令和7年 修士論文

# AKARI 近傍高光度赤外線銀河での 分子ガスと星形成活動の関係

## 指導教員 本原顕太郎 教授

東京大学理学系研究科天文学専攻修士課程 学籍番号:35-226108

車彩乃

2025年2月13日

## It is known that there is a strong correlation between the stellar mass $(M_*)$ and star formation rate (SFR) in galaxies, called the star formation main sequence. Galaxies located above the star formation main sequence in the $SFR-M_*$ plane are particularly active in star formation, and are called luminous infrared galaxies (LIRGs) or ultra-luminous infrared galaxies (ULIRGs) based on their infrared emission. One of the causes of active star formation in U/LIRGs is thought to be the interaction between galaxies, and many U/LIRGs are known to interact with each other. Studying the relationship between star formation and the molecular gas that is the material for stars in these actively star-forming galaxies is important for understanding galaxy formation and evolution.

To understand the physics behind the active star formation of U/LIRGs, we estimated the molecular gas masses of 42 local U/LIRGs using <sup>12</sup>CO (1-0) line data observed by the Nobeyama 45 m radio telescope. These sources (PARADISES galaxies) were selected from the sample of the PARADISES project, a near-infrared narrow-band imaging survey of the hydrogen Pa $\alpha$  (1.875  $\mu$ m) emission lines of local U/LIRGs. The molecular gas mass was estimated to be  $1 - 50 \times 10^9 M_{\odot}$ . The molecular gas masses of PARADISES galaxies and those from two previous studies were examined in relation to molecular gas fraction, star formation efficiency, and galaxy properties.

In order to investigate the relationship between interactions and star formation activity in local U/LIRGs, the objects in our sample were classified into four merger phases based on their morphology. The molecular gas fraction and specific star formation rate slightly increased during the merging process, suggesting that galaxy mergers contribute to the increase in the molecular gas fraction.

Moreover, the effect of the presence of AGN on the U/LIRGs star-forming activity was investigated based on the diagnosis of AGN using the BPT diagram. In PARADISES galaxies, no differences in molecular gas fraction and star formation efficiency were found between AGN and PARADISES galaxies. This result indicates that AGN activity does not reduce the molecular gas ratio and sSFR during phases of explosive star formation, such as U/LIRGs.

#### 概要

## 目次

1	序論	$\frac{1}{2}$	3
	1.1	Star formation main sequence	3
	1.2	スターバースト銀河 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
	1.3	近傍系外銀河についての分子ガス研究 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	4
	1.4	近傍 U/LIRG の形態と星形成活動 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5
	1.5	AGN 活動の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
	1.6	本論文の目的及び構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
2	デー	-タ •••••••••••••••••••	9
	2.1	サンプル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
	2.1.1	PARADISES プロジェクト概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
	2.1.2	PARADISES-NRO サンプルセレクション ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
	2.1.3	観測 •••••	12
	2.1.4	比較サンプル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
	2.2	データリダクション ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
3	解材	行・結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
	3.1	分子ガス質量の導出 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
	3.1.1	大気吸収効果の補正 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
	3.1.2	CO luminosity ••••••	24
	3.1.3	コンバージョンファクター ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	25
	3.1.4	分子ガス質量 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	25
	3.2	PARADISES 銀河の分子ガス特性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	25
	3.3	Merger 段階による形態分類 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
	3.3.1	分類基準 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
	3.3.2	形態分類結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
	3.4	AGN diagnosis	30
4	議訴	â • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	32
	4.1	銀河相互作用による星形成活動への影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
	4.1.1	HI data	33
	4.1.2	合体過程での原子ガス量と分子ガス量 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
	4.2	AGN 活動による近傍 U/LIRGs の星形成活動への影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	38
5	SEI	D fitting ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	41
	5.1	Photometry data	41
	5.2	パラメータ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	41
	5.3	結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	42

6	まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	46
謝辞・		47
付録 A	A Best fitting SED model • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	48

## 1 序論

## 1.1 Star formation main sequence

銀河の星形成活動は、銀河の性質や進化の段階によって様々である。これまでの銀河の星形成活動に関する研究から、星形成銀河の星質量 ( $M_*$ ) と星形成率 (SFR) の間には強い相関があることが分かっており、この関係は Star formation main sequence (星形成主系列) と呼ばれている (Elbaz et al. 2007; Noeske et al. 2007)。図 1 は近傍宇宙における SDSS 銀河の SFR –  $M_*$  平面上での分布 を示しており、緑の実線が Elbaz et al. 2007 によって以下のように定義された、近傍宇宙での星形 成主系列関係である。

$$SFR_{MS} = 8.7 \times [M_*/10^{11}]^{0.77} \tag{1}$$

銀河の多くはこの星形成主系列に沿って成長すると考えられている。星形成を終えると主系列から 外れ、red and dead と呼ばれる星形成をほとんど行わない銀河のグループへ移行する。近傍宇宙で は、星質量と星形成率の比である specific star formation rate ( $sSFR = SFR/M_*$ ) は ~ 0.1 (Gyr<sup>-1</sup>) で一定の値を持つ。 $M_* \sim 10^{11} M_{\odot}$  までは主系列の相関が保たれているが、それ以上では大質量楕 円銀河が支配的になり、星質量が  $M_* \sim 10^{11} M_{\odot}$  を超える主系列銀河は少数である。それらの銀河 は、大質量楕円銀河に進化すると考えられる。

銀河の形成や進化について理解するためには、銀河の星形成活動について調べることが大変重要 である。



図 1: SDSS 銀河 (0.015  $\leq z \leq 0.1$ )の SFR –  $M_*$ 平面上での分布。緑の実線は近傍宇宙における star formation main sequence relation を表し、破線は点線は 1 $\sigma$  のばらつきを表す。

## 1.2 スターバースト銀河

 $SFR - M_*$ 平面上で main sequence より上に分布する、特に星形成活動が活発な銀河はスター バースト銀河と呼ばれる。大量の大質量星を短期間に生み出しているスターバースト銀河では、星 間塵(ダスト)が大量に存在する。そのため大質量星からの放射はダストに吸収され、温まったダ ストは中間赤外線 (MIR) から遠赤外線 (FIR) での電磁波で再放射する。このようにスターバー スト銀河は赤外線 (IR=8 - 1000  $\mu$ m) で明るいため、赤外線の放射光度  $L_{IR}$  が星形成活動の指標 として用いられている。 $L_{IR} > 10^{11} L_{\odot}$ の銀河は高光度赤外線銀河 (Lunminous infrared galaxies : LIRG),  $L_{IR} > 10^{12} L_{\odot}$ の銀河は超高光度赤外線銀河 (ultralunminous infrared galaxies : ULIRG) と呼ばれている。

## 1.3 近傍系外銀河についての分子ガス研究

銀河の星形成活動について考えるためには、銀河に含まれる分子ガスの観測が重要である。星間 ガスの一種である分子ガスは低温かつ高密度で分子状態として存在しており、分子ガスが自己重力 収縮することで、星が生まれる。分子ガスの主成分は水素分子である。しかし低温である分子ガス では、水素分子は双極子モーメントを持たないため電磁波を放射できない。そのため、次に量が多 い CO の電波を観測することで分子ガス質量を見積もるという方法が取られており、系外銀河で は、CO の回転エネルギー準位  $J = 1 \rightarrow 0$  輝線 (CO(1-0) 輝線) の電波スペクトルがよく観測されて いる。

星形成のために使うことができる分子ガスの量、そして分子ガスを星に変換する効率が、銀河の 進化に重要な要素である。銀河における分子ガスの観測から、分子ガス量と他の物理的性質との関 係を調べることで、分子ガス量が銀河の星形成活動やその他の性質にどう影響しているかを知る ことができる。COLD GASS サーベイ (Saintonge et al. 2011), およびサンプルを拡大した xCOLD GASS サーベイ (Saintonge et al. 2017) では、近傍宇宙におけるガス (HI, H<sub>2</sub>) について詳細に研究 されている。図 2 は xCOLD GASS サンプルの  $SFR - M_*$  平面における分布が示されている。各 パネルは左から星質量に対する原子ガス質量  $M_{H_I}$  の割合  $f_{H_I} = M_{H_I}/M_*$ , 分子ガス質量  $M_{H_2}$  の割 合  $f_{H_2} = M_{H_2}/M_*$ , depletion time ( $t_{dep} = M_{H_2}/SFR$ ) が  $SFR - M_*$  平面上でどのように変化する のかを表す。Depletion time は星形成効率 ( $SFE = SFR/M_{H_2}$ )の逆数であり、星形成に利用でき るガスの供給があり、新しい燃料の流入がないと仮定した場合に星形成を現在のペースで維持でき る時間スケールを示す (Saintonge and Catinella 2022)。 $f_{H_2}$  と  $t_{dep}$  は sSFR に強く依存しており、 main sequence より上に位置する銀河は分子ガスの割合が高く depletion time が短いという傾向が 見られる。一方  $f_{H_I}$  は  $M_*$  に沿って大きく変化しており、星質量が大きいほど原子ガス比が低い傾 向がある。

星形成が活発である近傍の U/LIRGs は、分子ガスの特徴と形態など銀河の性質について詳しく 調べることができる対象である。近傍 U/LIRGs についての分子ガス研究は、極端な星形成活動や 大質量楕円銀河の形成を理解するために重要である。



図 2: xCOLD GASS サンプルの SFR –  $M_*$  平面での  $f_{H_1}$  (左),  $f_{H_2}$  (真ん中),  $t_{dep}$  (右) の変化 (Saintonge et al. 2017; Saintonge and Catinella 2022)。小さい黒丸は CO(1-0) 輝線が検出されなかったもの。コントアは 0.02 < z < 0.05 における SDSS の全サンプルを示す。黒の破線と点線はそれぞれ main sequence  $\pm \pm 0.4$ dex のばらつきを表す。

## 1.4 近傍 U/LIRG の形態と星形成活動

銀河の相互作用・衝突・合体は、近傍 U/LIRGs における激しい星形成活動の原因のひとつと考 えられている (Sanders and Mirabel 1996)。近傍 LIRGs は、合体していない銀河から合体の最終段 階にある銀河まで、全ての範囲が観測されている (Haan et al. 2011; Petric et al. 2011)。また赤外 線光度が大きくなると、合体銀河・相互作用銀河の割合が高くなっていることが知られている (Hung et al. 2014)。ULIRG では、約7割が相互作用銀河・合体銀河であり (Hung et al. 2014)、 位が進んだ段階で観測されることが多い。銀河合体で星形成が活発になる原因として、星を形成で きるガスの量が増えることと、ガスの星形成効率が上がることの2つが考えられている。ノーマル 銀河では、相互作用銀河の方が単一銀河よりも SFR と分子ガス割合が高いが、星形成効率は相互 作用の影響を受けにくいことが研究されている (Pan et al. 2018)。また U/LIRG でも、合体の過 程で分子ガス割合の増加が見られている (図 4, Larson et al. 2016)。相互作用や合体によって、効 率的にガスが銀河中心に流入され (Barnes and Hernquist 1996; Mihos and Hernquist 1995)、星形 成活動の活発化や銀河の進化に繋がると考えられている。一方 Yamashita et al. 2017 では、近傍 U/LIRG の中心領域の分子ガス質量は、合体の初期から後期にかけて誤差の範囲内で一定であると いう結果が述べられている。銀河合体や相互作用によって分子ガス量や星形成効率がどう影響を受 けるのかは、まだ明らかではない。

また、銀河合体は銀河中心の supermassive black hole (SMBH) にガスを流入させる可能性がある ことが知られている。相互作用のシミュレーションから、銀河が相互作用を経て合体し、スター バーストフェーズに入り、そしてガスの流入によって活動銀河核 (AGN) が点火され、周囲のガス が吹き飛ばされる、というシナリオが予測されている (Hopkins et al. 2008)。



図 3: Visual classification による U/LIRG の形態の割合の分布 (Hung et al. 2014)。赤外線光度によって下か ら上に三つのパネルに分けられおり、また赤方偏移によって左から右に四つのビンに分けられている。 バーの色の違いが形態の種類を表している。



図 4: 近傍 U/LIRGs の合体段階における分子ガス割合の変化 (Larson et al. 2016)。白抜きの丸は各合体段階 での分子ガス割合の平均値とそのエラーである。図の上部に並ぶ天体のイメージは、各合体段階 (Single galaxy, minor merger, major merger の stage 1 から stage 5) における天体の例である。

## 1.5 AGN 活動の影響

AGN feedback による銀河内の分子ガス流出は、重要なクエンチングメカニズムである可能性が ある。AGN 活動によるジェットや super-wind によってガスが流出したりガスの冷却が妨げられる ことで、星形成が抑制されるとと考えられている。この場合、AGN の活動と銀河の分子ガス量に は負の相関があることが予想される。図 5 では近傍のノーマル銀河である xCOLD GASS サンプル (Saintonge et al. 2017) について、BPT diagram (Baldwin et al. 1981) 上での分子ガス比が示されて いる。図 5 よりノーマル銀河においては、BPT diagram 上で AGN host と分類される銀河が低い 分子ガス比を持つ傾向が見られる。これは、AGN feedback によって分子ガスが流出しているため に AGN host 銀河では分子ガス比が低くなっている、という可能性がある。この結果は、COLD GASS サンプルと Swift/BAT サンプルの AGN host 銀河が、non-AGN 銀河と比べて *sSFR* が低い 傾向があるという結果を示した Shimizu et al. 2015 と一致するものである。U/LIRGs では、AGN 活動による分子ガスへの影響はまだ明らかではない。



図 5: BPT diagram 上での xCOLD GASS サンプルの分布 (Saintonge et al. 2017)。分子ガス比の大きさに よって色分けされている。黒丸は CO(1-0) 輝線が検出されなかったもの。黒の実線は Kewley et al. 2001 による theoretical relation, 破線は Kauffmann et al. 2003 による empirical relation である。

## 1.6 本論文の目的及び構成

本研究の目的は、近傍 LIRG, ULIRG の活発な星形成がなぜ、どのようにして起こっているか理 解することである。特に、U/LIRGs で分子ガス比と星形成効率がどのように振る舞うのか、そし て U/LIRGs の星形成活動において銀河相互作用と AGN 活動がどのような影響を与えているのか、 という点に着目した。そのため、*SFR – M*<sub>\*</sub> 平面上で main sequence より上の領域を幅広くカバー する均一なサンプルについて、野辺山 45 m 電波望遠鏡で <sup>12</sup>CO (1-0) 輝線観測を行い、それらの分 子ガス質量を求めた。

本論文の構成は以下の通りである。第2章にて本研究で使用したデータについて説明する。第3 章にてデータの解析手法およびその結果を示す。第4章では得られた結果から、分子ガスと銀河 相互作用、AGN 活動との関係について議論する。最後に第5章では、本研究の対象天体について SED fitting を行った結果を示す。

本研究で使用する宇宙論パラメータは、 $\Lambda$  – CDM モデルを仮定し、 $H_0 = 70$  km/s/Mpc,  $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$ を採用している。初期質量関数 (IMF) は Chabrier 2003 を仮定している。

## 2 データ

## 2.1 サンプル

## 2.1.1 PARADISES プロジェクト概要

PARADISES (Pa-Alpha Resolved Activity and Dynamics of Infrared Selected Extreme Starbursts) プロジェクトは赤方偏移 0.03 – 0.16 の近赤外線狭帯域撮像サーベイであり、Subaru/IRCS および TAO/SWIMS による水素 Paschen- $\alpha$  輝線の観測から、ダストに隠された銀河の星形成活動を調べ ることを目的としている。PARADISES プロジェクトのサンプル天体は、SDSS カタログデータと クロスマッチした AKARI 90  $\mu$ m 全天データから、 $L_{8-1000 \ \mu m} = 10^{11} - 10^{12} L_{\odot}, z = 0.027 - 0.161$ であるものが選ばれた。

#### 2.1.2 PARADISES-NRO サンプルセレクション

本研究では、PARADISES プロジェクトのサンプル銀河について、野辺山 45 m 電波望遠鏡 (NRO 45m) によって CO(1-0) 輝線のフォローアップ観測が行われたデータを用いる。*SFR – M*<sub>\*</sub> 平面において *M*<sub>\*</sub> と *sSFR* に基づいて表 1 で定義された6つの領域を定め、サンプル天体のうちこ の領域に当てはまるものが、CO(1-0) 輝線のフォローアップ観測を行う天体として選ばれた。本論 文では、これらの天体を PARADISES 銀河と呼ぶ。PARADISES 銀河の赤外線光度 *L*<sub>IR</sub> 分布を図 6 に示した。

ID	$\log(M_*~(M_{\odot}))$	$\log(sSFR\ (yr^{-1}))$
PARADISES-NRO-1	10.0-10.5	> -9.2
PARADISES-NRO-2	10.5 - 11.0	> -9.2
PARADISES-NRO-3	10.5 - 11.0	-9.69.2
PARADISES-NRO-4	>11.2	-10.09.6
PARADISES-NRO-5	>11.0	-9.69.2
PARADISES-NRO-6	>11.0	> -9.2

**表 1:** SFR – M<sub>\*</sub> 平面上の各領域における M<sub>\*</sub> と sSFR の条件



図 6: PARADISES 銀河の赤外線光度 LIR 分布

本研究で用いた PARADISES 銀河の物理量を表 2 に示した。各天体の ID は、表 1 に示した 6 つの領域の ID から決められている。各天体の星形成率は AKARI による FIR 測光データから導 出されたものである。星質量は SDSS DR7 MPA/JHU catalog <sup>1)</sup>から引用した値であり、SDSS の broad-band u,g,r,i,z 測光データへのフィットから導出されたものである。また、PARADISES 銀河 の SFR –  $M_*$  平面での位置を図 7 の赤いプロットで示した。PARADISES 銀河は、SFR –  $M_*$  平 面上で main sequence より上の幅広い範囲をカバーしているサンプルであることが分かる。

ID	Z	$\log M_* ({ m M}_\odot)$	$\log SFR (M_{\odot} \text{ yr}^{-1})$	$12 + \log(O/H)$
PARADISES-NRO-h2	0.077	10.55	1.45	8.74
PARADISES-NRO-h3	0.076	10.74	1.42	8.97
PARADISES-NRO-h4	0.079	10.90	1.45	8.73
PARADISES-NRO-h6	0.086	10.14	1.48	8.73
PARADISES-NRO-m4	0.083	10.93	1.47	8.73
PARADISES-NRO-1-01	0.037	10.38	1.50	8.74
PARADISES-NRO-1-02	0.116	10.21	1.54	8.92
PARADISES-NRO-1-03	0.039	10.20	1.11	8.73
PARADISES-NRO-1-03b	0.039	10.20	1.11	8.73
PARADISES-NRO-1-06	0.035	10.02	1.08	8.83
PARADISES-NRO-1-07	0.031	10.03	1.19	9.02
PARADISES-NRO-1-10	0.041	10.05	0.848	9.04

表 2: PARADISES 銀河の物理量一覧

1) https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/SDSS/DR7/

ID	$\mathbf{Z}$	$\log M_* (\mathrm{M}_{\odot})$	$\log SFR (M_{\odot} \text{ yr}^{-1})$	$12 + \log(O/H)$
PARADISES-NRO-2-01	0.153	10.92	1.91	9.10
PARADISES-NRO-2-02	0.138	10.52	1.73	8.74
PARADISES-NRO-2-03	0.102	10.7	1.85	8.74
PARADISES-NRO-2-05	0.141	10.95	1.82	8.73
PARADISES-NRO-2-07	0.115	10.9	1.75	8.73
PARADISES-NRO-2-09	0.128	10.69	1.77	8.98
PARADISES-NRO-2-10	0.12	10.9	1.77	9.04
PARADISES-NRO-3-01	0.045	10.88	1.30	8.73
PARADISES-NRO-3-02	0.116	11.00	1.58	8.73
PARADISES-NRO-3-04	0.047	10.58	1.18	9.12
PARADISES-NRO-3-06	0.034	10.63	1.26	8.74
PARADISES-NRO-3-08	0.1	10.82	1.53	9.02
PARADISES-NRO-3-09	0.103	10.9	1.43	9.06
PARADISES-NRO-4-01	0.117	11.22	1.43	8.71
PARADISES-NRO-4-01b	0.117	11.22	1.43	8.71
PARADISES-NRO-4-03	0.115	11.42	1.67	8.68
PARADISES-NRO-4-04	0.158	11.43	1.80	8.69
PARADISES-NRO-4-05	0.106	11.33	1.62	8.69
PARADISES-NRO-4-08	0.103	11.27	1.59	8.70
PARADISES-NRO-5-01	0.113	11.07	1.59	8.72
PARADISES-NRO-5-02	0.112	11.09	1.72	8.72
PARADISES-NRO-5-03	0.039	11.07	1.48	8.71
PARADISES-NRO-5-05	0.113	11.5	1.94	9.06
PARADISES-NRO-5-06	0.11	11.08	1.76	8.72
PARADISES-NRO-5-07	0.114	11.05	1.67	8.72
PARADISES-NRO-5-08	0.106	11.11	1.61	8.72
PARADISES-NRO-5-09	0.102	11.04	1.77	8.72
PARADISES-NRO-6-01	0.15	11.05	1.96	8.73
PARADISES-NRO-6-02	0.132	11.12	1.96	8.72
PARADISES-NRO-6-03	0.14	11.0	1.86	8.73
PARADISES-NRO-6-05	0.136	11.08	2.14	8.72
PARADISES-NRO-6-10	0.135	11.17	2.10	8.72



図 7:  $SFR - M_*$  プロット。色の違いはサンプルの違いを表す。黒の実線は近傍宇宙での星形成主系列関係 (Elbaz et al. 2007)であり、破線は 1 $\sigma$  のばらつきを表す。

#### 2.1.3 観測

PARADISES 銀河の CO(1-0) 輝線のフォローアップ観測は、2018 年 1 月から 2 月と 2024 年 1 月から 2 月に野辺山 45m 望遠鏡 (NRO 45m) によって行われ、51 天体の観測が実行された。 CO(1-0) 輝線の静止波長は 115.27 GHz であり、PARADISES 銀河の赤方偏移範囲では 99.29 - 112.24 GHz にシフトする。望遠鏡のビームサイズは 110 GHz において 14.4 arcsec であり、main beam efficiency は NRO ウェブサイトより、0.43 である。<sup>2)</sup> PARADISES 銀河の光度距離と NRO 45m による projeted beam radius の範囲を図 8 に示した。また大気吸収補正のための標準天体とし て、IRC+10216 の <sup>13</sup>CO(1-0) 輝線を用いた。この標準天体は全ての観測日で観測された。

<sup>2)</sup> https://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/html/prop/eff/eff2018.html



図 8: PARADISES 銀河の光度距離と NRO 45m による projeted beam radius.

### 2.1.4 比較サンプル

**xCOLD GASS サンプル**本研究では、xCOLD GASS サーベイから公開されている、近傍銀河 の CO(1-0) 輝線データも使用した。<sup>3)</sup> xCOLD GASS は、近傍の 532 個の銀河について IRAM30m 望遠鏡によって CO(1-0) 輝線の観測を行なった、最も広範囲な銀河系外 CO サーベイの一つである (Saintonge et al. 2017)。サンプルは SDSS カタログのうち、赤方偏移範囲が 0.01 < z < 0.05 の中 から、 $M_* > 10^9 M_{\odot}$ という条件で選ばれたものである。星形成率は WISE (IR) と GALEX (UV) の 測光データより導出されている。

**Tacconi et al. 18 サンプル** また本研究では、Tacconi et al. 2018 から公開されている、分子ガ ス質量データも使用した。<sup>4)</sup> 使用したサンプルは、GOALS サーベイ (Armus et al. 2009) による z = 0.002 - 0.09 の U/LIRGs についての IRAM 30 m による CO(1-0) 輝線データ、そして EGNOG サーベイ (Bauermeister et al. 2013) による CARMA millimeter array で観測された z = 0.006 - 0.5の星形成銀河の CO(1-0) 輝線データである。ただし本研究では PARADISES 銀河と同じ近傍宇宙 でのサンプルと比較を行うために、Tacconi 18 サンプルのうち、z < 0.16 の範囲にあるデータのみ を用いた。星形成率の導出には FIR 放射、MIR 放射、UV から NIR の SED フィッティングが用い られている。

<sup>3)</sup> http://www.star.ucl.ac.uk/xCOLDGASS/data.html

<sup>4)</sup> https://www.iram.fr/~phibss2/Data\_Release.html

## 2.2 データリダクション

データリダクションは、野辺山電波観測所によって配布されているソフトウェア NEWSTAR を 用いて行なった。以下に手順を示す。

1. 生データを目視で確認し、ベースラインがうねっていたり異常な特徴があるものを除去する。

- 2. 生データをスペクトルデータに変換する。
- 3. 線形フィッティングしベースライン引きすることでスペクトルの傾きを補正する。
- 4. スペクトルの同じポイントについて 1/rms<sup>2</sup> で加重平均を取る。
- 5. 50 km<sup>-1</sup>毎に平均を計算することでスペクトルをスムージングする。
- 6. 再度ベースライン引きを行い傾きを補正する。

以上の手順により、天体の生データから、観測されたアンテナ温度 *T<sub>a</sub>* を求めた。CO(1-0) が検出 された銀河は 42 天体である。取得した CO(1-0) 輝線のスペクトルを図 9 から図 17 に示す。





(d) Par-h6





図 9: PARADISES 銀河の CO スペクトルと PanSTARRS image (視野は幅 1.24').



16



(a) Par1-01



(b) Par1-02





(c) Par1-03



(d) Par1-03b



(e) Par1-06

図 10: PARADISES 銀河の CO スペクトルと PanSTARRS image (視野は幅 1.24').



(a) Par1-07



(b) Par1-10



(c) Par2-01



(d) Par2-02

図 11: PARADISES 銀河の CO スペクトルと PanSTARRS image (視野は幅 1.24').







(b) Par2-05



(c) Par2-07



(d) Par2-09



(e) Par2-10

図 12: PARADISES 銀河の CO スペクトルと PanSTARRS image (視野は幅 1.24').









(d) Par3-06



(e) Par3-08

図 13: PARADISES 銀河の CO スペクトルと PanSTARRS image (視野は幅 1.24').





(b) Par4-01



(c) Par4-01b



(d) Par4-03



(e) Par4-04

図 14: PARADISES 銀河の CO スペクトルと PanSTARRS image (視野は幅 1.24').







(b) PAR4-08



(c) PAR5-01



(d) PAR5-02



(e) PAR5-03

図 15: PARADISES 銀河の CO スペクトルと PanSTARRS image (視野は幅 1.24').



(a) PAR5-05



(b) PAR5-06



(c) PAR5-07



(d) PAR5-08



(e) PAR5-09

図 16: PARADISES 銀河の CO スペクトルと PanSTARRS image (視野は幅 1.24').



(b) Par6-02

իւ<sub>ու Մ</sub>



(c) Par6-03



(d) Par6-05



(e) Par6-10

図 17: PARADISES 銀河の CO スペクトルと PanSTARRS image (視野は幅 1.24').

## 3 解析・結果

## 3.1 分子ガス質量の導出

観測された CO(1-0) 輝線のアンテナ温度  $T_a$  から、Koyama et al. 2019 に従って CO luminosity を 導出し、CO – H<sub>2</sub> コンバージョンファクターを用いて分子ガス質量  $M_{H_2}$  を見積もった。以下のそ の流れを示す。

### 3.1.1 大気吸収効果の補正

はじめに観測されたアンテナ温度  $T_a$  について、大気吸収による効果を補正する必要がある。補 正のための標準天体である IRC+10216 の <sup>13</sup>CO(1-0) 輝線観測データを用いて、観測されたアンテ ナ温度  $T_A$  と典型的なアンテナ温度  $T_A'$  の比

$$f = \frac{T_A'}{T_A} \tag{2}$$

を大気吸収補正項として使用した。IRC+10216 の典型的なアンテナ温度は NRO 45m によって 観測された値を参考にし、バックエンドが AOS-H と AOS-W で観測されたアンテナ温度の平均 20.8 K km s<sup>-1</sup>を典型的なアンテナ温度として使用した。<sup>5)</sup> 複数日観測が行われた天体のアンテナ 温度は、大気吸収効果の補正を行った後に平均を取った。

## 3.1.2 CO luminosity

大気吸収による効果を補正したアンテナ温度  $T_A^*$ と main beam efficiency ( $\eta_{MB} = 0.43$ ) より、メ インビーム輝度温度  $T_{MB}$ は  $T_{MB} = T_A^*/\eta_{MB}$ と求められ、速度方向に積分した強度  $I_{CO}$  は

$$I_{CO} = \int T_{MB} dv = \int \frac{T_A^*}{\eta_{MB}} dv \, [\text{K km s}^{-1}]$$
(3)

## と表される。

またアンテナ温度  $T_A$  のエラーは、 $T_{rms}\sqrt{\Delta V \Delta v}$  から求められる。ここで  $\Delta V$  は CO スペクトルの full line width であり、 $\Delta v = 50$  km s<sup>-1</sup> はビニングした速度分解能である。速度分解能 $\Delta v = 50$  km s<sup>-1</sup> における PARADISES 銀河の  $T_{rms}$  は 0.5 – 3.3 mK であった。

CO luminosity  $(L'_{CO})$  は以下の式より求められる。

$$L'_{CO} = \frac{\Omega_{MB} I_{CO} D_L^2}{(1+z)^3} \left[ \text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2 \right]$$
(4)

ここで  $\Omega_{MB}$  はアンテナメインビーム立体角であり、 $D_L$  は luminosity Distance である。 $\Omega_{MB}$  は

$$\Omega_{MB} = \frac{\pi b^2 \theta_B^2}{4} \tag{5}$$

<sup>5)</sup> https://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/html/obs/standard/std\_new\_2-IRC\_13CO.html

### 3.1.3 コンバージョンファクター

分子ガス質量は CO – H<sub>2</sub> コンバージョンファクター ( $\alpha_{CO} = M_{H_2}/L'_{CO}$ )を用いて求めることが できる。本研究では金属量に依存する値を使用した。金属量が低い場合、ダストによる遮蔽が小さ くなり CO が H<sub>2</sub> より優先的に光解離されるため、CO のサイズや線幅が分子ガス質量に対して小 さくなる (Wolfire et al. 2010; Bolatto et al. 2013) 。そのため、コンバージョンファクターは金属量 が低いほど大きい値をとる。金属量に依存するコンバージョンファクターは様々な文献で提案され ている。本研究では Tacconi et al. 2018 と同様に、以下の式で表される Genzel et al. 2015 のコン バージョンファクターを用いた。

$$\alpha_{CO} = 4.36 \times \sqrt{0.67 \times \exp(0.36 \times 10^{-(12 + \log(O/H) - 8.67)})} \times 10^{-1.27 \times (12 + \log(O/H) - 8.67)} \tag{6}$$

ここで 12 + log(*O*/*H*) は金属量である。金属量は Genzel et al. 2015 に従った星質量-金属量関係を 用いて推定した。

$$12 + \log(O/H) = a - 0.087 \times (\log M_* - b)^2 \tag{7}$$

$$a = 8.74\tag{8}$$

$$b = 10.4 + 4.46 \times \log(1+z) - 1.78 \times (\log(1+z))^2 \tag{9}$$

#### 3.1.4 分子ガス質量

分子ガス質量は CO luminosity とコンバージョンファクターを用いて、以下の式から求めた。

$$M_{H_2} = \alpha_{CO} L_{CO}' \tag{10}$$

### 3.2 PARADISES 銀河の分子ガス特性

CO スペクトルから導出した PARADISES 銀河のアンテナ温度、CO luminosity および分子 ガス質量を表 3 に示す。分子ガス質量の範囲は、 $1.705 \times 10^9 M_{\odot}$  から  $52.82 \times 10^9 M_{\odot}$  である。 また、PARADISES 銀河の  $SFR - M_*$  平面での分子ガス比 ( $f_{H_2} = M_{H_2}/M_*$ ) と depletion time ( $t_{dep} = M_{H_2}/SFR = 1/SFE$ )の変化を図 18 で示した。Main sequence からのオフセットに沿って 分子ガス比と depletion time は連続的に変化しており、PARADISES 銀河は main sequence 上の銀 河と比べて高い分子ガス比と短い depletion time を持つことが図 18 より分かる。PARADISES 銀 河は星形成が活発であると考えられている LIRG から選ばれているため、これは予想された結果で あり、先行研究と矛盾しないものである。

	観測日	ID	$T_A (\mathrm{K \ km \ s^{-1}})$	$L_{CO} (10^8 \text{ K km s}^{-1} \text{ pc}^2)$	$\log M_{H_2} (\mathrm{M}_{\odot})$
	2024-01-11	Par-h2	$1.283 \pm 0.109$	$21.58 \pm 1.84$	$9.91 \pm 0.037$
	2024-01-29	Par-h3	$4.131\pm0.272$	$56.59 \pm 3.72$	$10.33\pm0.029$
	2024-01-11	Par-h4	$2.088 \pm 0.150$	$36.62\pm2.64$	$10.15\pm0.031$
	2024-01-11	Par-h6	$3.481 \pm 0.126$	$71.27 \pm 2.59$	$10.44\pm0.016$
	2024-01-29	Par-m4	$4.677\pm0.155$	$75.10\pm2.49$	$10.46\pm0.014$
	2018-01-29	Par1-01	$13.63\pm0.490$	46 71 + 1 69	$10.94 \pm 0.016$
	2018-02-02	Par1-01	$8.123 \pm 0.484$	$40.71 \pm 1.08$	$10.24 \pm 0.010$
	2018-02-07	Par1-02	$0.585 \pm 0.143$	$18.54 \pm 4.53$	$9.85 \pm 0.106$
	2018-01-29	Par1-03	$9.997 \pm 0.303$	$37.54 \pm 1.14$	$10.15\pm0.013$
	2018-02-06	Par1-03b	$3.409 \pm 0.432$	$13.31 \pm 1.69$	$9.70 \pm 0.055$
	2018-02-03	Par1-06	$1.875\pm0.396$	$5.39 \pm 1.14$	$9.32 \pm 0.092$
	2018-01-29	Par1-07	$10.169\pm0.340$		
	2018-02-02	Par1-07	$5.531 \pm 0.371$	$26.39 \pm 1.28$	$10.01\pm0.021$
	2018-02-03	Par1-07	$14.116\pm0.559$		
	2024-01-29	Par1-10	$1.032 \pm 0.0602$	$4.409\pm0.257$	$9.232 \pm 0.025$
	2018-02-03	Par2-01	$2.015\pm0.174$	$93.88 \pm 8.09$	$10.55\pm0.037$
	2018-02-04	Par2-02	$1.981\pm0.167$	$79.94 \pm 6.73$	$10.48\pm0.037$
	2018-02-02	Par2-03	$1.629 \pm 0.182$	$65.66 \pm 7.33$	$10.39\pm0.049$
	2018-02-04	Par2-05	$1.777\pm0.178$	$74.56 \pm 7.47$	$10.45\pm0.044$
	2018-02-07	Par2-07	$2.442 \pm 0.230$	$76.16 \pm 7.18$	$10.46\pm0.041$
	2018-01-31	Par2-09	$1.480\pm0.146$	$46.60 \pm 4.59$	$10.24\pm0.043$
	2018-01-31	Par2-10	$1.418 \pm 0.103$	$39.68 \pm 2.89$	$10.18\pm0.032$
	2018-02-02	Par3-01	$1.283\pm0.242$	$16.63 \pm 2.08$	$9.81 \pm 0.054$
	2018-02-03	Par3-01	$4.775\pm0.293$	$10.05 \pm 2.00$	$9.01 \pm 0.004$
	2018-01-29	Par3-02	$0.822 \pm 0.103$	$24.52\pm3.08$	$9.97 \pm 0.055$
	2018-02-03	Par3-04	$2.036 \pm 0.234$	$10.37 \pm 1.19$	$9.59 \pm 0.050$
	2018-01-29	Par3-06	$7.280 \pm 0.350$	$20.93 \pm 1.01$	$9.90\pm0.021$
	2018-02-05	Par3-08	$0.984 \pm 0.061$	$21.96 \pm 1.37$	$9.92\pm0.027$
	2018-02-07	Par3-09	$0.807 \pm 0.151$	$20.53 \pm 3.84$	$9.89 \pm 0.081$
	2018-02-05	Par4-01	$0.531 \pm 0.084$	$15.82\pm2.50$	$9.80 \pm 0.069$
	2018-02-07	Par4-01b	$0.414 \pm 0.057$	$13.33 \pm 1.85$	$9.73 \pm 0.060$
	2018-01-30	Par4-03	$1.193\pm0.223$	$40.78 \pm 6.83$	$10.23 \pm 0.073$
	2018-01-31	Par4-03	$1.575\pm0.233$	10.10 ± 0.00	$10.20 \pm 0.010$
	2018-02-06	Par4-04	$0.906 \pm 0.077$	$49.22 \pm 4.19$	$10.31\pm0.037$

**表 3:** PARADISES 銀河の CO(1-0) 輝線解析による結果一覧

観測日	ID	$T_A (\mathrm{K \ km \ s^{-1}})$	$L_{CO} (10^8 \text{ K km s}^{-1} \text{ pc}^2)$	$\log M_{H_2} (\mathrm{M}_{\odot})$
2018-01-30	Par4-05	$1.362\pm0.172$	$40.12\pm5.07$	$10.22\pm0.055$
2018-02-03	Par4-08	$1.433\pm0.195$	$32.40 \pm 4.42$	$10.12\pm0.059$
2018-02-03	Par5-01	$0.441 \pm 0.068$	$12.35 \pm 1.90$	$9.68 \pm 0.067$
2018-01-31	Par5-02	$1.351\pm0.140$	$33.29 \pm 3.44$	$10.11\pm0.045$
2018-01-29	Par5-03	$8.082\pm0.230$	$30.35\pm0.863$	$10.08\pm0.012$
2018-02-03	Par5-05	$2.660\pm0.297$	$71.40 \pm 7.98$	$10.48\pm0.049$
2018-02-02	Par5-06	$1.475\pm0.185$	$68.38 \pm 8.57$	$10.43\pm0.054$
2024-01-11	Par5-07	$1.697\pm0.092$	$59.21 \pm 3.21$	$10.36\pm0.024$
2024-02-26	Par5-08	$0.612\pm0.104$	$35.02 \pm 5.94$	$10.14\pm0.074$
2018-02-04	Par5-09	$3.063\pm0.288$	$70.95 \pm 6.66$	$10.44\pm0.041$
2018-02-04	Par6-01	$2.929 \pm 0.181$	$137.4\pm8.48$	$10.72\pm0.027$
2018-02-04	Par6-02	$1.767\pm0.230$	$65.78 \pm 8.58$	$10.41\pm0.057$
2018-01-31	Par6-03	$2.041\pm0.172$	$75.63 \pm 6.36$	$10.46\pm0.037$
2018-01-31	Par6-05	$2.150\pm0.093$	$75.59 \pm 3.26$	$10.47\pm0.019$
2018-02-04	Par6-10	$2.225\pm0.214$	$86.28 \pm 8.32$	$10.53\pm0.042$



図 18:  $SFR - M_*$  平面での  $f_{H_2}$  (左),  $t_{dep}$  (右) の変化。丸が PARADISES 銀河で、小さい黒丸は PARADISES 銀河の CO(1-0) 輝線が検出されなかったもの。四角が xCOLD GASS サンプル、六角形が Tacconi et al. 2018 サンプル。黒の実線は近傍宇宙での星形成主系列関係 (Elbaz et al. 2007) であり、点線は 1 $\sigma$  のばらつきを表す。

## **3.3 Merger** 段階による形態分類

#### 3.3.1 分類基準

1.2 章で述べたように、星形成が活発化する要因の一つは銀河同士の相互作用であると考えられている。赤方偏移が低い星形成銀河では、シミュレーションと観測の両方で伴銀河との距離が近いほど *sSFR* が増強されるという結果が一致することが確認されている (Patton et al. 2020)。そこで PARADISES 銀河について、星形成の原材料である分子ガスと銀河相互作用の関係を調べるため、PARADISES 銀河を形態に基づき以下のような基準で分類した。

**Phase 0** 単一の核を持つ銀河

Phase 1 2つの銀河が見えるが銀河同士は離れていおり、tidal feature などは見られないもの

Phase 2 複数の核が見え、tidal tail など銀河同士が衝突中である様子が見えるもの

Phase 3 単一の核を持つが Tidai tail が見えるなど不規則な形をしている銀河

この基準は、phase 0 は孤立した銀河、phase 1 は衝突前の銀河、phase 2 は衝突中の銀河、phase 3 は合体後期にある銀河であるという想定に基づくものである。分類において、Galaxy Zoo 1 カタ ログ (Lintott et al. 2011) にデータがある天体については、そのデータから分類を確定した。その 他については、SDSS イメージおよび PanSTARRS イメージを参照し、目視で分類を行なった。特 に phase 1 については、実際の距離は離れている銀河同士が重なって見えているものを間違って分 類してしまう可能性が高い。そのため、NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)<sup>6)</sup>の速度情報 を用いて、視線速度が 1000 kms<sup>-1</sup> 以下、かつ Larson et al. 2016 に従って projeted separations が 75 kpc 以下である場合に実際に接近した銀河同士であると判断した。また必要な速度情報が得ら れない場合には、SDSS の測光赤方偏移を参照し、photo z がエラーを含めた範囲内に重なる銀河に ついては、同じ領域内に存在していると判断した。

#### 3.3.2 形態分類結果

PARADISES 銀河を merger の段階別に分類した結果を以下の図 19 に示した。天体の画像は全て PanSTARRS イメージである。Merger phase 0 に 11 天体、phase 1 に 10 天体、phase 2 に 11 天体、 phase 3 に 10 天体が分類され、PARADISES 銀河のうち約 4 分の 3 は相互作用しており、半数は合 体中の天体であることが分かった。Merger phase ごとの PARADISES 銀河の割合を、二つの赤外 線光度ビン (log ( $L_{IR}/L_{\odot}$ ) < 11.5, log ( $L_{IR}/L_{\odot}$ ) ≥ 11.5) に分けて図 20 に示した。サンプル数を考 慮すると、赤外線光度による形態の割合について統計的に有意な違いを主張することはできない。 先行研究では赤外線光度が 10<sup>11.5</sup>  $L_{\odot}$  以上では phase 2, 3 にあたる合体中の天体が支配的であった のに対し、PARADISES 銀河では 10<sup>11.5</sup>  $L_{\odot}$  以上でも phase 0, 1 が半数程度を占めている。ただし

<sup>6)</sup> https://ned.ipac.caltech.edu/

phase 3 の割合は約 13% から 30% に増加している。PARADISES 銀河において ULIRG は 2 天体 (Par6-05, Par6-10) のみであり、それぞれ phase 1, 3 に分類されている。LIRG については相互作用 していない銀河から合体の最終段階にあると思われる銀河まで存在している。

近傍 U/LIRG における赤外線光度と形態の割合の関係を統計的に調べるためためには、今後幅 広い赤外線光度と形態で U/LIRG のサンプル数を増やす必要がある。



図 19: PARADISES 銀河の形態分類結果。全て PanSTARRS イメージ。



図 20: PARADISES 銀河の merger fraction.

