

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04015

研究課題名（和文）大規模データアーカイブに立脚した多変数星形成則の構築

研究課題名（英文）Building a multi-parameter star formation law based on large data archives

研究代表者

小麥 真也（Komugi, Shinya）

工学院大学・教育推進機構（公私立大学の部局等）・准教授

研究者番号：90548934

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の主目的である多変数からなる星形成則の構築に関連して、星形成に影響を与える多くの現象について個別の、および統計的な観測研究を推し進めた。早期型銀河ケンタウルスAについて行った20パーセク分解能での分子雲探査の結果から、活動銀河核が母銀河のガスに与える影響の調査を開始し、広がったミリ波自由自由放射による拡散電離輝線領域（EELR）の電波対応構造の発見という大きな成果を得た。その他の活動銀河核や低金属量天体、衝突銀河に対するガス探査も推し進めた。さらに、ガス観測に利用されるCO輝線のトレースしている密度/温度などの物理環境を系統的に探査するALMA-FACTS計画につなげることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分子ガスから星を形成する際に観測される経験則としてはKS則のような冪乗の相関が代表的であるが、本研究を通して母体となる分子ガスの量だけでなく、その速度分散や加熱源としての活動銀河核が影響している系がある事がわかった。衝突銀河の系で潮汐腕のような構造でもガス量から星形成を完全に予測することはできず、今後、潮汐力が分子雲の局所的物理状態にどう影響しているか調査をするための動機を与えた。さらに金属量やガスの体積密度・温度もCO輝線比の変動を通して分子ガスの定量化の際に大きく影響を及ぼしている事が判明した。今後の銀河進化数値シミュレーションや大規模な観測的調査の動向を左右する可能性のある成果である。

研究成果の概要（英文）：Numerous case and statistical studies were carried out regarding the various conditions affecting the formation of stars in galaxies.

Twenty parsec resolution survey of the Centaurus A galaxy revealed that molecular clouds are likely to be affected by the central AGN in the circumnuclear disk. This led to several studies of environments where AGN and the host galaxy ISM interact. In particular, ALMA observation of the nearby radio-loud QSO 3C273 revealed for the first time an extended millimeter continuum structure that was cospatial with the Extended Emission Line Region, indicating gas ionized directly by the central AGN. CO search towards a low metallicity galaxies, tidal tails in interacting galaxies, was conducted also. These lead to the ALMA-FACTS project, where we will systematically survey the density and temperature of gas as a function of galactic structures.

研究分野：電波天文学

キーワード：銀河進化 星形成

1. 研究開始当初の背景

(1) 星形成則に関する研究の変遷

銀河の中において、星と星間物質は互いに転移する異なる相として捉える事ができる。星間物質中の水素分子ガスから形成された星は様々な質量で構成されるが、小質量のものは寿命が100億年程度と長く、銀河の力学ポテンシャルに寄与する。大質量の星は内部で水素より重たい元素(金属)を合成し、1000万年程度のタイムスケールで星間空間に水素ガスと重元素を放出して星間物質の相に戻る。これらの相転移は銀河内で個別の分子雲(100パーセク程度)の空間スケール毎に非一様に同時並行して進むが、より大局的(1キロパーセク以上)には

$$\text{星形成率} \propto \text{ガス密度}^{1.4} \dots (1)$$

という量的関係(星形成則)を保っている事が知られている(Schmidt et al. 1959, Kennicutt et al. 1998)。いわば、多数の分子雲を平均すればある平衡状態が達成されているということである。上記の(1)式はKS則と呼ばれ、銀河研究に広範な影響を及ぼしてきた。特に銀河進化の理論シミュレーションにおいては、星形成の結果としてKS則を再現できるかどうか理論を試す一つの方法として定着している。また、ガスから星へ置き換える際にKS則を仮定するといった利用も多い。一方で(1)式はそのシンプルな形式のため、2000年以降は多くの理論によってKS則を再現可能になってしまい、その試金石としての役割が薄まっている。理論シミュレーションの空間分解能が上がり、個別の分子雲単位で低温のガスまで計算できるようになった現在、よりリジッドな形式の星形成則が求められている。

