河形状に統計的な制限をつけること。これによって、棒状構造を示す星形成銀河がいつ頃から「丸い」円盤銀河になったのかを明らかにする。

3. 研究の方法

(1) すばる望遠鏡のファイバー多天体分光器によって赤方偏移 1.4 (宇宙年齢約 45 億年) 付近の星形成銀河のサンプルを得つつあった。これらの銀河については、その星質量、星形成率、ガス金属量等が既に得られており、各種の量の関係を調べるのに適したサンプルであった。このサンプルから代表的と考えられる星形成銀河を 20 程度選び、ALMA 望遠鏡を用いて CO 輝線観測を行い、各銀河での分子ガス量を調べた。CO 光度から分子ガス量を導出するためには、光度とガス量の比を仮定する必要がある。この比の値はガス金属量に依存すると考えられており、我々のサンプルではガス金属量が既知なので、この依存性を考慮して分子ガス量を導出できるところが特色となっていた。

(2) ハッブル宇宙望遠鏡搭載の近赤外撮像装置によって銀河サーベイが行われた領域の銀河を用いて、星形成銀河の形の統計的解析を行った。赤方偏移 2 付近から 0.5 (宇宙年齢約 86 億年) までの時代をいくつかの時代に区切って、各時代で星形成銀河をサンプルし、そのみかけの軸比の分布を調べた。もし薄くて完全に丸い円盤構造を持っているなら、みかけの軸比分布は平坦になる。そうでなければピークを持った分布を示す。また、真の形状を三軸不等な楕円体であると仮定した場合に期待されるみかけの軸比分布を計算して、これを実際に観測された分布と比較することによって、真の形状を統計的に

調べた。

4. 研究成果

(1) 赤方偏移 1.4 の時代における星形成銀河の ALMA による CO 観測では、約半数の銀河で CO 輝線を検出できた。これらの銀河については分子ガス量を出せるが、検出されなかった銀河のデータも活かすために、スペクトルの重ね合わせ(スタッキング)という手法によって、例えば銀河の星質量に対するガス質量の傾向を調べることができた。ガスの質量とその質量割合は、近傍の宇宙における星形成銀河での値より有意に大きいことが分かった。また、ガス質量割合は星質量や金属量の大きい銀河では小さいという傾向があることもわかった。ただし、星質量と金属量のどちらが主たる原因になっているかの切り分けははっきりしなかった。

採用した CO 光度と分子ガス質量の比の妥当性を力学質量を介在して調べたところ、金属量依存性を考慮しても、比の値が大きすぎる可能性があることがわかった。しかし、この検討にはまだ大きな不定性があり結論は得がたく、現在一般に妥当とされている値を用いることにした。

同時代の星形成銀河におけるガス・ダスト比も導出した。ガス・ダスト比もガス金属量に依存することが知られているが、導出された比の値は現在の宇宙の同等の金属量をもつ銀河でのガス・ダスト比とほぼ同じであることがわかった。ダスト形成進化は以前理論的に想定されていたよりも早くから進んでいた可能性が示唆されたが、まだサンプル数も少なく、今後の研究課題であると考えられる。

同時代の星形成銀河のガス金属量の測定をすばる望遠鏡の FMOS を用いて拡張した。これを用いて銀河星質量と金属量の関係やその宇宙論的進化に更に制限をつけることができた。

これらの銀河のガスの割合・金属量等の測

定量を、銀河へのガス流入・流出が考慮された銀河化学進化のモデルと比較した。その結果、ガスの流入量が、星形成で消費されるガス量とガス流出量とほぼバランスしながら進化するという描像が得られた。これはいわゆる平衡モデルと呼ばれるモデルで、銀河進化にはガスの流入と流出が重要な役割を果たしていることを示す。この手法を他の赤方偏移で得られているデータも用いて適用することで、他の時代でも平衡状態に近いことがわかり、ガス流入・流出の宇宙論的進化にも一定の制限がついた。

ALMA サーベイで CO 輝線が検出された銀河の中に、多数の分子ガスクランプを持つ銀河が発見された。これをどう解釈するか観測やデータ解析を更に進めた。CO(1-0)の観測を E-VLA (JVLA) で行ったがよいデータが得られなかった。CO(3-2)観測を野辺山 45m で行い現在解析中である。また GEMINI 望遠鏡による H 輝線の面分光も行なったが、これも良質のデータにはならなかった。現時点では、ガス円盤の重力不安定によって形成されたガスクランプが銀河中心に落ち込んでいるところを見ているのではないかと考えられるが、結論には至っていない。

2) 赤方偏移 2.5-1.4 (宇宙年齢 26 億年から 46 億年の時代)、1.4-0.85 (46 億年から 66 億年の時代)、0.85-0.50 (66 億年から 86 億年の時代) の 3 つの時代にわけて、星形成銀河の見かけの軸比分布を調べ、三軸不等楕円体モデルと比較したところ、最初の時代ではまだ棒状構造に近い構造を示しており、時代が下るにつれて丸みを帯びてきて、赤方偏移 0.85 付近になると現在の円盤銀河程度の丸さになっていたことがわかった。従って、「丸い」円盤銀河の登場は約 70 億年前ということになる。なぜ昔は棒状だったのか？丸くなってきた原因は何かといった問題は今後の研究課題であると考えられる。

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 11 件)

When did round disk galaxies form?

T.M. Takeuchi, K. Ohta, 他 2 名

Astrophysical Journal, vol. 801, p.2 (7pp)
(2015) 査読 DOI:10.1088/0004-637X/801/1/2

The Gas Inflow and Outflow Rate in
Star-Forming Galaxies at $z \sim 1.4$

K. Yabe, K. Ohta, 他 6 名 Astrophysical
Journal, vol. 798, p.45(9pp) (2015) 査読有
DOI:10.1088/0004-637X/798/1/45

ALMA Observation of 158 micron [CII]
Line and Dust Continuum of a $z=7$ Normally
Star-forming Galaxy in the Epoch of
Reionization K. Ota, F. Walter, K. Ohta,

他 16 名 Astrophysical Journal, vol.792, p.34
(13pp) (2014) 査読有
DOI:10.1088/0004-637X/792/1/34

Constraint on the gas-to-dust ratio in
massive star-forming galaxies at $z \sim 1.4$

A. Seko, K. Ohta, 他 4 名 Publ. Astron. Soc.
Japan, vol. 66, p.81(7pp) (2014) 査読有
DOI:10.1093/pasj/psu057

Two γ -ray bursts from dusty regions with
little molecular gas B. Hatsukade, K. Ohta,
他 5 名 Nature vol. 510, p.247-p.249 (2014)
査読有 DOI:10.1038/nature13325

The mass-metallicity relation at $z \sim 1.4$
revealed with Subaru/FMOS K. Yabe, K.
Ohta, 他 16 名 Mon. Not. Roy. Astron. Soc.
vol.437, p.3647-p.3663 (2014) 査読有
DOI:10.1093/mnras/stt2185

The Cosmic BPT Diagram: Confronting
Theory with Observations

L.J. Kewley, M. Christian, T. Yuan, K. Yabe,
K. Ohta, 他 2 名 Astrophysical Journal,
vol.774, L10(6pp) (2013) 査読有
DOI:10.1088/2041-8205/774/1/L10

Faint End of 1.3mm Number Counts

Revealed by ALMA B. Hatsukade, K.
Ohta, 他 3 名 Astrophysical Journal, vol.
769, L27(5pp) (2013) 査読有
DOI:10.1088/2041-8205/769/2/L27

Intrinsic Shape of Star-Forming BzK
Galaxies II: Rest-Frame UV and Optical
Structure in GOODS-South and SXDS S.
Yuma, K. Ohta, K. Yabe Astrophysical
Journal, vol. 761, p.19 (22pp) (2012) 査読
有 DOI:10.1088/0004-637X/761/1/19

Constraints on Obscured Star Formation
in Host Galaxies of Gamma Ray Bursts
B. Hatsukade, T. Hashimoto, K. Ohta,
他 3 名 Astrophysical Journal, vol.748,
p.108 (4pp) (2012) 査読有 DOI:
10.1088/0004-637X/748/2/108

NIR Spectroscopy of Star-Forming
Galaxies at $z \sim 1.4$ with Subaru/FMOS: The
Mass-Metallicity Relation K. Yabe, K.
Ohta, 他 16 名 Publ. Astron. Soc. Japan,
vol.64, p.60(19pp) (2012) 査読有 DOI:
10.1093/pasj/64.3.60
〔学会発表〕(計 18 件)

太田耕司、他 3 名 Dynamical mass から探
る遠方銀河のガス質量 日本天文学会
2015 年 3 月 20 日 大阪大学

世古明史、太田耕司、他 2 名 $z \sim 1.4$ の星
形成銀河における分子ガスの性質 日本
天文学会 2015 年 3 月 20 日 大阪大学

A. Seko, K. Ohta, 他 2 名 Properties of
molecular gas in star-forming galaxies at
 $z \sim 1.4$ revealed with ALMA Revolution in
astronomy with ALMA-The third year
2014 年 12 月 11 日 東京国際フォーラム

矢部清人、戸谷友則、舎川元成、岡田裕行、
太田耕司、他 3 名、1 チーム The
mass-metallicity relation and the
fundamental metallicity relation of
star-forming galaxies at $z \sim 1.4$ 日本天文学会
2014 年 9 月 12 日 山形大学

世古明史、太田耕司、他 3 名 $z \sim 1.4$ の星形成銀河におけるガス・ダスト比 日本天文学会 2014 年 9 月 12 日 山形大学

B. Hatsukade, K. Ohta, 他 5 名 Two γ -ray bursts from dusty regions with little molecular gas 日本天文学会 2014 年 9 月 12 日 山形大学

K. Ohta Internal structure of galaxies in the violent epoch of galaxy evolution with IFU ULTIMATE-SUBARU 2014 年 7 月 28 日 国立天文台 (三鷹)

太田耕司、他 6 名 A forming elliptical galaxy at $z=1.4$ under multi-merging? 日本天文学会 2014 年 3 月 21 日 国際基督教大学

世古明史、太田耕司、他 5 名 Molecular gas and dust in star-forming galaxies at $z \sim 1.4$ with ALMA 日本天文学会 2014 年 3 月 21 日 国際基督教大学

廿日出文洋、太田耕司、他 5 名 Optical/NIR identification of 'sub-mJy' submm sources 日本天文学会 2014 年 3 月 21 日 国際基督教大学

世古明史、太田耕司、他 4 名 $z \sim 1.4$ の星形成銀河におけるガス・ダスト比への制限 日本天文学会 2013 年 9 月 11 日 東北大学

K. Ohta Internal structure of galaxies at the violent epoch of galaxy evolution Subaru GLAO Science Workshop 2013 年 6 月 13 日 北海道大学

矢部清人、太田耕司、他 4 名と FMOS GTO チーム $z \sim 1.4$ の星形成銀河におけるガスの inflow rate と outflow rate への制限 日本天文学会 2013 年 3 月 21 日 埼玉大学

太田耕司、他 3 名 丸い円盤銀河はいつできたか? (3) 日本天文学会 2013 年 3 月 20 日 埼玉大学

竹内智恵、太田耕司、他 2 名 丸い円盤銀河はいつできたか? (2) 日本天文学会 2013 年 3 月 20 日 埼玉大学

K. Ohta Stellar mass-metallicity relation of star-forming galaxies at $z \sim 1.4$ with FMOS Korea-Japan Collaboration Workshop 2012 年 11 月 15 日 ソウル国立大学 韓国

竹内智恵、太田耕司、他 2 名 丸い円盤銀河はいつできたか? 日本天文学会 2012 年 9 月 21 日 大分大学

Yuma Suraphong、太田耕司、矢部清人 Bar-like/oval shape of sBzK galaxies at $z \sim 2$ in rest-frame UV and optical wavelength 日本天文学会 2012 年 9 月 21 日 大分大学

〔図書〕(計 0 件)
〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)
〔その他〕
ホームページ等

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2014/150309_1.html

<http://www.nao.ac.jp/news/science/2014/20140612-alma.html>

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2014/140612_1.html

http://www.kyoto-u.ac.jp/static/ja/news_data/h1/news6/2013/130531_1.htm

<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~ohta/eng>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 耕司(OHTA Kouji)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50221825

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし