

研究種目：特別研究促進費(若手B相当)

研究期間：2006～2008

課題番号：18749007

研究課題名(和文) 銀河進化における分子雲の形成・進化の研究

研究課題名(英文) A Study of Formation and Evolution of Molecular Clouds in Galaxy Evolution

研究代表者

長島 雅裕(NAGASHIMA MASAHIRO)

長崎大学・教育学部・准教授

研究者番号：20342628

研究成果の概要：

銀河の進化におけるガス(分子ガスを含む)の役割の重要性が明らかにされた。分子雲形成は、銀河スケールの現象と星スケールの現象をつなぐ中間スケールの現象として、どちらにも重要な役割を果たしていると考えられるが、その重要性が、具体的な観測事実と理論モデルとの比較を通じて、明らかにされた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300,000	0	1,300,000
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	420,000	4,020,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：星間ガス、銀河進化

## 1. 研究開始当初の背景

銀河系内の星間ガスの詳細な観測が進み、特に希薄な中性水素ガスについての知見が得られつつある状況であった。また、申請者のそれまでの研究により、希薄な中性水素ガス雲の蒸発過程についての詳細が調べられ、銀河系円盤の物理的環境における中性水素ガス雲の進化について、より詳細な研究が開かれる展望が生じてきた。

そこで、本研究では、中性水素ガス雲の進化についてのより詳細な研究というミクロの視点と、銀河進化における中性水素ガスの役割というマクロの視点の二つから、両者の相互作用を解明しようとしたものであった。

## 2. 研究の目的

蒸発のより詳細な過程を解明するために、(1)ガス雲の自己重力の効果を考慮する、(2)ガス雲の球対称からのズレを考慮する、ことを目的とした。さらに、これらから得られた知見を、(3)申請者が開発してきた銀河形成モデルに反映させることを念頭に置いた。

これらを通じて、銀河の進化を、通常之星からの視点ではなくガスという視点から理解することが展望された。

## 3. 研究の方法

数値計算及び安定性解析による。

球対称雲の蒸発過程については、動径方向

のみについて、熱伝導と自己重力を考慮してダイナミクスを解く。球対称からのズレの効果に関しては、界面の安定性についての線型解析を行う。銀河形成モデルへの取り込みについては、ガス雲の状況を考慮した簡単なモデルを作り、サブルーチン的にモデルに導入する。モデル自体は一種のモンテカルロシミュレーションであり、多数の銀河を宇宙の初期密度揺らぎの分布とその自己重力成長に基づいたダークマターハローの進化に従って形成過程を追う。

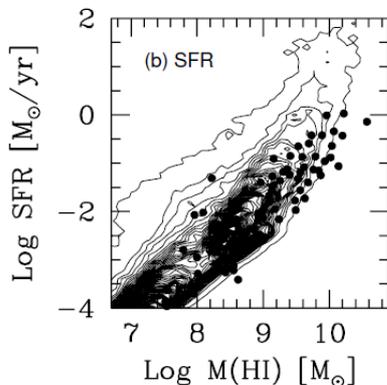
#### 4. 研究成果

内外の研究動向の変化に応じて、銀河形成モデルの改良を施すところを優先的に行った。以下において、研究成果としてなんらかの媒体に発表されたもののうち、主要なものを述べる。

(1) ガスが本質的に重要な影響を及ぼす観測量はいくつかあると考えられるが、ガス質量と他の物理量との相関を見ることで、銀河進化におけるガスの役割について理解を深めることができる。

下に示すのは、論文(3)に掲載しているもので、銀河の中性水素(HI)ガスと、その銀河における星形成率との相関を見たものである。黒丸は観測データ、等高線がモデルの結果である。最近の観測により、このような相関があることが示唆されはじめてきたが、我々のモデルは、このタイトな相関を良く再現していることがわかった。

現在使用しているモデルでは、星形成プロセスは銀河全体で平均した量をモデル化した単純なものであるが、これは、マイクロな視点(小さい中性水素雲や分子雲の形成過程)から銀河進化を眺めた場合、どのような境界条件が課されなければならないかを示す重要な結果である。