#### 3.4 AGN diagnosis

PARADISES 銀河において、AGN の活動が分子ガスに影響を与えているかを調べるため、2通 りの方法で AGN 診断を行った。図 21 では BPT diagram 上での PARADISES 銀河の分布を、分子 ガス比によって色分けして示した。この際可視光の輝線データは、SDSS DR7 MPA/JHU catalog を用いた。ここでは9天体が AGN host 銀河、19天体が composite 銀河、13天体が star forming 銀 河と分類されている。xCOLD GASS サンプルでは AGN host の方が分子ガス比が低いという傾向 が見えていたのに対して、PARADISES 銀河では AGN の有無による分子ガス比の傾向は見えない ことが図 21 から分かる。

図 22 は Mateos et al. 2012 によって提案された、Widefield Infrared Survey Explorer (WISE; Wright et al. 2010)の 3.4  $\mu$ m (W1), 4.6  $\mu$ m (W2), 12  $\mu$ m (W3) バンドを用いた AGN 診断である。 ここで、黒の実線で囲まれた領域内の天体が AGN host 銀河として選ばれている。また、BPT diagram で AGN host, composite, star forming と分類された銀河をそれぞれ赤、緑、青のシンボル で示した。BPT diagram で選ばれた AGN host 銀河は composite 銀河や star forming 銀河と比べて W1 - W2 color が赤いものが多いが、WISE color でも AGN host であると選ばれているのは 3 天 体のみである。このことから、今回行った 2 通りの方法では BPT diagram による分類がより暗い AGN まで選ぶことができていると考え、以降の議論では BPT diagram による分類を採用する。



図 21: BPT diagram 上での PARADISES 銀河の分布。分子ガス比の大きさによって色分けされている。黒 丸は PARADISES 銀河の CO(1-0) 輝線が検出されなかったもの。黒の実線は Kewley et al. 2001 によ る theoretical relation, 破線は Kauffmann et al. 2003 による empirical relation である。



**図 22:** WISE color による AGN selection (Mateos et al. 2012)。黒の実線で囲まれた領域内の天体が AGN host 銀河として選ばれている。各シンボルの種類は BPT diagram による分類を表しており、赤丸が AGN host, 緑の三角が Composite, 青の四角が SFG である。

## 4 議論

## 4.1 銀河相互作用による星形成活動への影響

PARADISES 銀河における、merger phase に沿った specific star formation rate ( $sSFR = SFR/M_*$ ), 分子ガス比 ( $f_{H_2} = M_{H_2}/M_*$ ), depletion time ( $t_{dep} = M_{H_2}/SFR$ )の変化を図 23 に示した。また表4は各 merger phase における sSFR,  $f_{H_2}$ ,  $t_{dep}$  の中央値を示している。図 23 において、 sSFR,  $f_{H_2}$  については、phase 0 から phase 2 で少し増加している傾向が見られる。一方  $t_{dep}$  は merger phase を通してあまり変化が見られない。ここから、銀河の合体によって星形成に利用できる分子ガスが増加することで星形成が活発になると考えることができ、銀河合体はガスの星形成効率ではなく量に影響を与える可能性が示唆される。分子ガス比が増加する原因としては、合体の過程で原子ガスが銀河の中心領域に集められ、効率良く分子ガスに変換されるということが考えられる(Larson et al. 2016; Kaneko et al. 2017)。また合体後期 (phase 3) にて sSFR,  $f_{H_2}$  が低下している原因としては、スターバーストや AGN 活動によるガスの消費が考えられる。

ただ、これらの議論についての統計的有意性は十分ではない。Merger phase における *sSFR*, *f*<sub>H2</sub>の増加について統計的に有意な差を示すためには、今後幅広い形態でサンプル数を増やすこと が求められる。



**図 23:** PARADISES 銀河における merger phase に沿った *sSFR*, *f*<sub>H<sub>2</sub></sub>, *t*<sub>dep</sub> の変化。黒い四角とそのエラー バーは各 phase での中央値とそのエラーである。

Merger phase	$\log(sSFR \ (yr^{-1}))$	$\log(f_{H_2})$	$\log(t_{dep} (yr))$
Phase 0	$-9.38\pm0.075$	$-0.733 \pm 0.082$	$8.56 \pm 0.0425$
Phase 1	$-9.14\pm0.096$	$-0.670\pm0.13$	$8.49 \pm 0.056$
Phase 2	$-9.10\pm0.11$	$-0.45\pm0.15$	$8.53 \pm 0.074$
Phase 3	$-9.34\pm0.089$	$-0.646\pm0.12$	$8.55 \pm 0.078$

表4:各 merger phase における sSFR,  $f_{H_2}$ ,  $t_{dep}$  の中央値

## 4.1.1 HI data

銀河合体の過程で原子ガスが効率良く分子ガスに変換されることで星形成が活発化している場合、合体過程で原子ガスの割合は減少しているという可能性が考えられる。Mirabel and Sanders 1989 や Lisenfeld et al. 2019 では、合体の過程で  $H_2/H_I$  質量比が増加するということが研究されている。Lisenfeld et al. 2019 では、相互作用・合体のサインが見られる銀河ペアは相互作用の兆候が見られない銀河ペアと比較して  $H_2/H_I$  質量比、分子ガス比、トータルガスの星形成効率  $(SFE_{gas} = SFR/(M_{H_2} + M_{H_I}))$  が高く、さらにその傾向は渦巻銀河と楕円銀河のペアより渦巻銀河同士のペアで強いという結果が示されている。

PARADISES 銀河について merger phase に沿った HI ガス量の違いを調べるため、The ALFALFA Extragalactic HI Source Catalog<sup>7)</sup> (Haynes et al. 2018) と PARADISES 銀河のカタログマッチング を行った。ALFALFA catalog は、Arecibo Legacy Fast ALFA (ALFALFA) Survey (Giovanelli et al. 2005) で検出された z < 0.06 の銀河系外 HI 21 cm line 天体約 31,500 個についてのカタログである。

**PARADISES 銀河** PARADISES 銀河のうち、6 天体が ALFALFA catalog とマッチした。 ALFALFA Survey のサーベイ領域内にあり、かつz < 0.06の PARADISES 銀河は7天体であった ため、HI が検出されていない天体は1天体のみであった。表5にマッチした天体の ID, merger phase, Arecibo General Catalog (AGC)の entry number, HI ガス質量を示した。

ID	Merger phase	AGC ID	$\log(M_{H_I})$
Par1-01	3	221446	$10.34\pm0.05$
Par1-03	2	201645	$10.14\pm0.06$
Par1-06	1	231578	$10.00\pm0.05$
Par1-10	0	261563	$10.34\pm0.05$
Par3-04	1	261393	$10.35\pm0.05$
Par5-03	0	210933	$10.01\pm0.05$

表 5: PARADISES 銀河の HI ガス質量

**xCOLD GASS サンプル** Merger phase と HI ガスの関係をより多くのサンプルで調べるため、 xCOLD GASS サンプルのうち  $SFR - M_*$  平面上で PARADISES 銀河と同じ範囲に位置する天体 (main sequence より上に位置し、 $M_* \ge 10^{10}$  M<sub>☉</sub> である天体) について ALFALFA catalog とのカ タログマッチングを行った。 マッチした 23 天体 (xCG-high サンプルと呼ぶ) について、SDSS name, merger phase, AGC entry number, HI ガス質量を表 6 に示した。形態分類された xCG-high サンプルのイメージは図 24 に示した。この時、形態分類の基準は第 3.3.1 章と同様である。また、 PARADISES 銀河と xCG-high サンプルの  $SFR - M_*$  平面での HI ガス比  $f_{HI}$  の変化を図 25 に示 した。PARADISES 銀河のうち HI の検出があるのは SFR が低い天体が多い。HI ガス比が高い天 体は低質量側 ( $M_* \sim 10^{10}$  M<sub>☉</sub>) に多いことが分かる。

<sup>7)</sup> https://egg.astro.cornell.edu/alfalfa/data/index.php

SDSS name	Merger phase	AGC ID	$\log(M_{H_I})$
J014143.18+134032.8	0	729616	$9.65\pm0.07$
J124054.96 + 080323.2	0	226462	$9.89 \pm 0.06$
J231316.47+145415.6	0	330115	$9.86 \pm 0.05$
J075641.84 + 175928.2	0	170959	$10.42\pm0.05$
J080741.39 + 255531.0	0	182927	$10.22\pm0.05$
J085857.78 + 285406.0	0	721344	$10.13\pm0.05$
J090459.97+282051.8	0	194255	$10.08\pm0.06$
J091954.54+325559.8	2	4947	$10.16\pm0.06$
J093026.66 + 274632.0	0	191232	$10.31\pm0.05$
J095908.76+130333.6	1	190317	$10.32\pm0.05$
J110949.30+124617.3	2	6206	$10.58\pm0.05$
J113116.03+043908.7	0	212260	$10.14\pm0.05$
J122312.26+142320.2	0	220480	$10.33\pm0.05$
J125125.64 + 035159.5	3	225421	$9.99 \pm 0.06$
J135156.88 + 291844.6	0	230764	$9.46\pm0.06$
J140008.99+040450.8	0	230915	$9.69\pm0.06$
J140205.90 + 260339.1	0	231607	$10.10\pm0.05$
J140312.00+344104.5	0	241333	$9.13\pm0.08$
J141814.91 + 005328.0	0	9147	$10.14\pm0.05$
J143518.37+350707.2	0	240495	$9.80\pm0.05$
J143525.34+002003.6	0	240492	$10.13\pm0.05$
J144434.33+085613.5	0	240645	$9.55\pm0.07$
J150517.88+080912.7	3	253937	$9.82\pm0.06$

**表 6:** xCG-high サンプルの HI ガス質量


**図 24:** xCG-high サンプルの形態分類結果



 図 25: SFR – M<sub>\*</sub> 平面での f<sub>HI</sub> の変化。色付きの丸が PARADISES-HI detect サンプルであり、黒丸は HI の検出がなかった PARADISES 銀河、グレーの丸は観測の範囲外であった PARADISES 銀河である。 色付きの四角は xCG-high サンプルで、小さいグレーの四角はその他の xCOLD GASS サンプル。全 て CO(1-0) 輝線が検出された天体である。黒の実線は近傍宇宙での星形成主系列関係 (Elbaz et al. 2007) であり、点線は 1σ のばらつきを表す。

#### 4.1.2 合体過程での原子ガス量と分子ガス量

PARADISES-HI detect サンプルと xCG-high サンプルにおける merger phase に沿った  $f_{H_2}$ ,  $f_{H_I}$  の変化を図 26,  $H_2/H_I$  比,  $t_{dep}(gas)$  の変化を図 27 に示した。ここで  $f_{HI} = M_{H_I}/M_*$ ,  $t_{dep}(gas) = (M_{H_2} + M_{H_I})/SFR$  である。また phase 0 については中央値とそのエラーをダイヤの シンボルで示した。今回使用したデータは各 phase のサンプル数が少ないため merger phase ごと のガスの傾向を議論することは難しいが、分子ガス比は phase 0 から phase 2 にかけて少し増加す る傾向が見られたことに対して、原子ガス比は merger phase を通してあまり変化が見られないこ とが図 26 から分かる。Phase 1 から phase 3 では  $H_2/H_I$  比が増加していることから、合体過程で 原子ガスが効率良く分子ガスに変換されることで  $H_2/H_I$  比が増加するという可能性はあるが、こ の確証を得るためにはより多くのサンプルを得る必要がある。またトータルガスの depletion time は merger phase を通してあまり変化が見られない。合体過程で原子ガスが変換されることで分子 ガス比が増加する場合、原子ガス比の変化が見られないことから、合体過程で原子ガスの流入があ る可能性が示唆される。Kewley et al. 2010 では、近接ペア銀河では孤立銀河と比べて金属量勾配 がフラットであり、これは金属量が低い原子ガスが周辺から流入するためであると研究されてい る。今回の結果はこれに矛盾しないものである。

今後、銀河の合体過程での原子ガス、分子ガス量と星形成の関係をより詳細に調べるためには、 より多くのサンプルについて HI データが必要である。また、形態分類の際により限界等級が深い イメージを用いることで、より正確な分類が可能になると考えられる。今回は merger phase のみ を考慮して分類したが、ペア銀河について楕円銀河と渦巻銀河の区別や、質量比を考慮して分類す ることで、相互作用による星形成への影響がより詳しく理解できるかもしれない。



**図 26:** Merger phase に沿った *f<sub>H2</sub>*, *f<sub>HI</sub>* の変化。丸が PARADISES-HIdetect サンプル、小さい丸はその他の PARADISES 銀河で、白抜きの四角は xCG-high サンプルである。白抜きのダイヤとそのエラーバー は phase 0 での中央値とそのエラーである。



**図 27:** HI 検出サンプルにおける merger phase に沿った *H*<sub>2</sub>/*HI* 比, *t*<sub>dep</sub>(gas) の変化。丸が PARADISES-HIdetect サンプル、白抜きの四角が xCG-high サンプルである。白抜きのダイヤとそのエラーバーは phase 0 での中央値とそのエラーである。

#### 4.2 AGN 活動による近傍 U/LIRGs の星形成活動への影響

BPT diagram に基づいて分類された PARADISES 銀河における  $sSFR \ge f_{H_2}$ ,  $sSFR \ge t_{dep}$ の 関係を図 28 に示した。 $sSFR \ge f_{H_2}$  には強い相関があり、AGN host, composite, SFG でこの関係 に違いは見られないことが図 28 から分かる。 $t_{dep}$  も同様に、AGN の有無による違いは見られな い。この結果は、U/LIRGs のような激しい星形成を行うフェーズでは、AGN 活動によって分子 ガス比と sSFR は低下しないということを示している。この結果の原因として挙げられるのは、 PARADISES 銀河の AGN は点火されて間もないために分子ガスが AGN feedback の影響を受けて いない、ということである。

図 29 は、Hopkins et al. 2008 によるガスが豊富な major merger を経て成長する銀河のシナリ オであり、銀河の成長過程でのシミュレーションによる星形成率と AGN 光度の変化が示され ている。PARADISES 銀河は log SFR (M<sub>☉</sub> yr<sup>-1</sup>) ~ 1 以上の星形成率が高いサンプルを選んでい る。よって、PARADISES 銀河の merger phase をこのシナリオに当てはめると合体後期にあたる phase 3 は成長段階 (e) までを見ていると考えることができ、AGN は成長途中で feedback によって 周りのガスが吹き飛ばされる前、あるいは途中の段階にあるということが予想される。また図 30 は、図 28 と同様の sSFR と  $f_{H_2}$  の関係が merger phase ごとに分けて示されている。図 30 から、 phase 3 には SFG が存在せず、AGN host と composite のみであることが分かる。これは、合体過 程で AGN が点火されるというシナリオと矛盾しない結果である。ただし今回の結果においては、 全ての AGN host 銀河が merger によって点火されたかは不明である。La Marca et al. 2024 では z<1の銀河における相互作用と AGN の関係についての研究から、銀河合体は特にダストに覆わ れた AGN や明るい AGN と関係しているという結果が示されている。今回のサンプルにおいても merger と AGN の関係を調べるには、より多くの AGN host 銀河サンプルが必要である。またこれ らの銀河について、成長段階が進むと先行研究の結果と同様に AGN host 銀河が低い分子ガス比を 示すのか議論するためには、AGN の有無のみでなく、AGN の光度など AGN の活動をより詳しく 知る必要がある。



**図 28:**  $f_{H_2} - sSFR$  プロット (左),  $t_{dep} - sSFR$  (右) プロット。各シンボルの種類は BPT diagram による分 類を表しており、赤丸が AGN host, 緑の三角が Composite, 青の四角が SFG である。



**図 29:** Hopkins et al. 2008 による、ガスが豊富な major merger を経て成長する銀河のシナリオ。合体過程での *SFR* と AGN 光度の変化が示されている。



**図 30:** Merger phase ごとの f<sub>H2</sub> – sSFR プロット。各シンボルの種類は BPT diagram による分類を表して おり、赤丸が AGN host, 緑の三角が Composite, 青の四角が SFG である。

## 5 SED fitting

銀河のスペクトルエネルギー分布 (SED) は銀河からの電磁波放射の波長 (振動数) ごとの強度分 布であり、銀河を構成する恒星、ガス、ダスト、AGN などの成分と物理状態を推定するために不 可欠である "谷口義明 et al. 2018。本研究では AKARI/FIS による遠赤外線測光値から導出した星 形成率を使用していた。これは、遠赤外線帯では AGN による放射が支配的ではないという前提に 基づくものである (Netzer et al. 2007)。AGN 放射による遠赤外線光度への寄与をより正確に推定 するため、PARADISES 銀河 42 天体について SED fitting を行った。

SED fitting には Code for Investigating Galaxy Emission (CIGALE, Burgarella et al. 2005; Noll et al. 2009; Boquien et al. 2019) の version 2022.1 を使用した。CIGALE は python コードであり、 銀河の far-ultraviolet (FUV) から電波のスペクトルをモデル化し、星形成率、星質量、ダスト光 度など様々な銀河の物理量を推定できる。短波長側でダストに吸収されたエネルギーが MIR か ら FIR で再放射されるという energy balance principle に基づいて、Star formation history (SFH), stellar population, dust attenuation, AGN などを考慮してモデル SED が作成される。モデル SED と photometry をフィッティングさせ、Bayesian を用いて銀河の物理量を推定する。

#### 5.1 Photometry data

SED fitting に使用した FUV から FIR までの測光データについて以下に示す。Galaxy Evolution Explorer (GALEX; Martin et al. 2005) の Far-UV, Near-UV バンド、SDSS の *ugriz* バンド、Two Micron All-Sky Survey (2MASS; Skrutskie et al. 2006) の *JHK<sub>s</sub>* バンド、WISE の 3.3, 4.6, 12, 22  $\mu$ m バンド、AKARI の 65, 90, 140, 160  $\mu$ m バンドの測光データを使用した。各波長の測光データ は、NED より取得した。フラックスエラーが取得できない場合には、フラックスの 50% をフラッ クスエラーとした。また Phase 2 に分類された合体中の銀河について、個々の天体の測光データが 取得できた場合には、それらを足し合わせて一つの合体系としてフィッティングを行った。

### 5.2 パラメータ

SED fitting におけるパラメータ設定を表7に示した。SFH は、以下の式で表される delayed SFH モデルを使用した (Dietrich et al. 2018)。

$$SFR(t) \propto \frac{te^{-t/\tau}}{\tau^2}$$
 (11)

ここで  $\tau$  は main stellar population の e-folding time である。Single stellar population (SSP) モデル として bc03 (Bruzual and Charlot 2003) モデルを使用し、IMF は Chabrier 2003 を仮定した。Dust attenuation については Calzetti et al. 2000 と Leitherer et al. 2002 によるモデル dustatt\_calzleti を使用した。Dust emission は Dale et al. 2014 によるモデル dale2014 を使用した。AGN モデル は、clumpy two-phase torus model である skirtor2016 を使用した (Stalevski et al. 2012, 2016)。 skirtor2016 ではダストの大部分が高密度な clump の形状であり、AGN disk emission の異方性が 考慮されている (Yang et al. 2020)。

より正確なモデル作成のために、設定したパラメータのうちのいくつかを変化させた。これに よって 6468000 通りのモデルについて  $\chi^2$  が計算され、最適な SED モデルと推定された物理量が得 られた。

表 7: CIGALE による SED fitting で使用したパラメータ

Model	Parameter	Value
sfhdelayed	tau_main $(10^6 \text{ years})$	50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000.0, 2000.0, 3000.0, 5000.0
	age_main $(10^6 \text{ years})$	50, 100, 200, 500, 1000, 3000, 5000
	tau_burst (10 <sup>6</sup> years)	50
	age_burst (10 <sup>6</sup> years)	20
	f_burst $(10^6 \text{ years})$	0.0, 0.01, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3
bc03	imf	1 (Chabrier)
	metallicity	0.02
nebular	logU	-2.0
	f_esc	0.0
	f_dust	0.0
	lines_width $({\rm km}~{\rm s}^{-1})$	300.0
dustatt_calzleti	E_BVs_young	0.01,  0.05,  0.1,  0.3,  0.5,  0.7,  1,  1.5
	E_BVs_old_factor	1.0
	$\texttt{uv\_bump\_wavelength}~(nm)$	217.5
	$\texttt{uv\_bump\_width}\;(nm)$	35.0
	uv_bump_amplitude	0.0
	powerlaw_slope	0.0
	filters	B B90, V B90, FUV
dale2014	alpha	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
	fracAGN	0.0
skirtor2016	i	30, 70
	fracAGN	0,  0.1,  0.2,  0.3,  0.4,  0.5,  0.6,  0.7,  0.8,  0.9,  0.99
	EBV	0, 0.03, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 1.8, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5
redshifting	redshift	

## 5.3 結果

PARADISES 銀河 42 天体についての CIGALE による SED モデルを付録 B に示した。また、 SED fitting より推定された各天体の *SFR* と AGN fraction を表 8 に示した。ここで AGN fraction は、全赤外線光度に対する AGN の赤外線光度の割合である。

 $\log SFR_{SED} (M_{\odot} \text{ yr}^{-1})$ ID AGN fraction Par-h2 12.28  $0.10\,\pm\,0.02$ Par-h3  $0.09\,\pm\,0.03$ 8.43Par-h4  $0.59\,\pm\,0.07$ 0.94Par-h6  $0.10\,\pm\,0.0004$ 31.83Par-m4  $0.10\,\pm\,0.02$ 8.19 Par1-01  $0.10\,\pm\,0.002$ 20.99Par1-02 $0.51\,\pm\,0.06$ 34.26 $0.10\,\pm\,5\,\times 10^{-7}$ Par1-03 4.77Par1-06 $0.20\,\pm\,0.04$ 15.78Par1-07  $0.26\,\pm\,0.07$ 17.05Par1-10  $0.084\,\pm\,0.4$ 1.68Par2-01  $0.057\,\pm\,0.05$ 29.23Par2-02  $0.10\,\pm\,0.002$ 48.25Par2-03  $0.57\,\pm\,0.1$ 0.31Par2-05 $0.22\,\pm\,0.1$ 7.19Par2-07  $0.008\,\pm\,0.03$ 10.0 $5.5~{\times}10^{-5}$ Par2-09 34.66Par2-10  $0.00077 \pm 0.0009$ 22.27 $0.10\,\pm\,0.006$ Par3-01 5.78Par3-02  $0.31\,\pm\,0.06$ 28.18 $0.046\,\pm\,0.05$ Par3-04 7.0Par3-06  $0.48 \pm 0.06$ 3.48Par3-08  $0.097\,\pm\,0.02$ 18.17Par3-09  $0.39\,\pm\,0.03$ 0.22Par4-01b  $0.41\,\pm\,0.04$ 13.29Par4-03  $0.21\,\pm\,0.03$ 0.83Par4-04  $0.023\,\pm\,0.09$ 0.9Par4-05  $0.40\,\pm\,0.27$ 0.39Par4-08  $0.004\,\pm\,0.04$ 0.41 $0.10\,\pm\,0.07$ Par5-0118.93 $0.21\,\pm\,0.03$ Par5-02 10.72 $7.28 \times 10^{-10}$ Par5-03 11.45Par5-05  $0.16\,\pm\,0.05$ 34.85Par5-06  $0.50\,\pm\,0.02$ 0.55

表 8: PARADISES 銀河の SED fitting より推定された物理量一覧

ID	AGN fraction	$\log SFR_{SED} (M_{\odot} yr^{-1})$
Par5-07	$0.051\pm0.05$	19.94
Par5-09	$0.10\pm0.02$	13.45
Par6-01	$0.11\pm0.04$	33.62
Par6-02	$0.059 \pm 0.05$	38.50
Par6-03	$0.016 \pm 0.08$	16.66
Par6-05	$0.19\pm 0.05$	46.74
Par6-10	$0.093\pm0.03$	49.88

SED fitting により推定された各天体の SFR を用いて、PARADISES 銀河における  $sSFR \ge f_{H_2}$ ,  $sSFR \ge t_{dep}$  の関係を図 31 に示した。いくつかの天体、特に AGN host, composite と分類された 天体では、sSFR は遠赤外線測光値から導出した値と比べて大幅に下がっていることが分かる。こ の結果は、AGN host 銀河では遠赤外線測光値から星形成率を正確に見積もることができない可能 性を示唆するものである。



**図 31:**  $f_{H_2} - sSFR$  プロット (左),  $t_{dep} - sSFR$  (右) プロット。各シンボルの種類は BPT diagram による分類を表しており、赤丸が AGN host, 緑の三角が Composite, 青の四角が SFG である。

図 32 は BPT diagram, 図 33 は WISE color による AGN 診断であり、各天体は SED fitting によ り推定された AGN fraction で色分けされている。どちらの診断においても、AGN host と分類され る天体は AGN fraction が 0.2 を超えるものが多い。一方、BPT diagram において SFG と分類さ れる天体にも AGN fraction が高い天体が存在している。これは、PARADISES 銀河において BPT diagram では正確に AGN host 銀河を選択できていない可能性を示唆している。 ただ、photometry data が足りていない天体があることや天体ごとの photometry data の扱い方 などを含めて、今回の SED がどれほど信頼できるものであるかを確かめる必要がある。その上で、 より正確に星形成率を推定する方法を考えるのが今後の課題である。



図 32: BPT diagram 上での PARADISES 銀河の分布。AGN fraction によって色分けされている。黒丸は PARADISES 銀河の CO(1-0) 輝線が検出されなかったもの。黒の実線は Kewley et al. 2001 による theoretical relation, 破線は Kauffmann et al. 2003 による empirical relation である。



**図 33:** WISE color による AGN selection (Mateos et al. 2012)。AGN fraction によって色分けされている。 黒の実線で囲まれた領域内の天体が AGN host 銀河として選ばれている。各シンボルの種類は BPT diagram による分類を表しており、赤丸が AGN host, 緑の三角が Composite, 青の四角が SFG である。

## 6 まとめ

本研究では、野辺山 45 m 電波望遠鏡による近傍 U/LIRG 51 天体の CO(1-0) 輝線観測の結果を まとめた。

観測された CO luminosity から銀河の分子ガス質量を導出し、分子ガス量と銀河の特性の関係に ついて先行研究サンプルとの比較を行った。そして、近傍 U/LIRG における相互作用と星形成活 動の関係を調べるため、形態に基づいて合体段階ごとの分類を行った。また、可視光での輝線比を 用いた AGN の診断に基づき、AGN の存在が U/LIRG の星形成活動に与える影響を調べた。

- CO(1-0) 輝線は観測された 51 天体のうち 42 天体で検出された。CO luminosity から分子ガ ス質量を導出する際の CO – H<sub>2</sub> コンバージョンファクター ( $\alpha_{CO}$ ) は金属量に依存する値を 採用し、金属量は mass-metallicity relation から求めた。導出された分子ガス質量の範囲は、  $1.705 - 52.82 \times 10^9 M_{\odot}$  である。
- 本研究のサンプル天体である PARADISES 銀河は、main sequence 上のノーマル銀河と比較 して分子ガス比が高く、depletion time が短い。これは PARADISES 銀河が星形成が活発な U/LIRG であることから予測されることであり、先行研究と矛盾しない結果である。
- PARADISES 銀河のうち約4分の3は相互作用しており、半数は合体中の銀河であることが確認できた。そして分子ガス比と sSFR が合体の過程でわずかに増加していたことから、銀河 合体は分子ガス量の増加に寄与することで、星形成が活発になるという可能性が示唆された。
- PARADISES 銀河では、分子ガス比と星形成効率に AGN の有無による違いは見られなかっ た。これはノーマル銀河での結果と異なるものであり、U/LIRG のように爆発的星形成を行う フェーズにある銀河では、AGN 活動によって分子ガス比と *sSFR* が低下しないことを示す結 果である。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である本原顕太郎教授には数多くのご指導と助言をいただき ました。天文学の知識がなかった私に根気強く親身に指導していただき、研究の進め方や考え方に ついて沢山学ばせて頂きました。また研究会に参加する機会や他の研究者の方々と議論する機会を 作っていただいたことで、見識を深めることができました。ここに深く感謝申し上げます。

SWIMS チームの小西真広氏、高橋英則氏、加藤夏子氏、櫛引洸佑氏には研究について数多くの 助言をいただき、また普段の学生生活においても非常にお世話になりました。ここに感謝申し上げ ます。

国立天文台・天文データセンターの小山舜平氏には、本研究の解析手法や研究の進め方について 熱心なご指導をいただきました。ここに感謝申し上げます。

国立天文台ハワイ観測所の小山佑世准教授には、研究について数多くの助言をいただきました。 ここに感謝申し上げます。

また本原研究室の陳諾氏、Yun Jeung 氏、幸野友哉氏、藤井扇里氏、田中健翔氏、研究室 OB の 穂満星冴氏には日々の研究生活で大変お世話になりました。心より感謝いたします。

国立天文台・先端技術センターの東谷千比呂氏には、日々の様々な場面で大変お世話になりました。 心より感謝いたします。

最後に、これまでの研究生活を支えていただいた家族と友人に深く感謝いたします。

# 付録 A Best fitting SED model

PARADISES 銀河 42 天体についての CIGALE による SED モデルを以下に示す。



🛛 34: Par-h2



🗷 35: Par-h3



🗷 36: Par-h4



🗷 37: Par-h6



🛛 **38:** Par-m4



**⊠ 40:** Par1-02



🛛 41: Par1-03



🛛 42: Par1-06



🗷 43: Par1-07



🛛 44: Par1-10



🛛 45: Par2-01



🛛 46: Par2-02





🛛 48: Par2-05



🗷 49: Par2-07



🗷 50: Par2-09



🗷 51: Par2-10



🗷 52: Par3-01



🗷 53: Par3-02



🗷 54: Par3-04



🗵 55: Par3-06



🗵 56: Par3-08



🗷 58: Par4-01b



**⊠ 60:** Par4-04





0

-1

 $10^{0}$ 



10<sup>2</sup>

🗷 62: Par4-08

Observed  $\lambda$  ( $\mu$ m)



🗷 63: Par5-01



🗷 64: Par5-02





🗷 66: Par5-05



🗷 68: Par5-07



🗷 69: Par6-01



**⊠ 70:** Par6-02



🗵 71: Par6-03



**Z 72:** Par6-03



🗵 74: Par6-10

Observed  $\lambda$  ( $\mu$ m)

## 参考文献

- Lee Armus, JM Mazzarella, AS Evans, JA Surace, DB Sanders, K Iwasawa, DT Frayer, JH Howell, Ben Chan, A Petric, et al. Goals: the great observatories all-sky lirg survey. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 121(880):559, 2009.
- Jack A Baldwin, Mark M Phillips, and Roberto Terlevich. Classification parameters for the emissionline spectra of extragalactic objects. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 93 (551):5, 1981.
- Joshua E Barnes and Lars Hernquist. Transformations of galaxies. ii. gasdynamics in merging disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, 471(1):115, 1996.
- Amber Bauermeister, Leo Blitz, A Bolatto, Martin Bureau, P Teuben, Tony Wong, and M Wright. The egnog survey: Gas excitation in normal galaxies at z ≈ 0.3. The Astrophysical Journal, 763 (1):64, 2013.
- Alberto D Bolatto, Mark Wolfire, and Adam K Leroy. The co-to-h2 conversion factor. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 51(1):207–268, 2013.
- M Boquien, D Burgarella, Y Roehlly, V Buat, L Ciesla, D Corre, AK Inoue, and H Salas. Cigale: a python code investigating galaxy emission. *Astronomy & Astrophysics*, 622:A103, 2019.
- Gustavo Bruzual and Stephane Charlot. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 344(4):1000–1028, 2003.
- Denis Burgarella, Veronique Buat, and Jorge Iglesias-Paramo. Star formation and dust attenuation properties in galaxies from a statistical ultraviolet-to-far-infrared analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 360(4):1413–1425, 2005.
- Daniela Calzetti, Lee Armus, Ralph C Bohlin, Anne L Kinney, Jan Koornneef, and Thaisa Storchi-Bergmann. The dust content and opacity of actively star-forming galaxies. The Astrophysical Journal, 533(2):682, 2000.
- Gilles Chabrier. Galactic stellar and substellar initial mass function1. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 115(809):763, 2003.
- Daniel A Dale, George Helou, Georgios E Magdis, Lee Armus, Tanio Díaz-Santos, and Yong Shi. A two-parameter model for the infrared/submillimeter/radio spectral energy distributions of galaxies and active galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, 784(1):83, 2014.
- Jeremy Dietrich, Aaron S Weiner, Matthew LN Ashby, Christopher C Hayward, Juan Rafael Martínez-Galarza, Andrés F Ramos Padilla, Lee Rosenthal, Howard A Smith, S.P Willner, and Andreas Zezas. The agn luminosity fraction in merging galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480(3):3562–3583, 2018.
- David Elbaz, E Daddi, D Le Borgne, M Dickinson, DM Alexander, R-R Chary, J-L Starck, WN Brandt, M Kitzbichler, E MacDonald, et al. The reversal of the star formation-density relation

in the distant universe. Astronomy & Astrophysics, 468(1):33-48, 2007.

- Reinhard Genzel, LJ Tacconi, Dieter Lutz, Amélie Saintonge, S Berta, Benjamin Magnelli, Françoise Combes, Santiago García-Burillo, Roberto Neri, A Bolatto, et al. Combined co and dust scaling relations of depletion time and molecular gas fractions with cosmic time, specific star-formation rate, and stellar mass. *The Astrophysical Journal*, 800(1):20, 2015.
- Riccardo Giovanelli, Martha P Haynes, Brian R Kent, Philip Perillat, Amelie Saintonge, Noah Brosch, Barbara Catinella, G Lyle Hoffman, Sabrina Stierwalt, Kristine Spekkens, et al. The arecibo legacy fast alfa survey. i. science goals, survey design, and strategy. *The astronomical journal*, 130(6):2598, 2005.
- Sebastian Haan, Jason A Surace, Lee Armus, Aaron S Evans, Justin H Howell, Joseph M Mazzarella, Dong-Chan Kim, Tatjana Vavilkin, Hanae Inami, David B Sanders, et al. The nuclear structure in nearby luminous infrared galaxies: Hubble space telescope nicmos imaging of the goals sample. *The Astronomical Journal*, 141(3):100, 2011.
- Martha P Haynes, Riccardo Giovanelli, Brian R Kent, Elizabeth AK Adams, Thomas J Balonek, David W Craig, Derek Fertig, Rose Finn, Carlo Giovanardi, Gregory Hallenbeck, et al. The arecibo legacy fast alfa survey: The alfalfa extragalactic h i source catalog. *The Astrophysical Journal*, 861 (1):49, 2018.
- Philip F Hopkins, Lars Hernquist, Thomas J Cox, and Dušan Kereš. A cosmological framework for the co-evolution of quasars, supermassive black holes, and elliptical galaxies. i. galaxy mergers and quasar activity. The Astrophysical Journal Supplement Series, 175(2):356, 2008.
- Chao-Ling Hung, DB Sanders, Caitlin M Casey, Michael Koss, Kirsten L Larson, Nicholas Lee, Yanxia Li, Kelly Lockhart, Hsin-Yi Shih, Joshua E Barnes, et al. A comparison of the morphological properties between local and z 1 infrared luminous galaxies: Are local and high-z (u) lirgs different? *The Astrophysical Journal*, 791(1):63, 2014.
- Hiroyuki Kaneko, Nario Kuno, Daisuke Iono, Yoichi Tamura, Tomoka Tosaki, Kouichiro Nakanishi, and Tsuyoshi Sawada. Properties of molecular gas in galaxies in the early and mid stages of interaction. ii. molecular gas fraction. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 69(4):66, 2017.
- Guinevere Kauffmann, Timothy M Heckman, Christy Tremonti, Jarle Brinchmann, Stéphane Charlot, Simon DM White, Susan E Ridgway, Jon Brinkmann, Masataka Fukugita, Patrick B Hall, et al. The host galaxies of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 346 (4):1055–1077, 2003.
- Lisa J Kewley, Michael A Dopita, RS Sutherland, CA Heisler, and J Trevena. Theoretical modeling of starburst galaxies. *The Astrophysical Journal*, 556(1):121, 2001.
- Lisa J Kewley, David Rupke, H Jabran Zahid, Margaret J Geller, and Elizabeth J Barton. Metallicity gradients and gas flows in galaxy pairs. *The Astrophysical Journal Letters*, 721(1):L48, 2010.
- Shuhei Koyama, Yusei Koyama, Takuji Yamashita, Masao Hayashi, Hideo Matsuhara, Takao Naka-
gawa, Shigeru V Namiki, Tomoko L Suzuki, Nao Fukagawa, Tadayuki Kodama, et al. Do galaxy morphologies really affect the efficiency of star formation during the phase of galaxy transition? *The Astrophysical Journal*, 874(2):142, 2019.

- A La Marca, B Margalef-Bentabol, L Wang, F Gao, AD Goulding, G Martin, V Rodriguez-Gomez, SC Trager, G Yang, R Davé, et al. Dust and power: Unravelling the merger-active galactic nucleus connection in the second half of cosmic history. Astronomy & Astrophysics, 690:A326, 2024.
- Kirsten L Larson, David B Sanders, Joshua E Barnes, Cathy M Ishida, Aaron S Evans, Joseph M Mazzarella, D-C Kim, George C Privon, I Felix Mirabel, Heather A Flewelling, et al. Morphology and molecular gas fractions of local luminous infrared galaxies as a function of infrared luminosity and merger stage. *The Astrophysical Journal*, 825(2):128, 2016.
- Claus Leitherer, I-Hui Li, Daniela Calzetti, and Timothy M Heckman. Global far-ultraviolet (912-1800 å) properties of star-forming galaxies. The Astrophysical Journal Supplement Series, 140(2): 303, 2002.
- Chris Lintott, Kevin Schawinski, Steven Bamford, Anže Slosar, Kate Land, Daniel Thomas, Edd Edmondson, Karen Masters, Robert C Nichol, M Jordan Raddick, et al. Galaxy zoo 1: data release of morphological classifications for nearly 900 000 galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 410(1):166–178, 2011.
- Ute Lisenfeld, Cong Kevin Xu, Yu Gao, Donovan L Domingue, Chen Cao, Min S Yun, and Pei Zuo.
  Co observations of major merger pairs at z= 0: molecular gas mass and star formation. Astronomy & Astrophysics, 627:A107, 2019.
- D Christopher Martin, James Fanson, David Schiminovich, Patrick Morrissey, Peter G Friedman, Tom A Barlow, Tim Conrow, Robert Grange, Patrick N Jelinsky, Bruno Milliard, et al. The galaxy evolution explorer: a space ultraviolet survey mission. *The Astrophysical Journal*, 619(1):L1, 2005.
- Silvia Mateos, Almudena Alonso-Herrero, Francisco J Carrera, A Blain, Michael Geoffrey Watson, Xavier Barcons, Valentina Braito, Paola Severgnini, Jennifer L Donley, and Daniel Stern. Using the bright ultrahard xmm-newton survey to define an ir selection of luminous agn based on wise colours. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 426(4):3271–3281, 2012.
- Chris Mihos and Lars Hernquist. Gasdynamics and starbursts in major mergers. arXiv preprint astro-ph/9512099, 1995.
- IF Mirabel and DB Sanders. The ratio of molecular to atomic gas in infrared luminous galaxies. Astrophysical Journal, Part 2-Letters (ISSN 0004-637X), vol. 340, May 15, 1989, p. L53-L56. Research supported by NASA IRAS Extended Mission Program., 340:L53–L56, 1989.
- Hagai Netzer, Dieter Lutz, Mario Schweitzer, Alessandra Contursi, Eckhard Sturm, Linda J Tacconi, Sylvain Veilleux, D-C Kim, David Rupke, Andrew J Baker, et al. Spitzer quasar and ulirg evolution study (quest). ii. the spectral energy distributions of palomar-green quasars. *The Astrophysical Journal*, 666(2):806, 2007.
- KG Noeske, BJ Weiner, SM Faber, C Papovich, DC Koo, RS Somerville, K Bundy, CJ Conselice,

JA Newman, D Schiminovich, et al. Star formation in aegis field galaxies since z=1.1: the dominance of gradually declining star formation, and the main sequence of star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal*, 660(1):L43, 2007.

- S Noll, D Burgarella, E Giovannoli, V Buat, D Marcillac, and JC Munoz-Mateos. Analysis of galaxy spectral energy distributions from far-uv to far-ir with cigale: studying a sings test sample. Astronomy & Astrophysics, 507(3):1793–1813, 2009.
- Hsi-An Pan, Lihwai Lin, Bau-Ching Hsieh, Ting Xiao, Yang Gao, Sara L Ellison, Jillian M Scudder, Jorge Barrera-Ballesteros, Fangting Yuan, Amélie Saintonge, et al. The effect of galaxy interactions on molecular gas properties. *The Astrophysical Journal*, 868(2):132, 2018.
- David R Patton, Kieran D Wilson, Colin J Metrow, Sara L Ellison, Paul Torrey, Westley Brown, Maan H Hani, Stuart McAlpine, Jorge Moreno, and Joanna Woo. Interacting galaxies in the illustristing simulations-i: Triggered star formation in a cosmological context. *Monthly Notices of* the Royal Astronomical Society, 494(4):4969–4985, 2020.
- AO Petric, L Armus, J Howell, B Chan, JM Mazzarella, AS Evans, JA Surace, D Sanders, P Appleton, V Charmandaris, et al. Mid-infrared spectral diagnostics of luminous infrared galaxies. *The Astrophysical Journal*, 730(1):28, 2011.
- Amélie Saintonge and Barbara Catinella. The cold interstellar medium of galaxies in the local universe. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 60(1):319–361, 2022.
- Amélie Saintonge, Guinevere Kauffmann, Carsten Kramer, Linda J Tacconi, Christof Buchbender, Barbara Catinella, Silvia Fabello, Javier Graciá-Carpio, Jing Wang, Luca Cortese, et al. Cold gass, an iram legacy survey of molecular gas in massive galaxies–i. relations between h2, h i, stellar content and structural properties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415(1):32–60, 2011.
- Amélie Saintonge, Barbara Catinella, Linda J Tacconi, Guinevere Kauffmann, Reinhard Genzel, Luca Cortese, Romeel Davé, Thomas J Fletcher, Javier Graciá-Carpio, Carsten Kramer, et al. xcold gass: the complete iram 30 m legacy survey of molecular gas for galaxy evolution studies. The Astrophysical Journal Supplement Series, 233(2):22, 2017.
- DB Sanders and IF Mirabel. Luminous infrared galaxies. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 34(1):749–792, 1996.
- T Taro Shimizu, Richard F Mushotzky, Marcio Meléndez, Michael Koss, and David J Rosario. Decreased specific star formation rates in agn host galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452(2):1841–1860, 2015.
- MF Skrutskie, RM Cutri, R Stiening, MD Weinberg, S Schneider, JM Carpenter, Capps Beichman, R Capps, T Chester, J Elias, et al. The two micron all sky survey (2mass). The Astronomical Journal, 131(2):1163, 2006.
- Marko Stalevski, Jacopo Fritz, Maarten Baes, Theodoros Nakos, and Luka Č Popović. 3d radiative transfer modelling of the dusty tori around active galactic nuclei as a clumpy two-phase medium.

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 420(4):2756–2772, 2012.

- Marko Stalevski, Claudio Ricci, Yoshihiro Ueda, Paulina Lira, Jacopo Fritz, and Maarten Baes. The dust covering factor in active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458(3):2288–2302, 2016.
- Linda J Tacconi, Reinhard Genzel, Amélie Saintonge, Françoise Combes, Santiago García-Burillo, Roberto Neri, Alberto Bolatto, Thierry Contini, NM Förster Schreiber, Simon Lilly, et al. Phibss: unified scaling relations of gas depletion time and molecular gas fractions. *The Astrophysical Journal*, 853(2):179, 2018.
- Mark G Wolfire, David Hollenbach, and Christopher F McKee. The dark molecular gas. *The Astro-physical Journal*, 716(2):1191, 2010.
- Edward L Wright, Peter RM Eisenhardt, Amy K Mainzer, Michael E Ressler, Roc M Cutri, Thomas Jarrett, J Davy Kirkpatrick, Deborah Padgett, Robert S McMillan, Michael Skrutskie, et al. The wide-field infrared survey explorer (wise): mission description and initial on-orbit performance. *The Astronomical Journal*, 140(6):1868, 2010.
- Guang Yang, M Boquien, V Buat, D Burgarella, L Ciesla, F Duras, M Stalevski, WN Brandt, and C Papovich. X-cigale: Fitting agn/galaxy seds from x-ray to infrared. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 491(1):740–757, 2020.
- "谷口義明, 岡村定矩, and 祖父江義明". "銀河 I 銀河と宇宙の階層構造 /第 2版/". "シリーズ現代の天文学 第4巻". "日本評論社", 2018.