

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：32613

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800114

研究課題名(和文) 銀河の星・ガス相バランスの定式化

研究課題名(英文) Formulation of gas-star balance in galaxies

研究代表者

小麥 真也 (Komugi, Shinya)

工学院大学・公立大学の部局等・准教授

研究者番号：90548934

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：銀河における星形成は個別の分子雲の内部または周辺で進行するが、どのような要素が星形成をトリガーし、進行を決定づけるかは未だ不明である。本研究では、近傍銀河において個別の分子雲の物理状態を表現する物理量をパラメータ化し、多変数解析の手法を用いて星形成の定式化を行うことを目的とした。近傍銀河M33及びNGC300に対して大規模な観測を電波から光赤外波長域に渡って行い、100以上の分子雲を対象として主成分解析を行った結果、分子雲における星形成は6つの変数(星形成率、星質量、ダスト密度、低密度ガス質量、高密度ガス質量、年齢)が3つの変数間の関係2つに集約され、2つの「基本平面」をなす事がわかった。

研究成果の概要(英文)：Star formation in galaxies proceed in and around discrete molecular clouds. It has not been known what physical parameters are responsible for triggering and driving star formation. This study aims at parameterizing physical quantities related to star formation, and finding the "equations" which rule the procession of star formation, via a multi-variable analysis. We obtained multi-wavelength datasets for ~100 molecular clouds in nearby galaxies, each with information on the star formation rate, stellar mass, dust density, low-density molecular gas mass, high-density molecular gas mass, and the age of the molecular clouds. Using these six parameters and applying a principal component analysis, we reduce the 6 quantities into two sets of relations each with six variables. These comprise two fundamental "planes", which express the bounding relations that molecular clouds must fulfill.

研究分野：銀河天文学

キーワード：星形成 電波観測

1. 研究開始当初の背景

(1) 銀河における星の形成は、個別の分子雲を舞台として進行する。星形成の現場としての分子雲は同時に星の材料である水素を提供するが、その周辺環境によって星形成の進行が影響を受けることはこれまで知られていた。例を挙げるとすれば、衝撃波を受けているような領域では大質量星が効率よく形成され(または分子雲が破壊されて星形成が阻害され)、また金属量の低い領域では初期質量関数が異なる可能性がある、などである。このような星形成は、大きさが数 10 パーセク程度の局所的な現象である。

(2) 一方で、数キロパーセク程度以上の銀河スケールでは、星形成はガス量を唯一の変数とした冪乗の関係が 1980 年代より知られている。これは SK 則と呼ばれ、永らく理論シミュレーションの入力として、あるいは再現すべき現象として重要な位置を占めてきた。

(3) しかし理論シミュレーションの空間分解能が向上し、様々な物理状態(低い温度や高いガス密度)や物理過程が入力されるようになるにつれ、上記の数キロパーセクでしか成立せず、またガス密度にしか依存しない SK 則は不足するようになってきた。より高精度な星形成の定式化が求められている。

2. 研究の目的

(1) 分子雲周辺の環境を表現する多くの物理変数のうち、星形成と星間ガスの関係をよく記述するものを特定し、それらの間の関係を定式化すること。これは、従来の SK 則を分子雲の空間スケールでも適用できるように多変数化することに対応する。

(2) また、上記で得られる多変数星形成則を利用することで、星形成の進行プロセスや銀河の進化に関して物理的な示唆を得る。

3. 研究の方法

(1) データ取得

近傍の銀河において個別の星形成領域を分解できる 10 パーセク程度の分解能を確保しつつ、星形成に関係すると目される物理状態の指標をカタログ化する。本研究において利用した変数及びその示標は、次のものである。

低密度低温の分子ガス: CO(J=1-0)輝線

高密度高温の分子ガス: CO(J=3-2)輝線

星質量: 近赤外 2.2 $\mu$ m 狭帯域イメージ

星間塵: 1.1mm ダスト連続波

星形成率: 中間赤外線 24 $\mu$ m 及び水素電離輝線 H $\alpha$ 、Pa

金属量: 可視分光を基にした金属量 [O/H]