(2) 次に、上に示したようにガスと星形成率には密接な関係があるが、ガス質量についてのデータは星についての観測ほどには豊富

にあるわけではない。そこで、星質量(あるいは光度)と星形成率の関係を調べることは、観測データからガスの果たす役割を理解する上で重要である。

下に示す図は、論文(6)からのものである。横軸に銀河の星質量、縦軸に比星形成率(星形成率を星質量で割ったもの)の平均をとっている。シンボルが観測データ、破線が我々のモデルである。他の線は、他のモデルである。

これを見るとわかるように、我々のモデルは観測データを最も良く再現している。なお、この比星形成率が星質量が増大するとともに低下する傾向は、その理解が待たれているところであるが、ガス質量の進化が鍵を握っていることはわかっており、我々のモデルを軸に分析を深めていくことで、銀河進化におけるガスの役割を理解できると期待される。

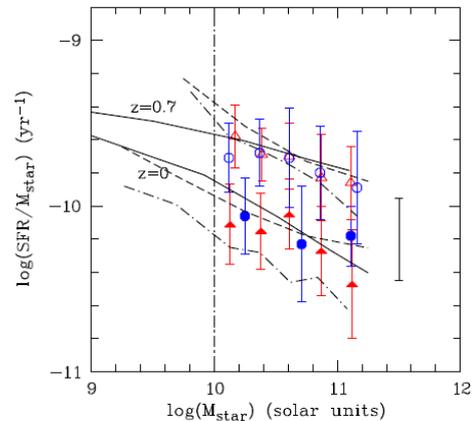


Fig. 8. Predictions of the Millennium model at  $z = 0.7$  and  $z = 0$  (dot dashed lines) and of the numerical catalog of Nagashima et al. (2005) (dashed lines). All the other lines and symbols are the same as in Fig. 7. The mean error bar ( $1\sigma$ ) is indicated on the right side of the panel.

(3) 宇宙初期における天体として、近年、ライマン $\alpha$ 輝線天体とよばれるものが脚光を浴びている。これは、中性水素が放出するライマン $\alpha$ 輝線で明るく輝く天体であり、おそらく宇宙初期における銀河であると考えられている。

ライマン $\alpha$ 輝線を出すプロセスはいくつか考えられるが、我々は、そのうち有望であるものの一つ、活発に星形成をしている銀河において、若い星からの紫外線をその銀河に含まれる中性水素ガスが吸収し、ライマン $\alpha$ 輝線として放出する、という状況を設定し、我々の銀河形成モデルに導入して計算を行い観測データと比較した(論文9)。

下図に示すように、我々のモデル(太線)は異なる時刻(赤方偏移  $z$ )におけるライマン $\alpha$ 光度関数を良く再現している。一方、過去のモデルで仮定されていた簡単なモデル(点線)は、大きくずれていることがわかる。

これは、星形成率が正しく解かれているこ

と、ガスの量が正しく計算されていること、ライマン $\alpha$ 輝線放出のメカニズムが大枠で正しいこと、を強く示唆する結果であり、現在及び現在に近い低赤方偏移での結果だけでなく、高赤方偏移宇宙においても我々の銀河形成モデルが正しいことを示唆している。これらより、ガスの進化、及びそこからの分子雲形成・星形成へと連なる一連の流れを解明する重要な手掛かりが得られたと考えられる。

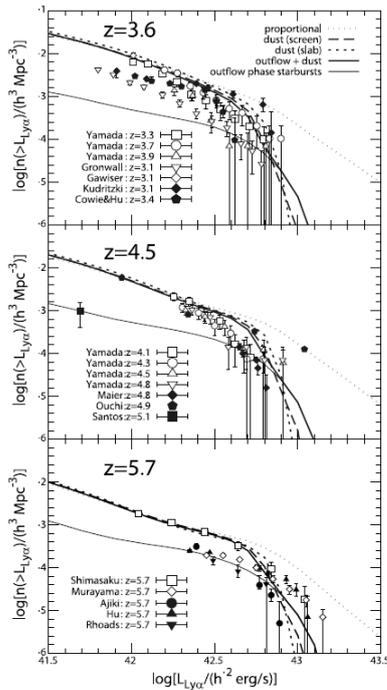
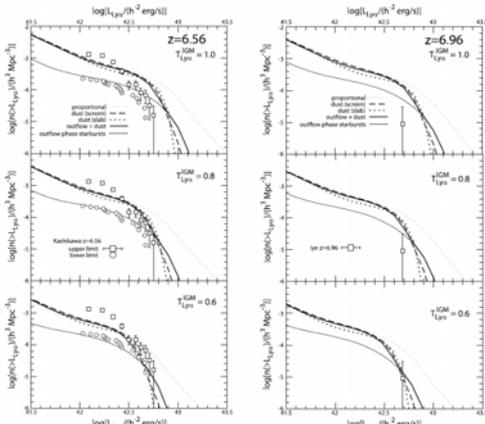