KS則における比例定数やNは観測的に決定されるが、どの空間スケールで平均したか(そして結果的にどの程度の時間で平均したか)によって値が変化してしまうため、その値から物理的な意味を推測することは困難である。しかし2010年に報告者らのグループによって近傍銀河M33の個別の分子雲の広域観測が行われ、300パーセク程度の空間スケールまで分解すると(1)で表される相関は崩壊し、有意に分散が大きくなる事が判明した(Onodera et al. 2010)。分子雲それぞれの性質や環境が星の形成に与える影響が顕在化し、1変数からなる単純な形式が保てなくなると推測された。その後、報告者は星形成領域の年齢が同じ分子雲だけからなる集団では(1)の形式が成立し続けているケースを発見し(Komugi et al. 2012)、分子雲の年齢が上記の「分子雲それぞれの性質」の1つに該当することがわかった。つまり、分子雲の性質や環境を適切に変数化することができれば、それらを使って(1)を拡張することが可能なはずである。本研究は(1)を拡張して多変数化し、銀河における星形成と星間物質の量の間で成立する一般的な関数系を得ることを目的とした。

(2) 本研究に先立つ報告者の事前研究

多変数星形成則を構築するには、銀河の中で個別の分子雲を分解する空間分解能で、分子雲や星間空間の性質を多く列挙し、その中から重要な性質を選び出す作業が必要となる。報告者はM33銀河において星間塵(ダスト)の広域高分解能観測を実施し、Onodera et al. 2010においてカタログ化された分子雲についてダストの質量とその温度を導出した(Komugi et al. 2011)。さらに、同じくM33銀河で高密度・高温のガスを観測し、分子雲と星団の付随形態から各星形成領域の進化段階(年齢)を推定した研究協力者の結果(Miura et al. 2012)と組み合わせた。これにより我々に最も近い銀河の一つであるM33において分子雲毎にその性質(低温低密度のガス質量、高温高密度のガス質量、ダスト質量、星形成率、星質量)を当時判明しうる限りに列挙したカタログを構築した。主成分解析を用いてこれらから重要な変数のみを選出し、M33におけるケーススタディとしての多変数星形成則を導出した(Komugi et al. 2018)。

$$\text{星形成率} \propto \text{ダスト質量}^2 \text{星質量}^{0.5} \text{高密度ガス} \text{低密度ガス}^{0.9} \text{星形成率}^{0.1} \dots (2)$$

これらは分子雲の進化段階に関わらず満たされる関数系であった。分子雲のサンプル数としては70余りであり、あくまでM33という一つの銀河に対するケーススタディではあるが、一般に成立する多変数星形成則の構築に向けて先鞭をつけるものであったと言える。

2. 研究の目的

(1) 多変数星形成則の構築

個別の星形成領域に存在する分子雲の性質や周辺の星間空間の性質を表す量の間で成立する一般的な関数系を記述することを目的とした。近年の理論分野における銀河の数値シミュレーションでは、ガス質量が 10^6 太陽質量程度の分子雲まで分解できるようになっている。これらは一般的には100パーセク程度の大きさを持つが、このスケールでは従来のKS則上では分散が大きく、星形成率との相関は存在しない。しかし、その位置での局所的な量(次項で記述)の間で一般的に成立する関係があれば、数値シミュレーションで再現する結果(あるいは入力として)KS則では可能でなかった強い制限を与える事ができる。前項で示された、M33における多変数星形成則が銀河において一般的に成立するかを確認し、必要であれば拡張する(図1)。一般的星形成則の構築には他の銀河も含めて分子雲のサンプル数を増やす必要がある。

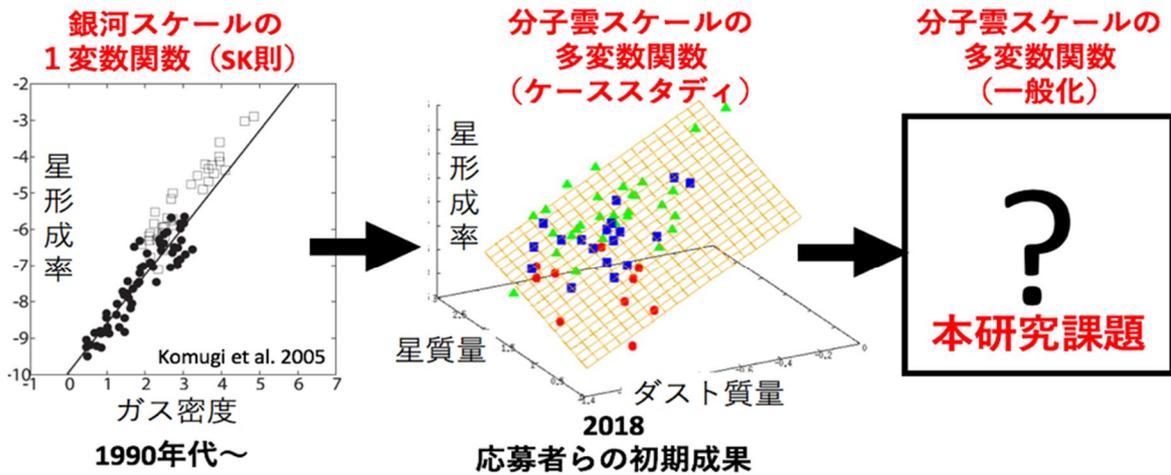


図 1 : 「星形成則」の変遷

(2)星の形成にとって重要な変数は何か

報告者のこれまでの研究から、M33 における星形成に強く相関するのはこれまで KS 則で想定されていたガス質量ではなく、ダスト質量およびその位置での星質量であった。水素分子ガスは一酸化炭素 CO の低回転励起輝線 ($J=1-0$) でトレースされる低密度 ($10^2/\text{cc}$)・低温 (10K 程度) のものと中回転励起輝線 ($J=3-2$) でトレースされる高密度 ($10^3/\text{cc}$)・高温 (30K 程度) の 2 つに分割したが、それらのガス指標と星形成率は弱い相関を持つのみであった。星形成には、他の物理指標も関係することが多くの研究から判明している。例えば、水素より重い重元素(金属量)はガスの冷却効率を律速し、また CO 輝線から水素分子ガス量への変換係数とも相関があることが知られている。ガスの速度分散は重力不安定による星形成を妨げることが予想される。M33 のケーススタディからは、分子雲は 10^6 年程度の時間スケールで付随する星間物質の量や星形成の激しさを変化させることがわかっている。したがって、分子雲の進化段階(あるいは付随する星団の年齢)も重要な変数となることが予想される。

3. 研究の方法

(1)カタログ化

研究の初期段階 (2020~2021) では、当初の計画通り ALMA 望遠鏡のデータアーカイブを用いて近傍銀河 M100, Centaurus A 銀河の CO 輝線データを解析し、分子雲カタログの作成を進めた。一方で、欧州の PHANGS プロジェクトが同様に分子雲カタログ作成を進めており、2021 年に近傍銀河 90 個に対する分子雲 5000 個のカタログを出版した (Leroy et al. 2021)。本研究ではこのカタログを利用することで研究の効率化を図った。PHANGS は CO で検出された分子雲のみを対象としており、個々の分子雲に付随した星形成やダストについては本グループで扱う必要があった。報告者は ALMA アーカイブの PHANGS 銀河の再解析を試みたが、観測の感度不足により個別の分子雲におけるダストは検出されなかった。その後、100pc 程度の分解能で銀河のダスト検出を目指すため ALMA の観測提案を行ったが、採択にはいっていない。空間分解能はより低い、遠赤外線衛星ハーシェルのデータを用いたダストによる進展を図っている。

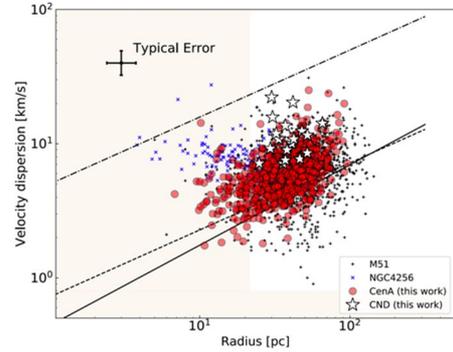
(2)新変数の探索

星形成は 100 パーセク程度の領域内で起きる局所的な現象であるため、星形成に真に関係する量を選び出す事ができれば、銀河の大局的な性質によらない関係となるはずである。個別の分子雲で星形成に関与する物理量はガスの質量や速度分散以外にもあることが期待されるが、新規の物理変数を探索するには extreme な星形成環境で何が星形成を駆動しているか見る事が最適である。本研究を進める過程で、特にガスの加熱メカニズムと、金属量が大きく影響を与えることが示唆された。Centaurus A の分子雲においては、中心の活動銀河核付近のガス円盤では CO の存在量が少なく、また核による X 線加熱が示唆された。我々はガスの加熱源の性質がガスにどのような影響を与えるかという点に着目し、極めて強い AGN の存在するクェーサー 3C273 やジェットが隣接する銀河に直撃している Dragonfly 銀河のガスがどのような影響を受けているか、AGN からの強いジェットによって銀河によって星形成が阻害されているのかを調査した。また、金属量の極めて低い銀河である矮小銀河 DD0154 での CO 輝線探査、そして銀河衝突によってガスが銀河から剥ぎ取られた(あるいはその場で形成された)現場であるアンテナ銀河において CO 検出および星形成との比較を行った。最終年度においては、PHANGS で使用されている CO ($J=2-1$) 輝線と従来(本研究も含む)使われてきた CO ($J=1-0$) 輝線の性質の違いを探る大規模な ALMA-FACTS プロジェクトに参画している。

4. 研究成果

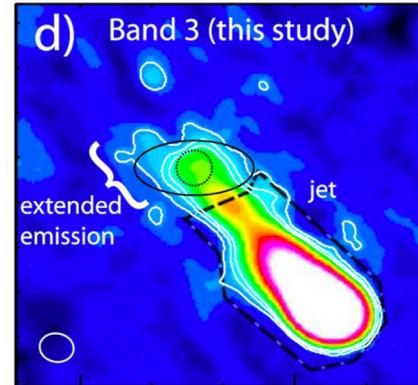
(1) Centaurus A 銀河の分子雲カタログ

ALMA を用いて、早期型銀河 Centaurus A (Cen A) を 20 パーセクの分解能で観測した。689 個の分子雲を検出し、それらの半径と速度分散を比較した (図 2 上)。これらの多くは広く銀河円盤上に分布しており、図では赤丸として記されている。赤丸で表された分子雲は他の銀河や天の川銀河と大きく異なることはない事が判明した。早期型銀河は多くの晚期型銀河と比較して星質量が大きく力学ポテンシャルの形状も異なるが、分子雲のサイズ-線幅関係には影響を与えていない。一方で、銀河中心付近のガス円盤 (CND: 青十字) は系統的に速度分散が大きい。CND 上の分子雲では星形成の効率が赤丸で表される領域より低い。そのため、中心 AGN からのガス加熱による星形成の抑制が示唆された (Miura et al. 2021)。



(2) ケーサー 3C273 母銀河のガスと星形成

ALMA を用いて、最も近傍かつ強力な AGN をもつ radio loud ケーサー 3C273 の母銀河から広がったミリ波放射を検出した (図 2 中)。このミリ波放射は母銀河に 30 キロパーセクに渡って広がっており、AGN によって直接電離されていると判断されている電離ガス構造 (Extended Emission Line Region; EELR) と同じ領域に分布している。これらから、発見されたミリ波放射も AGN によって直接電離された水素ガスによって放射される自由-自由放射であることが判明した (Komugi et al. 2022)。EELR に付随した広範な自由自由放射は本研究で初めて発見された。このような環境では、星形成の材料となるガスが加熱され、収縮を妨げられることで星形成が抑制されている事が考えられる。AGN から南西に放射されるジェットは分子ガスの速度分散を増大させるものの、その影響は限定的であることがわかった (Komugi et al. 2022, 2023 学会発表)。



(3) Dragonfly 銀河のジェット-ガス相互作用

赤方偏移 $z=1.92$ にある MRC0152-209 (通称 Dragonfly 銀河) は、2 つの銀河が重力相互作用している。この系では一方の銀河から放出された AGN ジェットが他方の銀河円盤を直撃している稀有な天体である。ALMA によるこの銀河の高分解能観測を通して、ジェットが他方の銀河の円盤の星間物質と 10^5 年程度にわたって衝突し、ホットスポットを形成している事がわかった (Zhong et al. 2023)。CO (J=6-5) の観測からはこのジェットに垂直に伸びるように分子ガスの流出が起きており、強力な AGN ジェットであれば短い時間で近傍の他の銀河の星形成を止めてしまう可能性があることが判明した (Zhong et al. 2024)。

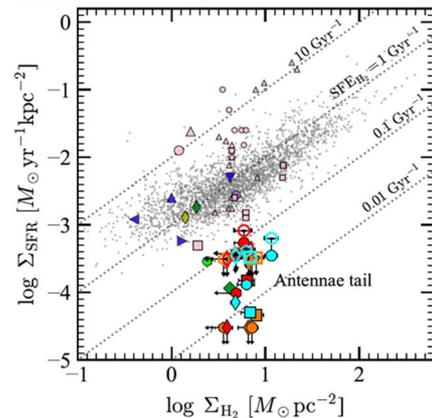


図 2

上: CenA 銀河の半径-速度分散

中: 3C273 母銀河のミリ波放射

下: アンテナ銀河潮汐腕の KS 則

(4) DD0154 銀河の CO 輝線探査

金属量の低い環境では、固い星間輻射場によって CO 分子が破壊され、CO 輝線が水素分子をトレースしないことがこれまでに指摘されている。このような環境では CO-H₂ 分子の変換係数 X が顕著に増大することが予想されているが、特に天の川の 1/10 以下の金属量を持つような極端な環境では X が金属量にどう依存するのかが不明である。本研究では太陽近傍の 1/20 の金属量をもつ不規則矮小銀河 DD0154 の ¹²CO および ¹³CO の探査を行った。野辺山 45m 電波望遠鏡での観測からは CO 輝線は検出されなかった。Herschel 衛星によるダスト観測と比較したところ、 X は天の川の 1000 倍以上あるという示唆を得た (Komugi et al. 2023)。

(5) Antennae 銀河の潮汐構造での CO 探査

銀河同士が衝突すると潮汐力によってその形態が乱れ、tidal arm あるいは tidal tail という呼ばれる構造を作ることがある。通常の円盤と異なるこのような構造で星形成がどのように進行するかはわかっていない。野辺山 45m 電波望遠鏡を用いて代表的な衝突銀河 Antennae の tidal tail に対する CO 探査を行ったところ、星形成の有無に関わらず CO が検出された。分子ガスがその場で形成されたのか、あるいは銀河から引き出されたのかは不明であるが、これらの領域での KS 則は通常見られる相関が存在しないことがわかった (図 2 下; Maeda et al. 2023)。よく広範な分子ガスの分布を調べ、星形成に影響する変数を探るために、さらに野辺山 45m 電波

望遠鏡を用いて大規模に Antennae 銀河 tidal tail の CO 探査を行った。荒天のため十分なデータは得られていないが、並行して ALMA による高分解能の観測を行っている。

(6)ALMA-FACTS の CO 輝線比サーベイ

PHANGS プロジェクトによって出版された分子雲カタログは、CO(J=2-1)輝線の観測をもとにしている。一方で、従来分子ガスを定量するためにはCO(J=1-0)輝線が利用されてきた。この2つの輝線の比はガスの密度や温度に依存するが、PHANGS を含めたこれまでのほとんどの研究では一定の比を仮定していた。我々は分子雲レベルでこの比が銀河の構造と対応してどのように変化するかを系統的に調べるため、PHANGS 天体に対して高分解能の CO(J=1-0)観測を行う ALMA-FACTS プロジェクトを開始した(図3:Komugi et al. 2023 学会発表)。

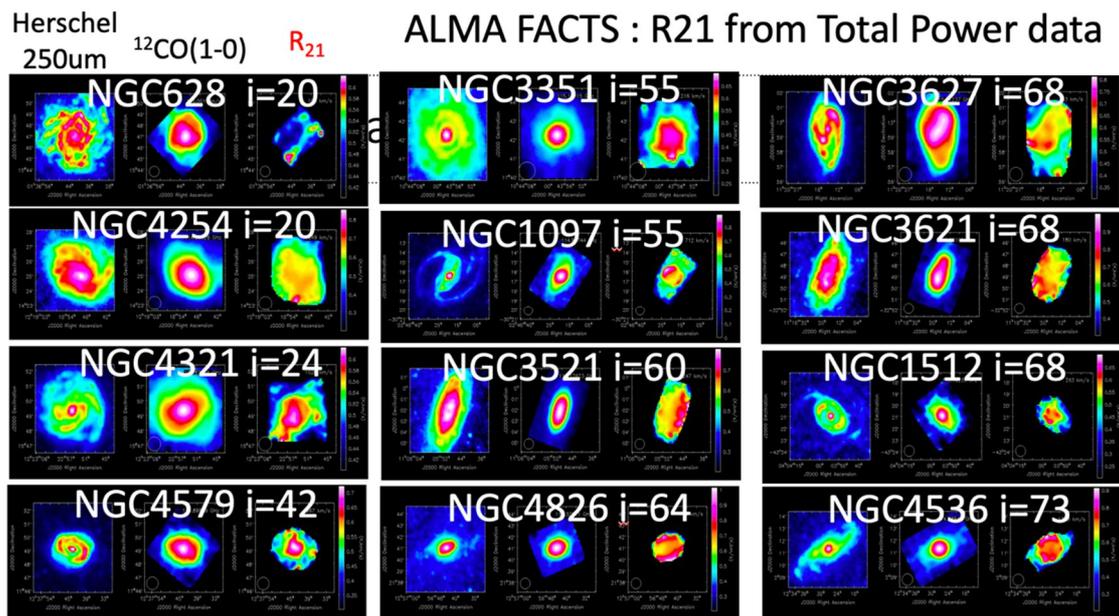


図 3

2022 年度に開始した ALMA-FACTS で得られた 12 天体の遠赤外線 (左) 12CO(J=1-0) 輝線 (中) および 12CO(J=2-1)と 12CO(J=1-0)の輝線比マップ (右)。分解能の低いデータのみを示しているが、全ての銀河で中心から外縁に向けて比が低下する、棒状構造の端 (パーエンド) で比が上昇するなど、系統的变化が観測されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Zhong Yuxing, Inoue Akio K, Sugahara Yuma, Morokuma-Matsui Kana, Komugi Shinya, Kaneko Hiroyuki, Fudamoto Yoshinobu	4. 巻 529
2. 論文標題 Revisiting the Dragonfly galaxy II. Young, radiatively efficient radio-loud AGN drives massive molecular outflow in a starburst merger at $z = 1.92$	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4531 ~ 4553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stae798	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Maeda Fumiya, Egusa Fumi, Tsujita Akiyoshi, Inoue Shuhei, Kohno Kotaro, Komugi Shinya, Ohta Kouji, Asada Yoshihisa, Fujimoto Yusuke, Habe Asao, Hatsukade Bunyo, Inoue Shin, Kaneko Hiroyuki, Kobayashi Masato I. N., Tosaki Tomoka	4. 巻 962
2. 論文標題 Detection of CO(1?0) Emission at the Tips of the Tidal Tail in the Antennae Galaxies	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 4 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad1932	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Komugi Shinya, Inaba Miku, Shindou Tetsuo	4. 巻 75
2. 論文標題 12CO and 13CO observation of the low-metallicity dwarf galaxy DD0?154	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1337 ~ 1343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psad074	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Zhong Yuxing, Inoue Akio K, Sugahara Yuma, Morokuma-Matsui Kana, Komugi Shinya, Kaneko Hiroyuki, Fudamoto Yoshinobu	4. 巻 522
2. 論文標題 Revisiting the Dragonfly galaxy ? I. High-resolution ALMA and VLA observations of the radio hotspots in a hyper-luminous infrared galaxy at $z = 1.92$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 6123 ~ 6136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad1428	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Komugi Shinya、Toba Yoshiki、Matsuoka Yoshiki、Saito Toshiki、Yamashita Takuji	4. 巻 930
2. 論文標題 Detection of Extended Millimeter Emission in the Host Galaxy of 3C 273 and Its Implications for QSO Feedback via High Dynamic Range ALMA Imaging	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 3~3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac616e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miura R E, Espada D, Hirota A, Henkel C, Verley S, Kobayashi M I N, Matsushita S, Israel F P, Vila-Vilaro B, Morokuma-Matsui K, Ott J, Vlahakis C, Peck A B, Aalto S, Hogerheijde M R, Neumayer N, Iono D, Kohno K, Takemura H, Komugi S	4. 巻 504
2. 論文標題 A giant molecular cloud catalogue in the molecular disc of the elliptical galaxy NGC?5128 (Centaurus?A)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 6198 ~ 6215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1210	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Shinya Komugi
2. 発表標題 12CO and 13CO observation of the low metallicity dwarf galaxy DD0154
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinya Komugi
2. 発表標題 ALMA-FACTS : 近傍銀河のCO(2-1)/CO(1-0)比の系統的サーベイ
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinya Komugi
2. 発表標題 Extended Thermal Bremsstrahlung in AGN Hosts as a New Probe of Negative Feedback
3. 学会等名 ALMA at 10 years ; Past, Present and Future (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinya Komugi
2. 発表標題 ALMA Exploration of Negative Feedback in Nearby QSOs Using the Free-Free Continuum
3. 学会等名 A half century of millimeter and submillimeter astronomy: Impact on astronomy/astrophysics and the future (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小麦真也
2. 発表標題 QSO母銀河の広がった輝線領域からのミリ波熱制動放射観測を通じたAGN-銀河相互作用の研究
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinya Komugi, Yoshiki Toba, Yoshiki Matsuoka, Toshiki Saito, Takuji Yamashita, Masafusa Onoue
2. 発表標題 3C273のHigh Dynamic Range Imaging
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

世界初、アルマ望遠鏡の超コントラスト観測で描き出す銀河の新しい姿
<https://www.kogakuin.ac.jp/news/2022/053191.html>
アルマ望遠鏡の超コントラスト観測が描き出す銀河の新しい姿
https://www.ehime-u.ac.jp/data_release/pr_220531_cosmos/
超コントラストで描き出す銀河の新しい姿
<https://alma-telescope.jp/news/press/3c273-202205>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
チリ	Joint ALMA observatory			
米国	Stony Brook University			