から得られる分子雲の速度幅など

学情報

さらにこれらに加えて、分子雲に付随する星団の形態から示唆される分子雲の進化段階 (Miura et al. 2012) を年齢の示標として利用する。

上記に示した示標について、研究の第一段階として最近傍の渦状銀河 M33 を対象とした

データ取得及び整理を行い、この銀河において成立する多変数星形成則を特定した。その上で第二段階として、M33 に対して得られた結果が一般的なものかを確認するために M33 に特徴のよく似た近傍の渦状銀河、NGC300 を選定して同様のデータ収集・解析を行った。

(2) 解析方法

得られたデータは分子雲ごとに各状態変数がカタログ化されたものである。これらの変数間に成立する関係を探るために主成分解析を適用した。主成分解析により得られる主成分(PC-1)は、その軸に沿ってデータの分散が最大化されるように選ばれる。逆に最も分散の小さい主成分(PC-N)はその軸に沿ってデータが狭い範囲に分布しており、データが満たす関係式を直接表していると解釈できる。この関係式が、本研究において求めるものである。

4. 研究成果

(1) M33 における多変数星形成則

近傍銀河 M33 に対して主成分解析の結果得られた多変数星形成則では、星形成率-高密度ガス-低密度ガスの 3 変数からなるべき乗関数によって表現される平面 1 及び、星形成率-ダスト密度-星質量の 3 変数からなるべき乗関数によって表現される平面 2 が存在する。これらのうち平面 1 を二次元に投影した場合には従来の SK 則が再現される。高密度ガスという新たな変数を追加し、三次元に拡張することで、これまでの SK 則と比較して平面からのデータのばらつきが 2 桁程度から 0.1 桁まで減少した (図 1)。

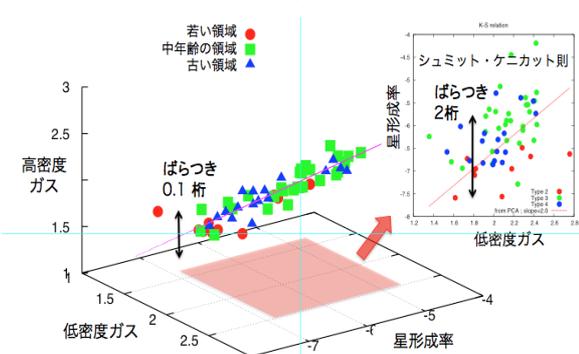


図 1: M33 の多変数星形成則 (平面 1)

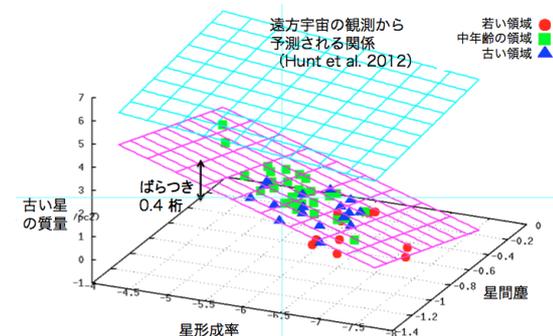


図 2: M33 の多変数星形成則 (平面 2)

さらに平面 2 はこれまで知られていなかったものであり、ばらつきが 0.4 桁程度と強い相関を持つ。この中でも星形成率-ダスト密度の関係は 2 変数間の関係としては従来このスケールで知られていた中で最も相関が強く、ダストが CO よりも分子ガスをよりトレースしている可能性を示唆している (図 2)。

#### (2) NGC300 の低密度ガス

M33 で得られた初期成果をより拡張し一般の銀河に適用できるような定式化を行うため、他の銀河においても 3 (1) でリストしたような変数の取得を行った。3 (1) の低密度ガスに関してはオーストラリア MOPRA 望遠鏡にて大規模なサーベイを行った。しかし、望遠鏡の構造上生じる定在波の影響が顕著に現れ、弱い輝線を広い範囲で検出することは困難であった。図 3 に得られた一酸化炭素スペクトルの例を示す。

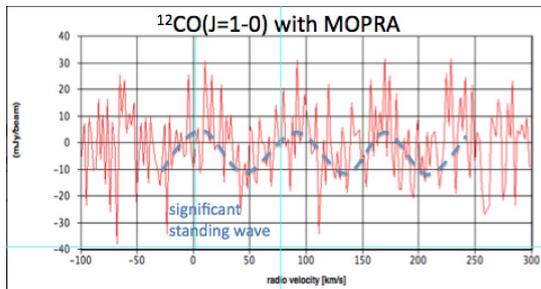


図 3 : MOPRA による CO(J=1-0) スペクトル

そこで本研究では、APEX 望遠鏡にて得られた CO(J=2-1) 輝線 (Faesi et al. 2014) を用いて低密度ガスの指標とすることにした。この輝線は目標としていた CO(J=1-0) よりも密度の高い領域から発せられると考えられるが、分布は CO(J=1-0) と良く似ており、また強度の比もほぼ一定であることが指摘されている。

#### (3) NGC300 の高密度ガス

3 (1) の高密度ガスをトレースする CO(J=3-2) 輝線の観測は、CO(J=2-1) 輝線が検出されている 42 の領域を対象として ASTE 望遠鏡にて実行した。結果として 80% 程度の高い検出率を達成した。得られたスペクトルの例を図 4 に示す。

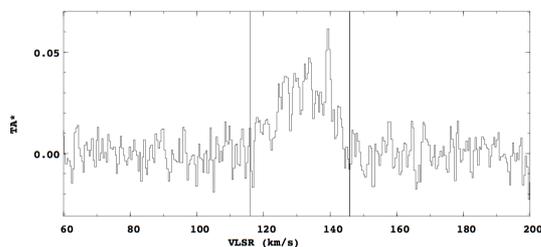
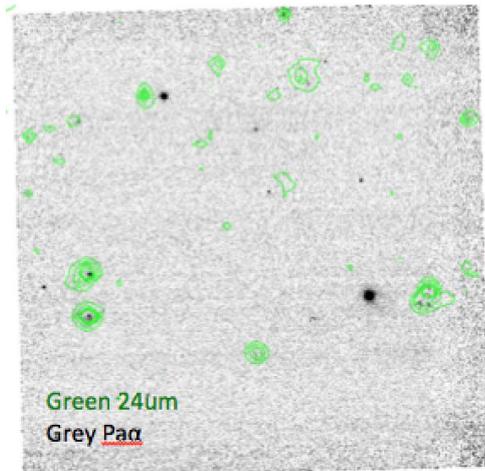


図 4 : ASTE による CO(J=3-2) スペクトルの例

#### (4) NGC300 の星形成率

3 (1) 星形成率の導出には幾つかの手法があるが、本研究で目標としたのは星間塵による吸収の少ない近赤外波長域での水素の電

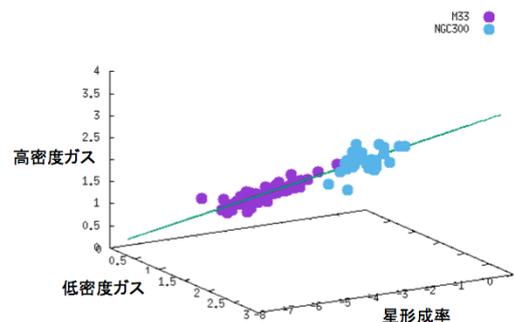
離輝線 Pa の撮像観測である。東京大学 miniTAO 望遠鏡において地上からの狭帯域 Pa 観測を行ったが、天候悪化及び観測装置の不具合により当初の目標感度・面積に達することはできなかった。図 5 に miniTAO での撮像観測の結果を示す。そこで、星間塵による熱放射である中間赤外線 (24 μm) データを用いて水素の電離輝線 H を補正する方法を用



いて星形成率の導出を行った。  
図 5 : NGC300 の Pa 輝線撮像

#### (5) NGC300 の多変数星形成則と M33

3 (1) の星質量は Faesi et al. (2013) によりカタログ化されておりこれが利用できる。一方で、星間塵に関しては本銀河では取得されていない。中間赤外線では星間塵の熱放射は主に星形成活動を反映しており、質量への依存は小さい。星間塵質量の導出にはより長波長での低温塵を観測する必要があるが、必要となる感度の深さから、観測には至っていない。ただし、M33 で発見された平面 1 の検証は NGC300 ですでに可能である。4 (2)-(4) で得られたデータと 3 (2) の手法を用い流と、星形成率-高密度ガス-低密度ガスの 3 変数ではやはり平面をなすことがわかった。さらにこの平面は M33 と同じものであり (図 6 参



照) ユニバーサルである可能性が高い。  
図 6 : NGC300 及び M33 に共通した星形成率-低密度ガス-高密度ガスからなる「平面 1」紫が NGC300、青が M33 の星形成領域。平面を真横から見ている。

<引用文献>

Miura Rie, et al., "Giant Molecular Cloud Evolutions in the Nearby Spiral Galaxy M33", *Astrophysical Journal*, 761, 37, 2012

Christopher Faesi, et al., "Molecular Cloud-scale Star Formation in NGC300", *Astrophysical Journal*, 789, 81, 2014

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5件)

K. Tateuchi, et al. (著者36名、S. Komugi 15番目), "Ground-based Pa Narrow-band Imaging of Local Luminous Infrared Galaxies. I. Star Formation Rates and Surface Densities", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 217, pp. 1-26, 2015、査読有

L., Guilin, C., Daniela, et al. (著者8名、S. Komugi 6番目), "The Pa-alpha Luminosity Function of HII Regions in Nearby Galaxies from HST/NICMOS", *The Astrophysical Journal Letters*, 772, 2013, pp. 1-27、査読有

S. Komugi, K. Tateuchi, et al. (著者8名), "The Schmidt-Kennicutt Law of Matched Age Star Forming Regions", *Proceedings of the IAU*, 292, 2013, pp. 331-331、査読無

S. Komugi, R. Miura, et al. (著者5名), "Fundamental Planes of the Interstellar Medium", *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 476, 2013, pp. 57、査読無

S. Onodera, N. Kuno, et al. (著者11名中 S. Komugi 9番目), "NRO M33 All-disk Survey of Giant Molecular Clouds (NRO MAGiC): Properties of Giant Molecular Clouds in M33", *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 476, 2013, pp. 303、査読無

[学会発表](計7件)

T. Yamashita, S. Komugi et al. (著者11名), "The Nobeyama 45m 12CO(J=1-0) Survey of Local Luminous Infrared Galaxies", *IAU General Assembly*, 2015年8月3日~14日、ホノルル(米国)

T. Saito, et al. (著者15名、S. Komugi 9番目), "Molecular Gas Excitation and Chemistry in Nearby LIRGs with ALMA", *IAU General Assembly*, 2015年8月3日~14日、ホノルル(米国)

S. Komugi, "Confirmation of the ISM

Fundamental Plane", *ALMA high-z nearby galaxy workshop*, 2014年10月20日、東京都三鷹市

S. Komugi, "Development of the Multi-parameter Star Formation Law", *日本天文学会2014年度秋季年会*, 2014年9月11日、山形県山形市

小麥真也, 「MOPRAによるNGC300の広域サーベイ」, *国立天文台野辺山ユーザーズミーティング*, 2014年7月22日、長野県南佐久郡南牧村

S. Komugi, "Fundamental Relations of the ISM and Star Formation at Giant Molecular Cloud Scales", *East Asia ALMA Workshop*, 2014年6月15日、Jeju (S. Korea)

S. Komugi, 「GEISHAプロジェクト: SWIMSとALMAでつなぐ系内外の星形成の統計的研究」, *SWIMS Science Workshop*, 2013年8月5日、東京都三鷹市

[その他]

ホームページ等

<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1061/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小麥 真也 (KOMUGI, Shinya)

工学院大学・基礎教養教育部門・准教授

研究者番号: 90548934