FIG. 3.— Evolution of the cumulative Ly $\alpha$  LFs with redshift at  $z \leq 6$ . The curves show the model results, while the symbols with error bars are the observational data. The four different models for  $f_{d,2}^{Ly\alpha}$ , i.e., simply proportional, dust (screen), dust (slab), and outflow+dust, are shown (see the top panel for the line styles). The thin solid lines are the contribution from starbursts in the outflow phase in the outflow+dust model. The references for the data points not given in Fig. 2 are Yamada et al. (2005), Gronwall et al. (2007), Gawiser et al. (2006), Kudritzki et al. (2000), Cowie & Hu (1998), Maier et al. (2003), Ouchi et al. (2003), and Santos et al. (2004). [See the electronic edition of the Journal for a color version of this figure.]

さらに、この結果は、宇宙の再電離の時期を決定することにも応用が可能である。下に示すように、宇宙全体の透過度が  $z > 6$  でも 1 である (透明である) とすると、観測値を上回ってしまうのに対し、0.6 程度であるとすると、観測データをうまく説明できる。これは、宇宙の再電離が、 $z > 6$  付近で起こったことを



示唆する結果である。

## 5. 主な論文等

(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 14 件)

(1) Ueda, Haruhiko; Nagashima, Masahiro; & Yahagi, Hideki, "Analysis of Spatial Distribution of Galaxies in Numerical Galaxy Catalog", Publications of the Astronomical Society of Japan, 61, 85-95, 2009, 査読有

(2) Nagashima, Masahiro; & Okamoto, Takashi, "Chemical Abundance Patterns in the Local Dwarf Galaxies in the CDM Universe", ASP Conference Series, Vol. 399, 475, 2008, 査読無

(3) Okoshi, Katsuya; Nagashima, Masahiro; Gouda, Naoteru; & Minowa, Yosuke, "H I-Selected Galaxies as a Probe of Galactic Disks", ASP Conference Series, Vol. 396, 489, 2008, 査読無

(4) Koyama, Hiroko; Nagashima, Masahiro; Kakehata, Takayuki; Yoshii, Yuzuru, "Dynamical response to supernova-induced gas removal in spiral galaxies with dark matter halo", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 389, 237-249, 2008, 査読有  
<http://naosite.lb.nagasaki-u.ac.jp/dspace/handle/10069/21507>

(5) Bekki, Kenji; Yahagi, Hideki; Nagashima, Masahiro; & Forbes, Duncan A., "The origin of globular cluster systems from cosmological simulations", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 387, 1131-1148, 2008, 査読有

(6) Buat, V.; Boissier, S.; Burgarella, D.; Takeuchi, T. T.; Le Floch, E.; Marcillac, D.; Huang, J.; Nagashima, M.; Enoki, M., "Star formation history of galaxies from  $z = 0$  to  $z = 0.7$ . A backward approach to the evolution of star-forming galaxies", Astronomy and Astrophysics, 483, 107-119, 2008, 査読有

(7) Ota, Kazuaki; Iye, Masanori; Kashikawa, Nobunari; Shimasaku, Kazuhiro; Kobayashi, Masakazu; Totani, Tomonori; Nagashima, Masahiro;

Morokuma, Tomoki; Furusawa, Hisanori; Hattori, Takashi; Matsuda, Yuichi; Hashimoto, Tetsuya; Ouchi, Masami, "Reionization and Galaxy Evolution Probed by  $z = 7$  Ly $\alpha$  Emitters", The Astrophysical Journal, 677, 12-26, 2008, 査読有

(8) Nagashima, Masahiro; Koyama, Hiroshi; Inutsuka, Shu-ichiro, "Evaporation of Tiny HI Clouds: Possible Probes of Physical State of the Galactic Gas Disk", Astrophysics and Space Science Proceedings, Volume . ISBN 978-0-387-72767-7., p.360, 2008, 査読無

(9) Kobayashi, Masakazu A. R.; Totani, Tomonori; Nagashima, Masahiro, "Ly $\alpha$  Emitters in Hierarchical Galaxy Formation", The Astrophysical Journal, 670, 919-927, 査読有

(10) Bekki, Kenji; Yahagi, Hideki; Nagashima, Masahiro; Forbes, Duncan A., "Formation of the Galactic globular clusters with He-rich stars in low-mass haloes virialized at high redshift", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 382, L87-L91, 2007, 査読有

(11) Ota, K.; Iye, M.; Kashikawa, N.; Shimasaku, K.; Kobayashi, M.; Totani, T.; Nagashima, M.; Morokuma, T.; Furusawa, H.; Hattori, T.; Matsuda, Y.; Hashimoto, T.; Ouchi, M., "The reionization and galaxy evolution probed by  $z=7$  Ly $\alpha$  emitters", Il Nuovo Cimento B, vol. 122, Issue 9, p.1015-1019, 2007, 査読無

(12) Nagashima, Masahiro; Inutsuka, Shu-ichiro; & Koyama, Hiroshi, "Evaporation Timescales of HI Clouds", ASP Conference Series, Vol. 365, 121, 2007, 査読無

(13) Enoki, M.; Nagashima, M., "The Effect of Orbital Eccentricity on Gravitational Wave Background Radiation from Supermassive Black Hole Binaries", Progress of Theoretical Physics, 117, 241-256, 2007, 査読有

(14) Nagashima, Masahiro; Inutsuka, Shu-ichiro; Koyama, Hiroshi, "How Long Can Tiny H I Clouds Survive?", The Astrophysical Journal, 652, L41-L44, 2006, 査読有

[学会発表] (計 13 件)

(1) 大越克也, " 補償光学装置を用いた A 母銀河検出の可能性", 日本天文学会, 2009 年 3 月 27 日

(2) 矢作日出樹, " 準解析的銀河形成モデルにおけるパラメータ自動最適化", 日本天文学会, 2009 年 3 月 26 日

(3) 小林正和, " 高赤方偏移 Lyman  $\alpha$  Emitters の観測データと理論モデルの比較", 日本天文学会, 2009 年 3 月 26 日

(4) 小山博子, " Tully-Fisher 関係における超新星フィードバックに伴う力学応答の効果 II", 日本天文学会, 2008 年 9 月 12 日

(5) 長島雅裕, " 数値銀河カタログにおける星質量の進化と星形成史の解析", 日本天文学会, 2008 年 9 月 11 日

(6) 長島雅裕, " Sub-DLA system の起源と進化", 日本天文学会, 2008 年 3 月 27 日

(7) 小林正和, " Lyman  $\alpha$  Emitters --- 観測データと理論モデルとの比較", 日本天文学会, 2008 年 3 月 27 日

(8) 長島雅裕, " CDM 宇宙における矮小銀河の化学組成比", 日本天文学会, 2007 年 9 月 27 日

(9) 太田一陽, " ライマン  $\alpha$  輝線銀河の光度関数で探る銀河進化と宇宙再電離", 日本天文学会, 2007 年 9 月 26 日

(10) 小林正和, " 階層的構造形成における Lyman Alpha Emitter の理論モデルの構築", 日本天文学会, 2007 年 9 月 26 日

(11) 大越克也, " 近傍中性水素雲とクエーサー吸収線系", 日本天文学会, 2006 年 9 月 21 日

(12) 長島雅裕, " 準解析的銀河形成モデルによる楕円銀河の Line Indices の直接計算", 日本天文学会, 2006 年 9 月 21 日

(13) 小林正和, " Lyman  $\alpha$  Emitters とは何か?: 階層的構造形成における理論モデルの構築", 日本天文学会, 2006 年 9 月 20 日

〔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

<http://astro.edu.nagasaki-u.ac.jp/~masa/index-j.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長島 雅裕 (NAGASHIMA MASAHIRO)

長崎大学・教育学部・准教授

研究者番号：20342628

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし