

東京大学大学院
理学系研究科天文学専攻
修士論文

LIRG の空間分解した星形成活動

学籍番号 35-166111

大橋宗史

指導教員 本原顕太郎 准教授

2018年3月 改訂

Abstract

銀河の質量と星形成率の間には Star Forming Main-Sequence (SFMS) と呼ばれる経験的な相関の存在が知られている。SFMS はこれまでに様々な波長・赤方偏移で調べられてきた。その一方で、そもそも星形成活動とは様々なスケールの物理の組み合わせであるため、星形成を担う物理機構の解明に向け、近傍銀河を空間分解した観測が近年精力的に行われている。その結果、銀河を 1kpc 以下のスケールに空間分解した場合でも、星質量面密度と星形成率面密度の間の相関（空間分解した SFMS）が存在していることが明らかになってきた。しかし近傍で最も激しい星形成活動を行っている赤外線光高度銀河 (Luminous Infrared Galaxy, LIRG) では大量のダストが存在するために減光が激しく可視光での観測および解析が困難であり、一方で赤外線などの減光に強い波長帯では空間分解能を稼げないため、これまで空間分解された SFMS についての研究はなされていなかった。そこで我々は水素再結合線の $\text{Pa}\alpha$ ($\lambda 1.875\mu\text{m}$) を用いることでそれらの課題を克服し、LIRG における空間分解された星形成活動を調べた。

結果、LIRG は global な性質として近傍銀河の SFMS よりも SFR の高い側に offset しているだけでなく、空間分解した SFMS もまた、近傍銀河のものよりも SFR の高い側に offset していることが明らかになった。さらに LIRG のサンプルを相互作用を及ぼし合っているものと、単独で存在しているもの (interacting LIRG と isolated LIRG) に分類したときに specific SFR ($=\Sigma_{\text{SFR}}/\Sigma_{M_*}$) が interacting LIRG では $\log \text{sSFR}/\text{yr}^{-1} = -9.35$ であるのに対し、isolated LIRG では $\log \text{sSFR}/\text{yr}^{-1} = -9.58$ と、約 0.2 dex の差が存在していることが明らかになった。また質量光度比の色依存性や減光の影響を考慮すると、その差がさらに 0.5 dex 以上大きくなることが示唆された。一方で、これらの interacting LIRG について、ALMA による空間分解された分子ガス面密度を調べたところ、 $\tau_{\text{dep}} (= \Sigma_{\text{gas}}/\Sigma_{\text{SFR}})$ が $\log \tau_{\text{dep}}/\text{yr} = 8.7 \pm 0.3$ と merger stage によらずほぼ一定で、近傍 normal 銀河とも変わらず、シミュレーションとは異なる結果が得られた。

さらに $\text{Pa}\alpha$ の電離源を調べた結果、バルジ領域では post-AGB などの星形成活動由来ではない電離源の存在が示唆された。一方で、AGN 銀河については中心部で negative feedback の兆候が見られるものの、中心以外の領域では星形成活動が支配的であることが示唆された。

今後は LIRG に対する可視近赤外線の面分光観測を行うことで、個々の領域における減光量や水素再結合線の電離源を詳細に探り、より正確に星形成活動を捉えるだけでなく、電波干渉計による観測により空間分解した分子ガスの情報を取得することで、激しい星形成を行っている天体における星形成活動の物理を解明していく必要がある。

目次

| | |
|---|-----------|
| Abstract | i |
| 第 1 章 序論 | 1 |
| 1.1 スケーリング則 | 1 |
| 1.1.1 Star forming main sequence (SFMS) | 1 |
| 1.1.2 空間分解した SFMS | 1 |
| 1.1.3 Kennicutt-Schmidt law (KS law) | 3 |
| 1.1.4 extended Kennicutt-Schmidt law | 4 |
| 1.2 Pa α 観測の利点と LIRG | 5 |
| 1.3 本論文の流れ | 6 |
| 第 2 章 データ | 7 |
| 2.1 ANIR 観測天体 | 7 |
| 2.2 SDSS 観測天体 | 8 |
| 2.3 ALMA 観測天体 | 8 |
| 第 3 章 解析 | 13 |
| 3.1 ピクセルビニング | 13 |
| 3.2 星質量と星形成率 | 14 |
| 3.3 分子ガス質量面密度 | 16 |
| 第 4 章 LIRG の空間分解した SFMS | 25 |
| 4.1 LIRG と SFMS | 25 |
| 4.2 LIRG の空間分解した SFMS | 26 |
| 4.3 merger stage | 27 |
| 4.4 動径方向依存性 | 28 |
| 4.5 MS からの offset | 29 |
| 第 5 章 STAR FORMATION LAW | 32 |
| 5.1 空間分解した KS law | 32 |
| 5.2 extended KS law | 33 |
| 第 6 章 議論 | 34 |
| 6.1 質量光度比による不定性 | 34 |
| 6.2 銀河同士の相互作用による影響 | 34 |
| 6.3 Pa α の電離源 | 35 |

| | | |
|--------------|-----------------------|-----------|
| 6.3.1 | AGN | 35 |
| 6.3.2 | それ以外の電離源 | 37 |
| 第 7 章 | 総括 | 38 |
| | 謝辞 | 39 |
| | 参考文献 | 40 |
| 付 録 A | 個々の LIRG の空間分解した SFMS | 48 |

第1章 序論

1.1 スケーリング則

1.1.1 Star forming main sequence (SFMS)

特定の赤方偏移において銀河の大規模サンプルを構築し、統計的な議論を行うことで銀河の普遍的な性質を探ることは極めて重要な研究手法の1つである。このような研究の中で発見された性質の1つとして、銀河の質量と星形成率の間の相関である Star forming main sequence (SFMS) がある。この関係は $10^7 - 10^{10} M_{\odot}$ の広い星質量レンジに渡って $\text{SFR} \propto M_{*}^{\beta}$ の形式で一般的には表され、 $\beta \sim 0.7 - 1.0$ (ただし、高質量側では β は小さくなる) である。SFMS はこれまでに様々な波長・赤方偏移で調べられており (see 図 1.1, e.g., Whitaker et al. 2014, Renzini & Peng 2015, Tacchella et al. 2016, Mitra et al. 2017)、各赤方偏移における分散が $\sim 0.2-0.35$ dex と小さいことも明らかになってきている。

この SFMS を作り上げる物理機構としては様々なスケールのものがあり、例えば pc スケールのものとしては HII 領域や分子雲、kpc スケールのものとしてはディスクやハロー、そして Mpc スケールのものとしては大規模構造などがある。これらの複雑な組み合わせの結果 SFMS が形成されると考えられており、様々な研究チームがその再現に取り組んでいる (e.g., Torrey et al. 2014, Sparre et al. 2015)。また、観測的に得られた SFMS をシミュレーションに組み込むことで、quenching (e.g., Pandya et al. 2017, Hahn et al. 2017) や形態進化 (e.g., Brennan et al. 2017)、mass-metallicity 関係 (e.g., Ma et al. 2016) など、銀河の他の統計的性質を探るような研究もなされている。しかしながら、解像度やフィードバックの取り扱いなどにまだまだ改善の余地があり、銀河の一般的な性質が完全に理解されたとは言い難いのが現状である。改善策の一つとして、これらの大規模シミュレーションでは解像度を sub-kpc 程度に設定しているため、そのスケールでの物理を観測から理解し、シミュレーションに組み入れる事が重要になっている。

1.1.2 空間分解した SFMS

そこで、SFMS の理解に向けた新しい一手として、空間分解した SFMS (spatially resolved SFMS もしくは resolved MS) の研究が近年盛んになってきている (e.g., Magdis et al. 2016, Cano-Díaz et al. 2016, Maragkoudakis et al. 2017, Abdurro'uf & Akiyama 2017, Ellison et al. 2018, Pan et al. 2018, Medling et al. 2018)。これらの研究の進展の背景には SINFONI, SAMI, MaNGA, CALIFA などの面分光観測装置 (Integral Field Spectrograph, IFS) の発展がある。それらによる近傍銀河サーベイの詳細を表 1.1 に示す。面分光観測装置は、広がった天体のスペクトルを一度の観測で取得できるため、近傍銀河や星が込み

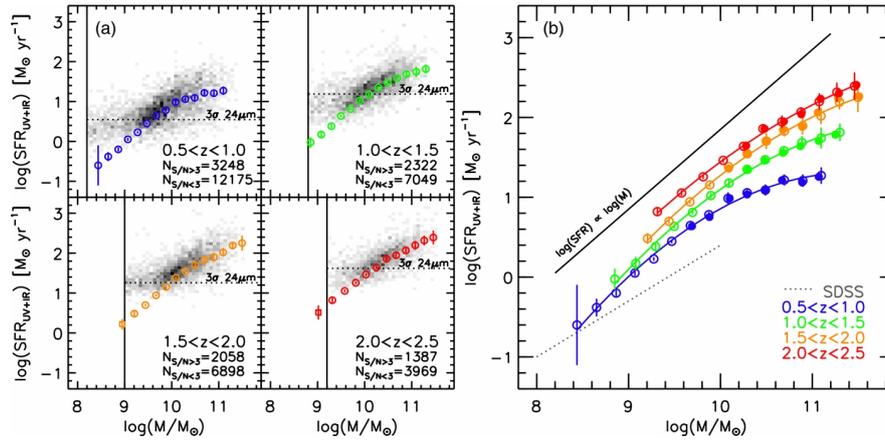


図 1.1: Whitaker et al. (2014) の Fig. 1。横軸は星質量、縦軸は星形成率を表す。左図: 各赤方偏移において、MIPS $24\mu\text{m}$ で検出された銀河の分布をグレースケールで示している。垂直な線は mass-complete な質量の下限値を示し、質量がそれ以上の銀河について各質量ピンでスタッキングした結果を丸で示す。質量が completeness 以下の銀河については四角で示す。右図: $z=0$ から $z=2.5$ までの各赤方偏移に置ける SFMS をプロットした図。色の違いは赤方偏移の違いを表し、左図の赤方偏移に対応している。

入った領域などの分光観測に非常に有効な手法である。これらの研究から、星形成銀河を sub-kpc スケール程度に分解した場合でも星質量面密度と星形成率面密度の間には比較的タイトな相関が存在していることが明らかになってきた (see 図 1.2)。さらに、SFMS は空間分解した SFMS の足し上げとして理解可能であることが示唆されたり (Nelson et al. 2016)、specific star formation rate (sSFR) $\equiv \text{SFR}/M_*$ の動径方向の分布などから、星形成銀河では中心部ほど高い星形成活動を示すのに対し、passive 銀河では中心部ほど低い星形成活動を示し、inside-out quench のシナリオを支持するような観測結果も得られている (e.g., Delgado et al. 2016, Ellison et al. 2018)。金属量や age の動径方向の傾きが 0 もしくは、わずかに負であるという結果もまた、同様のシナリオを支持している (e.g., Zheng et al. 2016)。

以上の研究は赤方偏移にして $z=0.01\sim 0.1$ 付近にある銀河を主にターゲットとしている。それとは別に、銀河系から 10Mpc 以内の距離に位置するような非常に近傍の銀河では、より細かく空間分解した ($\lesssim 50$ pc/arcsec) 星形成活動を調べることができる。しかし、空間分解能が高すぎることによる問題点もいくつかある (Kennicutt & Evans II 2012)。例えば、1 領域での星形成率が低くなってしまいうため、広い星質量範囲での初期星質量関数 (initial mass function, IMF) が十分にサンプリングできなくなる。また、HII 領域から漏れ出た電離光子の星間物質 (interstellar medium, ISM) による散乱などにより、実体的には星形成活動の無い場所で擬信号が発生してしまうおそれがある。このため、個々の領域に対して個別最適化された手法で解析を行う必要があるが、sub-kpc スケール程度の分解能であれば HII 領域や星形成クラスターと同等かそれ以上のサイズであるため、統一的な手法で星形成活動を議論することができる。

*Primary sample, $\langle z \rangle = 0.03$

†Secondary sample, $\langle z \rangle = 0.045$

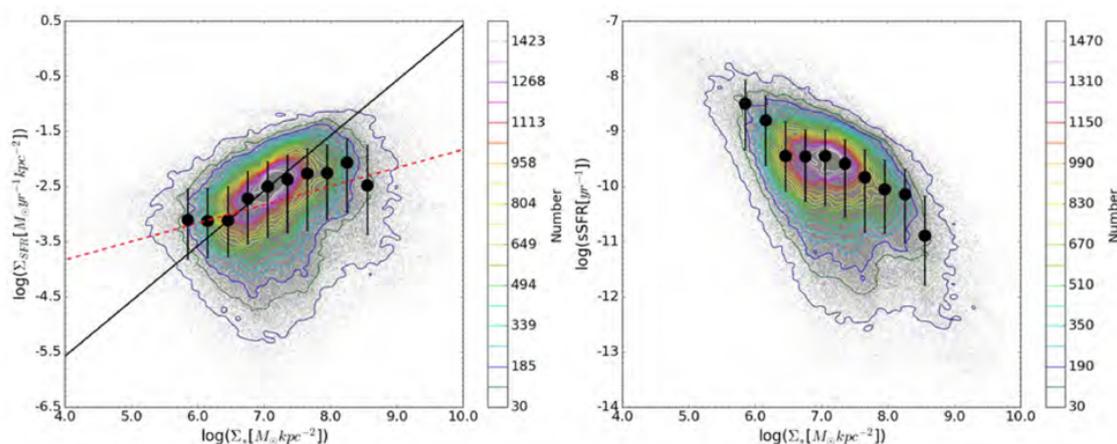


図 1.2: Abdurro'uf & Akiyama (2017) の Fig. 6。左図: 星質量面密度と星形成率面密度の関係。右図: 星質量面密度と sSFR の関係。色はコンタアの密度に対応している。

表 1.1: 主な IFS による近傍銀河サーベイ

| Spec | MaNGA | SAMI | CALIFA |
|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Sample size | 6700(P+*) 3300(S [†]) | 3400 | 600 |
| Redshift | 0.01-0.15 | 0.004-0.095 | 0.005-0.03 |
| Radial coverage | 1.5 R_e (P+) 2.5 R_e (S) | 1.1-2.9 R_e | 1.8-3.7 R_e |
| λ range [nm] | 360-1030 | 370-570(580V) 625-735(1000R) | 375-750(V500) 370-475(V1200) |
| FWHM [arcsec] | 2.5 | 2.1 | 2.5 |
| spatial FWHM [kpc] (physical) | 1.3-4.5 (P+) 2.2-5.1 (S) | 1.1-2.3 | 0.8-1.0 |

1.1.3 Kennicutt-Schmidt law (KS law)

星は冷たいガスの中で生まれるため、ガスがどのようにして星に変換されるかを理解すること (star formation law) は、銀河形成・進化を理解する上で非常に重要である。Schmidt (1959) が提案した星形成率と冷たいガスの質量の間の経験的な関係式は、星形成の物理的理解に貢献してきた。特に Kennicutt (1989) をその観測結果の第一歩として、星形成率面密度とガス (原子ガス+分子ガス) 質量面密度の間には $\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{gas}}^N$, $N \sim 1.4$ という相関があることが知られている (e.g., Daddi et al. 2010, Schruba et al. 2011, Krumholz et al. 2012, García-Burillo et al. 2012)。個々の銀河を星形成領域に空間分解して見ると、この関係式の傾きや規格化定数などにばらつきがあることが知られているが (e.g., Kennicutt 1998, Leroy et al. 2008, Shi et al. 2011, Rahman et al. 2012, Leroy et al. 2013, Muraoka et al. 2015, Pereira-Santaella et al. 2016)、幅広い星形成率を持つ銀河のサンプルを構築すると、これらの関係の分散は 0.3 dex 程度と小さいことが知られている。

この関係には分子ガス面密度が低い領域 ($\Sigma_{\text{gas}} < 10^{2.5} [M_{\odot}/\text{pc}^2]$) と高い領域 ($\Sigma_{\text{gas}} > 10^{2.5} [M_{\odot}/\text{pc}^2]$) でディスクとスターバーストという2つの系列が存在していることが示唆されている。(e.g. Daddi et al. 2010)。その原因としてはCOガスのフラックスからH₂ガス質量に換算する際のコンバージョンファクター α_{CO} の双峰性や、非常に濃い分子ガス ($n_{\text{H}_2} > 10^4 \text{ cm}^{-3}$) の双峰性などが考えられている (Daddi et al. 2010, Krumholz et al. 2012)。このような、非常に面密度の高い領域での空間分解した星形成活動を調べることは非常に重要となっている。

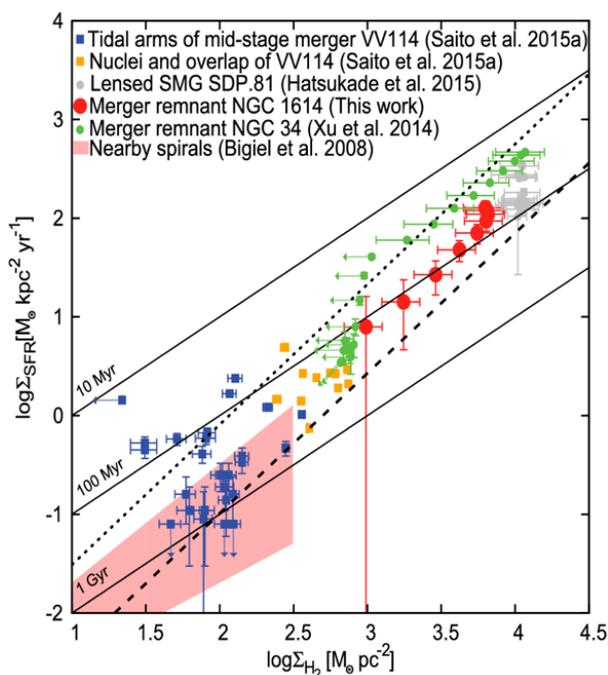


図 1.3: Saito et al. (2016) の Fig. 6。NGC1614(赤), NGC34(緑), VV114(青), 重力レンズ天体 SDP81(グレー), および近傍銀河のディスク (ピンクの影) の空間分解した KS 関係の plot。ドット線とダッシュ線はそれぞれスターバーストとディスクの関係 (Daddi et al. 2010) を示している。実線は τ_{dep} が 10Myr, 100Myr, 1Gyr で一定の線を表している。

1.1.4 extended Kennicutt-Schmidt law

分散の小さい KS law だが、低面輝度銀河 (low-surface-brightness galaxies, LSB) や銀河円盤の外縁部などの密度の低い領域 ($\Sigma_{\text{gas}} \gtrsim 10 M_{\odot}/\text{pc}^2$ or $\Sigma_{\text{SFR}} \gtrsim 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}/\text{kpc}^2$) では、面密度の高い領域での power-law の関係を外挿した場合よりも系統的に星形成率が低いことが知られている。これを解消するものとして、 $\Sigma_{\text{SFR}} \propto \Sigma_{\text{gas}} \Sigma_{\text{star}}^N$ という形で、KS law に星質量面密度の相関を持たせた extended KS law (Shi et al. 2011, Shi et al. 2018) がある。この表式を使うことにより、 $\Sigma_{\text{SFR}} \sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}/\text{kpc}^2$ の低密度領域でも同一の関係式で表せることが分かってきた。

星の存在が、輻射圧やガス加熱、重力などを通じて星形成に影響を与えていることは知られている (e.g., Genzel et al. 2010, Romeo & Mogotsi 2017)。この結果の物理的解釈

にはまだ結論が出されていないが、Ostriker et al. (2010), Kim et al. (2011), Ostriker & Shetty (2011) の一連の星形成モデルの研究において、図 1.4 のように $\Sigma_{\text{star}}^{0.5} \Sigma_{\text{gas}}$ と mid-plane pressure の間に相関があり、extended KS law が説明可能であることが示唆されている (Shi et al. 2018)。

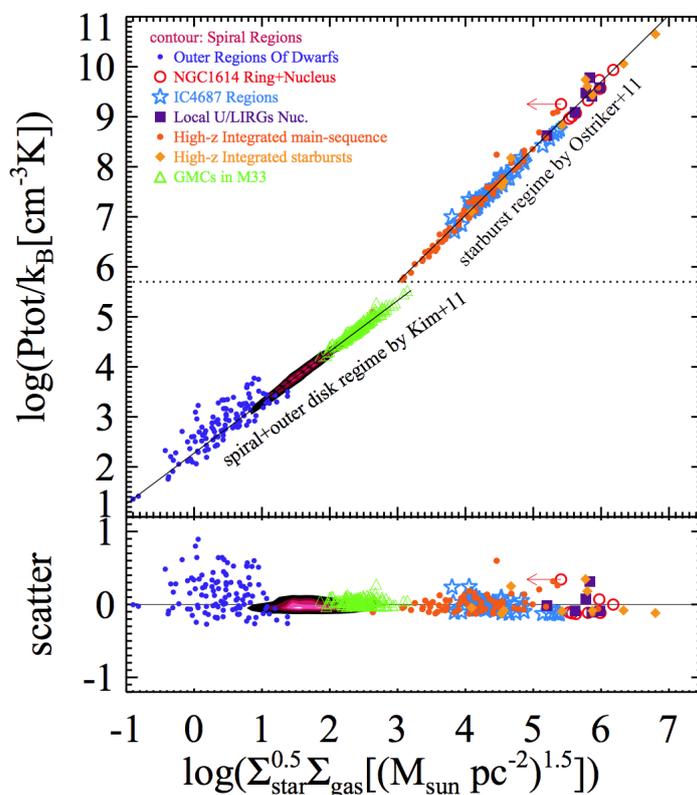


図 1.4: Shi et al. (2018) の Fig. 6。上図：銀河の mid-plane のガス圧力と、 $\Sigma_{\text{star}}^{0.5} \Sigma_{\text{gas}}$ の理論的な関係。水平な点線は starburst regime(右上) と disk regime(左下) の境界線を示す。実線はそれぞれの regime での結果のベストフィットである。高密度環境が starburst に対応し、Ostriker & Shetty (2011) での結果を、低密度環境が disk regime に対応し、Kim et al. (2011) での結果を表している。下図：上図について、実線のベストフィットからの残差。

1.2 Pa α 観測の利点と LIRG

このように空間分解した SFMS の研究が盛んになる一方で、先行研究にも課題がある。例えば Cano-Díaz et al. (2016) や Abdurro'uf & Akiyama (2017) では可視光の SED から星質両面密度や星形成率面密度を計算しているが、銀河中心などの爆発的に星形成をしている領域では、非常に強い減光のために星形成率を正しく見積もれない場合があることが知られている (Tateuchi 2015)。また、Maragkoudakis et al. (2017) では Spitzer の中間赤外線データを使用し、 $3.6\mu\text{m}$ の連続光成分から星質量面密度を、 $8\mu\text{m}$ 付近の PAH 成分から星形成率面密度を求めているが、空間分解能が sub-kpc に達しておらず、また PAH から算出する星形成率は金属量に対して非常に敏感なため、得られた星形成率に大きな不定

性を残している。

そこで我々は星形成活動に起因する HII 領域の直接的なトレーサーであり、かつ減光にも強い Pa α 輝線 ($\lambda 1.875\mu\text{m}$) を用いることで、非常に強い減光を受けている領域での空間分解した SFMS を求めることにした。減光を強く受ける領域を効率良く観測するため、星形成銀河の中でもダストを伴う激しい星形成活動を行う高赤外線高度銀河 (Luminous Infrared galaxy, LIRG) に着目して空間分解した SFMS を調べた。LIRG とは $L_{IR} \geq 10^{11}L_{\odot}$ と赤外線非常に明るい天体で、約半数が衝突銀河 (merger) もしくは相互作用をしている銀河 (interacting LIRG) である (e.g., Howell et al. 2010, Haan et al. 2010)。LIRG は一般に近傍としては非常に激しい星形成活動を伴い (SFR $\leq 10M_{\odot}/\text{yr}$)、平均 $A_v \sim 4$ mag の強いダスト減光を受けるが (Alonso-Herrero et al. 2006)、Pa α 付近の波長帯では $A_{\text{Pa}\alpha} \sim 0.6$ mag とかなり軽減される (Calzetti et al. 2000) ため、H α ($\lambda 656.2\text{nm}$) などでは検出できないようなダストに埋もれた星形成領域を検出することも可能となる。我々は Tateuchi et al. (2015) において Pa α の狭帯域撮像で観測された LIRG のサンプルを用いることで、空間分解した SFMS を調べた。Pa α は元来、大気中の水蒸気による吸収が大きい波長帯にあるため地上観測が困難であったが、チリのアタカマ高原に位置する TAO サイト (Yoshii et al. 2010) では、低水蒸気量 (PWV ~ 0.85 mm median) のために地上からの観測が可能となっている。

1.3 本論文の流れ

我々は、これまでに miniTAO/ANIR (Konishi et al. 2015) の N191 フィルタを用いた狭帯域撮像観測により、約 40 の LIRG の Pa α 輝線画像を取得している (Tateuchi 2015)。このデータを用いることで、空間分解された SFMS を調べた。さらに、これらの LIRG のうち、ALMA による CO(1-0) もしくは CO(2-1) 輝線の観測データのある HII LIRG (=AGN の影響の小さい LIRG) 4 天体については、空間分解した KS law および extended KS law を調べた。それらの結果を受けて、銀河同士の相互作用が空間分解した SFMS および star formation law に与える影響について議論する。さらに、LIRG で観測される Pa α の電離源についても議論する。

なお、本研究で使用する宇宙論パラメータは Λ -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。また、本研究では銀河の連続光成分の受ける減光量は、ガス輝線の受ける減光量の 0.44 倍 ($A_{\lambda, \text{continuum}} = 0.44A_{\lambda, \text{gas}}$, Calzetti et al. 2000) であると仮定しているが、表記は全てガス輝線の受ける減光量で統一している ($A_{\lambda} \equiv A_{\lambda, \text{gas}}$)。

第2章 データ

2.1 ANIR 観測天体

LIRG のサンプルとして、我々は miniTAO 望遠鏡に搭載された近赤外線カメラ ANIR (Konishi et al. 2015) で取得されたデータを用いた。詳細は Tateuchi (2015) に譲るが、そのデータは 42 天体の LIRG の H($\lambda = 1632\text{nm}$, $\Delta\lambda = 297\text{nm}$), Ks($\lambda = 2150\text{nm}$, $\Delta\lambda = 322\text{nm}$) および N191($\lambda = 1909\text{nm}$, $\Delta\lambda = 32.6\text{nm}$) バンドの撮像データから構成されている。典型的な積分時間はそれぞれ 300 秒, 300 秒, 1000 秒で、ピクセルスケールは $0''.298 \text{ pixel}^{-1}$ 、シーイングは中央値で $0''.8$ 以下であった。このシーイングは、天体面上での実スケールで $\sim 0.2 \text{ kpc}$ に対応する。Pa α の輝線フラックスを求めるため、H と Ks バンドでの画像を内挿することで N191 における連続光画像を作成し、それを N191 画像から差し引くことで Pa α の輝線画像を作成した。さらに、大気中の水蒸気による吸収も補正している。

LIRG の大半は衝突銀河あるいは重力的相互作用を及ぼし合っている銀河であると言われている (e.g., Howell et al. 2010, Haan et al. 2010)。また、AGN である割合も高く、AGN によるコンタミネーションの影響を排除するため、NED* から各 LIRG のスペクトルタイプを取得し、星形成 LIRG (HII LIRG) もしくは LINER/Syfert (AGN LIRG) で分類した (Tateuchi 2015)。その上で、銀河同士の相互作用が空間分解した SFMS に与える効果を調べるため、23 の HII LIRG と 19 の AGN LIRG を interaction / isolated で分類して比較した。なお、ここでは Yuan et al. (2010) に基づき、近傍 100kpc 以内において明らかな銀河衝突や相互作用の様子 (tidal tail など) を示す天体を interacting LIRG、示さない天体を isolated LIRG と定義する。この基準に基づくと、23 の HII LIRG のうち 11 天体は銀河同士の interacting phase にあり、12 天体は isolated LIRG として存在している。一方、19 の AGN LIRG のうち 11 天体は銀河同士の interacting phase にあり、8 天体は isolated LIRG として存在している。さらに interacting LIRG については (Larson et al. 2016) の定義を参考に、その見た目から以下の基準で 3 つの merger stage に分類した。

- early merger
相互作用している銀河ペアに tidal tail が見られるが、お互いが独立した形を保ち、コアをそれぞれ一つずつ持っている天体。merger の初期段階にある天体。
- merging
相互作用している銀河ペアにおいて、中心部に複数のコアを持つ天体。merger を経験した複数の銀河のコアが一箇所に集積しているか、もしくは一つの銀河の中心部で強い重力不安定が起きていることを示しており、merger の途中段階にある天体。

*<https://ned.ipac.caltech.edu/>

- merger remnant
tidal tail は示すが、見た目ではコアを一つだけ持ち、merger の最終段階にある天体。

各天体の諸元について表 2.1, 表 2.2, 表 2.3 に示す。

表 2.1: interacting HII LIRG の一覧

| Name | Dist. [Mpc] | $\log L_{IR} [L_{\odot}]$ | $\log M_* [M_{\odot}]$ | SFR [M_{\odot}/yr] | Axis ratio (b/a) | stage |
|--------------|-------------|---------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------|-------|
| ESO343-IG013 | 82.8 | 11.1 | 10.8 | 13.5 ± 3.3 | 0.41 | 1 |
| IC4686 | 75.0 | 11.0 | 10.3 | 5.0 ± 10.5 | 0.70 | 2 |
| IC4687 | 75.0 | 11.3 | 10.8 | 33.6 ± 29.2 | 0.77 | 2 |
| IC4689 | 75.0 | 11.0 | 10.6 | 8.7 ± 5.8 | 0.43 | 2 |
| MCG01-60-022 | 101.3 | 11.3 | 10.9 | 16.1 ± 6.6 | 0.71 | 1 |
| NGC1614 | 68.6 | 11.7 | 11.0 | 39.3 ± 28.8 | 0.86 | 3 |
| NGC5257 | 98.8 | 11.5 | 11.1 | 23.5 ± 8.7 | 0.64 | 1 |
| NGC5258 | 98.8 | 11.5 | 11.1 | 14.3 ± 8.9 | 0.43 | 1 |
| NGC7771 | 62.6 | 11.3 | 11.3 | 6.5 ± 3.7 | 0.33 | 1 |
| NGC7770 | 62.6 | 10.8 | 10.4 | 3.4 ± 0.8 | 0.47 | 1 |

Note. Column 1: 銀河名; Column 2: 光度距離; Column 3: 全赤外線光度

($L_{IR(8-1000\mu\text{m})}$) in Sanders et al. (2003) or Howell et al. (2010) or Pereira-Santaella et al. (2011); Column 4: K バンド光度から算出した星質量 (§3 参照)。測光エラーは非常に小さいため、ここでは表示しない。; Column 5: Pa α 光度から算出された星形成率 (§3 参照)。エラーは測光エラーのみ。; Column 6: 軸比 (b/a, §3.2 参照); Column 7: merger stage. 1: early stage, 2: strongly interacting, 3: merger remnant.

2.2 SDSS 観測天体

§3.2 で後述するように、LIRG の質量面密度を求めるために質量光度比を用いるが、その際に質量光度比の色依存性を考慮した。そこで、我々はSDSSのアーカイブから r($\lambda 623.1\text{nm}$) および i($\lambda 762.5\text{nm}$) バンドの両方の測光データのある HII LIRG の NGC23, NGC1614, NGC5257/8, NGC7678, NGC7771, UGC2982 についてデータを取得した。なお、空間分解する際に測光で用いた aperture は半径 $2''.0$ である。

2.3 ALMA 観測天体

星形成の物理を理解する上で、そのタネとなる低温ガス、特に分子ガスの物理状態を知ることは非常に重要である。特に個々の星形成の現場の物理状態を探る上では、ディスクを空間分解した観測データを得ることが重要となる。そこで我々は以上のデータに加え

表 2.2: isolated HII LIRG の一覧

| Name | Dist. [Mpc] | $\log L_{IR} [L_{\odot}]$ | $\log M_* [M_{\odot}]$ | SFR [M_{\odot}/yr] | Axis ratio (b/a) |
|-----------------|-------------|---------------------------|------------------------|-------------------------------|------------------|
| IIC5179 | 49.0 | 11.2 | 11.0 | 6.1 ± 3.9 | 0.48 |
| ESO286-G035 | 75.4 | 11.2 | 10.7 | 11.8 ± 9.4 | 0.29 |
| ESO320-G030 | 46.6 | 11.3 | 10.8 | 2.9 ± 1.6 | 0.72 |
| ESO557-G002 | 92.0 | 11.2 | 10.6 | 6.6 ± 5.1 | 0.65 |
| IRASF06592-6313 | 100.0 | 11.2 | 10.8 | 4.6 ± 3.4 | 0.55 |
| IRASF18293-3413 | 78.9 | 11.8 | 11.2 | 41.5 ± 33.2 | 0.68 |
| MCG05-12-006 | 81.5 | 11.2 | 10.7 | 8.2 ± 7.2 | 0.63 |
| NGC0023 | 65.6 | 11.1 | 11.1 | 7.1 ± 5.5 | 0.51 |
| NGC0232 | 87.7 | 11.4 | 11.0 | 4.9 ± 4.0 | 0.85 |
| NGC2342 | 76.4 | 11.4 | 11.0 | 26.4 ± 3.2 | 0.67 |
| NGC7678 | 50.2 | 10.8 | 10.8 | 12.5 ± 1.0 | 0.96 |
| UGC02982 | 74.7 | 11.2 | 11.0 | 22.1 ± 6.3 | 0.41 |

表 2.1 と同じ

て、空間分解された分子ガスの分布を調べるため、電波干渉計の ALMA で観測された CO 輝線のデータを斎藤氏から提供していただいた。その一覧を表 2.4 に示す。なお、測光のために用いた aperture は半径 $1''.0$ である。これらの天体のうち、本論文での議論に用いた、CO(1-0) および CO(2-1) の観測がなされた interacting HII LIRG の 4 天体 (IC4687, NGC1614, NGC5257/8) について、その画像を図 2.1 および図 2.2 に示す。

表 2.3: AGN LIRG の一覧

| Name | Dist. [Mpc] | $\log L_{IR} [L_{\odot}]$ | $\log M_{*} [M_{\odot}]$ | SFR [M_{\odot}/yr] | Axis ratio (b/a) |
|-----------------|-------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------|
| CGCG453-062 | 109.6 | 11.4 | 11.0 | 10.3 ± 3.2 | 0.57 |
| ESO244-G012 | 99.8 | 11.5 | 11.1 | 50.8 ± 22.9 | 0.89 |
| ESO339-G011 | 82.9 | 11.1 | 10.9 | 8.2 ± 3.6 | 0.56 |
| ESO534-G009 | 48.9 | 10.7 | 10.7 | 0.4 ± 2.7 | 0.56 |
| IC1623A/B | 87.4 | 11.7 | 11.0 | 40.1 ± 23.8 | 0.00 |
| IC4518A/B | 68.2 | 11.1 | 11.2 | 15.0 ± 2.4 | 0.00 |
| IC5063 | 48.7 | 10.9 | 10.9 | 1.8 ± 1.0 | 0.72 |
| IRASF02437-2122 | 101.6 | 11.2 | 10.8 | 1.7 ± 1.5 | 0.73 |
| MCG03-34-064 | 74.6 | 11.3 | 11.0 | 4.1 ± 4.9 | 0.70 |
| MRK0331 | 77.8 | 11.5 | 10.9 | 19.3 ± 11.0 | 0.83 |
| NGC0034 | 86.0 | 11.5 | 11.0 | 18.1 ± 12.5 | 0.78 |
| NGC1720 | 60.4 | 10.9 | 11.0 | 2.1 ± 1.9 | 0.54 |
| NGC4922 | 102.8 | 11.3 | 10.5 | 8.4 ± 2.2 | 0.86 |
| NGC5135 | 59.4 | 11.3 | 11.1 | 11.0 ± 8.8 | 0.93 |
| NGC6926 | 86.6 | 11.3 | 11.3 | 105.0 ± 0.1 | 0.41 |
| NGC7130 | 69.8 | 11.4 | 11.1 | 2.9 ± 3.3 | 0.73 |
| NGC7469 | 71.2 | 11.7 | 11.1 | 27.9 ± 20.7 | 0.82 |
| NGC7591 | 71.8 | 11.1 | 11.0 | 2.0 ± 1.7 | 0.69 |
| UGC02238 | 93.5 | 11.3 | 10.9 | 37.6 ± 5.3 | 0.35 |

表 2.1 と同じ。ただし星形成率は AGN の寄与を考慮していないため、過大評価していると思われる。

表 2.4: ALMA 観測天体の一覧

| Name | observed line | Beam [arcsec] | area [arcsec] | Status |
|-------------|-----------------------|---------------------|---------------|-----------------|
| ESO 320-G30 | $^{12}\text{CO}(3-2)$ | 0.30×0.27 | 29.2 | isolated HII |
| IC 4687 | $^{12}\text{CO}(2-1)$ | 0.49×0.45 | 51.2 | interacting HII |
| NGC 1614 | $^{12}\text{CO}(1-0)$ | 1.0×0.57 | 35.6 | interacting HII |
| NGC 5257 | $^{12}\text{CO}(1-0)$ | 2.1×1.6 | 64.8 | interacting HII |
| NGC 5258 | $^{12}\text{CO}(1-0)$ | 2.1×1.6 | 64.8 | interacting HII |
| NGC 5135 | $^{12}\text{CO}(2-1)$ | 0.36×0.099 | 51.2 | isolated AGN |
| VV 114 | $^{12}\text{CO}(1-0)$ | 1.8×1.3 | 48.0 | interacting AGN |
| IC 5063 | $^{12}\text{CO}(2-1)$ | 1.8×1.6 | 128.0 | interacting AGN |
| NGC 7469 | $^{12}\text{CO}(1-0)$ | 0.85×0.55 | 30.2 | interacting AGN |

Note. Column 1: 銀河名; Column 2: 観測された CO 輝線; Column 3: ビームサイズ;
Column 4: 観測視野; Column 5: 観測した LIRG の物理状態。interacting/isolated
HII/AGN.

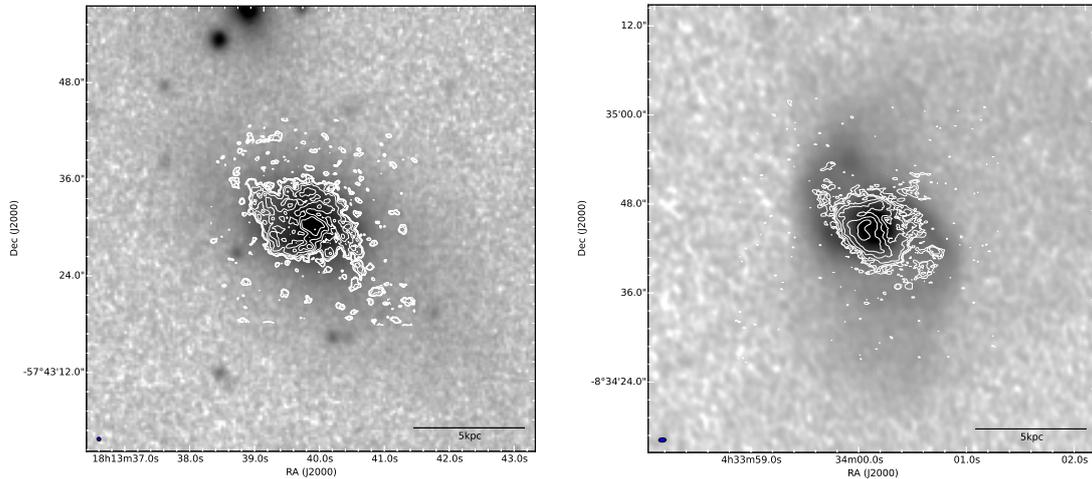


図 2.1: 左図: IC 4687. コントアは ALMA $^{12}\text{CO } J = 2 - 1$ で、 $[1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256] \times 3\sigma$ ($=0.023 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$) に対応している。左下に ALMA のビームサイズを示す。右図: NGC 1614. コントアは ALMA $^{12}\text{CO } J = 1 - 0$ で、 $[1, 2, 4, 8, 16, 32, 64] \times 3\sigma$ ($=0.090 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$) に対応している。左下に ALMA のビームサイズを示す。

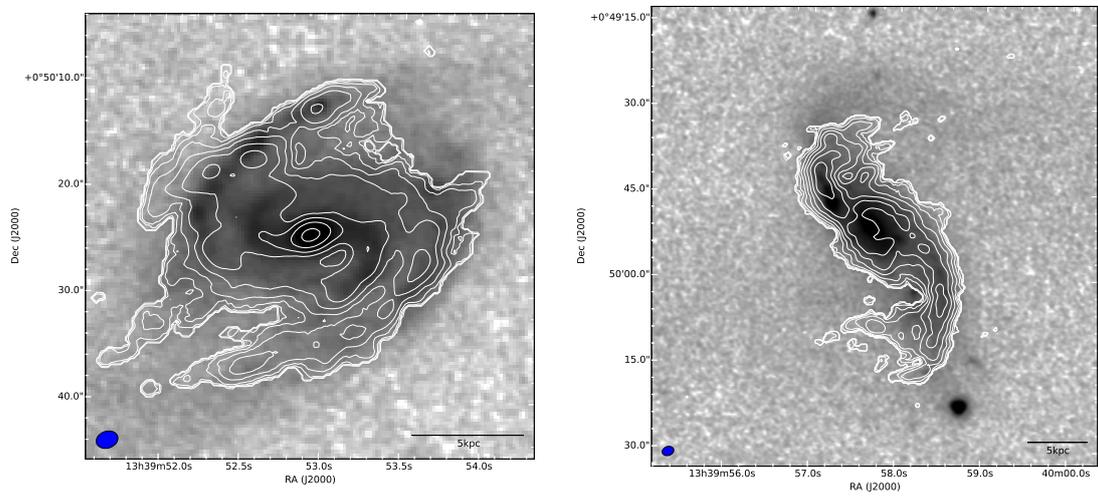


図 2.2: 左図 : NGC5257. コントアは ALMA $^{12}\text{CO } J = 1 - 0$ で、 $[1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512] \times 3\sigma (=0.020 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1})$ に対応している。左下に ALMA のビームサイズを示す。
 右図 : NGC5258. コントアは ALMA $^{12}\text{CO } J = 1 - 0$ で、 $[1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256] \times 3\sigma (=0.021 \text{ Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1})$ 。左下に ALMA のビームサイズを示す。

第3章 解析

3.1 ピクセルビニング

sub-kpc 以下のスケールで銀河を空間分解する際に、以下の点に注意する必要がある。1 つ目としては空間分解能 $r \lesssim 10$ pc ではクラスター以下のサイズとなるため、SFR の推定の際に仮定している continuous star formation が崩れてしまうことがある。ただし、そもそも可視近赤外線観測装置の限界により、近傍 LIRG では $10\text{pc}(\sim 0.03[\text{arcsec}]@80\text{Mpc})$ の高空間分解能を達成することができなため、今回は注意する必要は無い。2 つ目としては $r \lesssim$ 数百 pc では HII region 以下のサイズとなってしまうことがある。Pa α は若い星そのものではなく、その周囲の電離ガスをトレースするが、その emission の 30-60% は ISM の diffuse gas 由来と考えられており (e.g., Dale et al. 2007, Oey et al. 2007)、数百 pc 以下の空間分解能では星形成を行っていない領域でも擬信号をトレースしてしまう可能性がある (Kennicutt & Evans II 2012)。そこで、我々は最も細かく空間分解する場合の分解能を $r \sim 0.2\text{kpc}(\sim 0.9''@40\text{Mpc})$ と設定した。

通常の aperture の作成方法としては、円形 aperture を銀河内にくまなく配置する方法や、ピクセル-to-ピクセルで行う方法などがある。しかし今回の LIRG のサンプルは SN の良いデータ点が少ないため、効率良くデータ数を稼ぐ必要があった。そこで、銀河を空間分解した個々の領域として、Ks 画像と Pa α 輝線画像の共通の aperture を以下の流れで作成した。

1. まず 3 ピクセル \times 3 ピクセル (~ 0.9 arcsec \times 0.9 arcsec) でビニングする。
2. Ks continuum 画像で最もカウントの高いピクセルに対し、SN を計算する。
3. $\text{SN} \geq 10$ であれば、aperture の作成は終了し、以降の aperture の作成を、それまでに作った aperture に含まれていないピクセルに限定した上で 2 に戻る。
4. $\text{SN} < 10$ であれば、そのピクセルを中心として半径 $r = r + 1$ ピクセルの円を aperture として、再度 SN を計算する。 $\text{SN} \geq 10$ となった時点で半径の増加を止め、この aperture は以降の aperture 作成領域からは除く。
5. aperture 内のピクセルの数が 100 以下の間、2 から 4 までを繰り返すが、それでも $\text{SN} \geq 10$ を達成できない場合、その過程で計算した SN の最高値が $\text{SN} \geq 3$ であれば、その時の aperture を採用し、2 に戻る。この時に採用した aperture に含まれるピクセルもまた、以降の SN 計算では除外する。

この方法を用いた場合、aperture のサイズが統一されない(今回の場合、面積は $0.04\text{kpc}^2 \sim 4.3\text{kpc}^2$, median で 0.12kpc^2)。一方で各 aperture 内に含まれる質量は $10^{7.0} \sim 10^{10.0} M_{\odot}$ 。

(median $10^{8.4} M_{\odot}$), 星形成率は $10^{-2.4} \sim 10^{0.5} M_{\odot}/\text{yr}$ (median $10^{-1.0} M_{\odot}/\text{yr}$) である。SFR $\lesssim 0.001 - 0.01 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ では IMF のサンプリング不足により SFR の見積もりに不定性が出るが (=領域内の大質量星の数が少なく、誤差が大きくなってしまう (Cerviño & Luridiana 2002, Verley et al. 2010, Kennicutt & Evans II 2012)), 今回は SFR がそれ以上の領域を取得しているため、影響は無視する。

このピクセルビンングを実施した結果を図 3.1 と、図 3.3 から図 3.23 に示す。左と中央の画像はそれぞれ Ks および Pa α 成分をグレイスケールで示し、aperture のサイズごとに色づけした点を、画像上に示している。なお、§2 で述べているように、SDSS もしくは ALMA 画像との比較の際には以上の方法ではなく、円形 aperture を用いている (それぞれ半径 $2''.0$ と $1''.0$)。

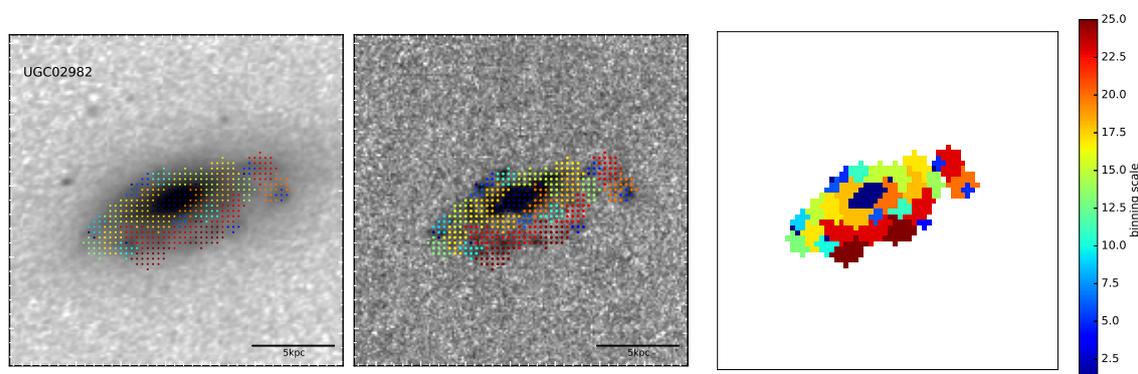


図 3.1: isolated HII LIRG の UGC 2982 に対して、 $\text{SN} > 10$ もしくは $\text{SN} > 3$ のピクセルビンングを実施した結果。左: Ks 画像にビンングスケールの大きさと色付けした aperture を示した図。画像の単位は星質量面密度 [$M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$]。中央: Pa α 輝線画像に、Ks 画像と同じ aperture を示した図。単位は星形成率面密度 [$M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ kpc}^{-2}$]。右: 各領域のビンングスケールを示した図。

3.2 星質量と星形成率

LIRG の星質量面密度 Σ_* を求めるため、§3.1 で作成した各領域において Ks band 面輝度に対し、式 (3.1) に示した質量光度関係 (Bell et al. 2003, 以降 B03) を適用した。なお、それぞれの天体について Ks band の画像に対して GALFIT (Peng et al. 2002) を用いて長軸と短軸を測定し、銀河がディスク面と垂直な方向に対して厚さ 0 の正円であると仮定することで、inclination 補正を行っている。ただし、merger のためにいびつな形状を示す IC 1623 に関してのみ補正を行っていない。また、星形成率面密度 Σ_{SFR} は式 (3.2) に示した、Kroupa-IMF を仮定した SFR-H α 関係 (Kennicutt et al. 2009) と H α /Pa α = 8.6 ($T = 1000\text{K}$, $n_e = 10^4 \text{ cm}^{-3}$; Hummer & Storey 1987) の flux 比を用いて、Pa α の面輝度から星形成率面密度を算出した。なお、同じ関係式を用いて銀河全体での星質量と星形成率も算出している。ところで、今回のサンプルとした LIRG は uniform dust screen model に従わないために、減光補正には減光マップを作成することが必要であることが示唆されている (Kobayakawa 2016)。しかし §1.2 でも述べたように、LIRG の平均的な減光として $A_V=4$ を仮定した場合、 $A_{\text{Pa}\alpha} \sim 0.6 \leftrightarrow 0.24 \text{ dex}$, $A_{\text{Ks}} \sim 0.4 \leftrightarrow 0.16 \text{ dex}$ と、星形成率や質量光

度比のエラーと比較すると小さいため、減光の影響は小さく、本研究では Ks および Pa α への減光補正は行わない。

$$\Sigma_* = 0.8 \Sigma_{L^*,K} / \Sigma_{L_{\odot},K} [M_{\odot}/\text{kpc}^2] \quad (3.1)$$

$$\Sigma_{\text{SFR}} = 6.4 \times 10^{-41} \Sigma_{L_{\text{Pa}\alpha}} [M_{\odot}/\text{yr}/\text{kpc}^2] \quad (3.2)$$

なお、Ks band から見積もった星質量光度比は、星の年齢や星形成史すなわち色の影響により 0.1 dex 程度の系統誤差がある (B03)。そこで、個々の領域での色の影響を評価するために、B03 の質量光度比と、Zibetti et al. (2009) (以降 Z09) の r-i の色補正を含めた Ks band 質量光度比 Υ_{Ks}

$$\log \Upsilon_{Ks} = -1.371 + 2.109(r - i) \quad (3.3)$$

をそれぞれ用いて質量面密度を比較した。r バンドおよび i バンドの画像は SDSS のデータを使用した。なお、aperture としては半径 2.0" の円形 aperture を銀河面上およびその周辺にばらまき、r, i, Ks の 3 バンド全てで SN \geq 3 で検出された領域のみをプロットしている。その結果、該当するデータ点を持つ天体は NGC 23, NGC 1614, NGC 5257/8, NGC 7771, UGC 2982 の 6 天体のみであった。その結果を図 3.2 の左図に示す。ここで B03 では Salpeter IMF を使用しているため、Chabrier IMF を使用している Z09 に合わせるため以下のように補正した (Gallazzi et al. 2008)。

$$\Sigma_{*,B03,Chabrier} = \Sigma_{*,B03,Salpeter} - 0.093 \quad (3.4)$$

図 3.2 から分かるように、B03 の質量光度比を用いた場合の方が 0.4 dex 程度、質量を大きく見積もっていることが見て取れる。しかし、ここでは r-i への減光補正を施していない。そこで、LIRG の一般的な減光 $A_V \sim 4$ mag (Alonso-Herrero et al. 2006) を受けていると仮定すると、r-i は ~ 0.8 mag の赤化を受けると推定される (Calzetti et al. 2000)。すなわち、Z09 の質量光度比を用いると、LIRG の質量は $2.109 \times 0.8 \times 0.44 \sim 0.7$ dex 程度大きく見積もられてしまうことが予想される。減光による影響を調べるためには減光マップを作成する必要があるが、今回のサンプルに関してはデータ不足のためマップ作成の代わりに、銀河ごとに一様な減光を受けていると仮定して、Veilleux et al. (1995), Alonso-Herrero et al. (2006) から取得した H_{α}/H_{β} 比から減光量を求め、再度 Z09 の質量光度比を用いて質量面密度を計算した。なお、B03 と Z09 の比較において Ks への減光補正は同等に効くため、補正を行ったのは r-i のみである。その結果を図 3.2 の右図に示す。この図からわかるように、色への減光補正を行うことにより、B03 は Z09 よりも 1.0 dex 程度質量を大きく見積もってしまう可能性があることが分かった。一方で、今回のサンプルの interacting LIRG と isolated LIRG の平均的な減光量はそれぞれ $E(B-V) = 1.3 \pm 0.5$, 1.2 ± 0.5 と有意な差は見られなかったため (Tateuchi 2015)、減光によって両者の間の関係が変化しうることに関しては本論文では議論しない。質量光度関係が結果に与える影響に関しては、§6.1 でも再度議論する。

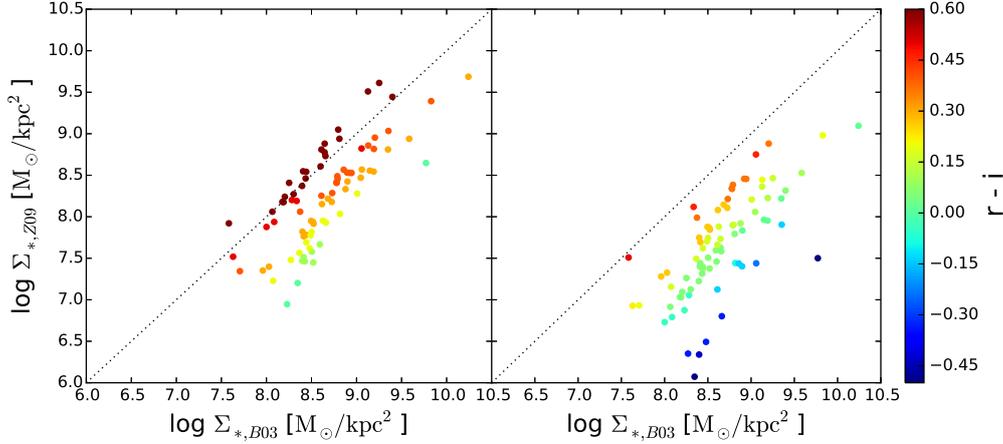


図 3.2: 左図: 銀河内に配置した半径 $2''.0$ aperture について、B03 と Z09 の Ks バンドでの質量光度関係を比較した図。横軸は B03 の質量光度比を用いて求めた質量面密度を、縦軸は Z09 の色依存性を考慮した質量光度比を用いて求めた質量面密度を表す。各点の色は各 aperture での r-i の色を表している。ダッシュ線は両者の質量光度比が同じ値を取るところを示す。右図: 縦軸が、各 aperture について、r-i の色に対してその銀河の平均的な減光を補正した上で、Z09 の質量光度比を用いて求めた質量面密度を表す。

3.3 分子ガス質量面密度

$^{12}\text{CO}(1-0)$ 輝線および $^{12}\text{CO}(2-1)$ 輝線から分子ガス質量を見積もるため、CO-to- H_2 conversion factor α_{CO}^{1-0} は金属量依存性を考慮したもの (式 (3.5), Genzel et al. 2015) を使用した。なお、金属量としては先行研究で得られた、銀河全体での値を使用しており、一覧を表 3.1 に示す。 $^{12}\text{CO}(2-1)$ と $^{12}\text{CO}(1-0)$ の輝線強度比 $R_{21} \equiv I_{\text{CO}(2-1)}/I_{\text{CO}(1-0)}$ として近傍渦巻銀河および LIRG の単一鏡観測から求めた $R_{21} = 0.7$ (Albrecht et al. 2007, Leroy et al. 2013) を採用した。

表 3.1: α_{CO} の算出に用いた金属量

| Name | 12+[O/H] | reference |
|----------|----------|----------------------------------|
| NGC 1614 | 8.9 | Miralles-Caballero et al. (2012) |
| NGC 5257 | 8.9 | Rich et al. (2012) |
| NGC 5258 | 9.0 | Rich et al. (2012) |
| IC 4687 | 8.9 | Rich et al. (2012) |

$$\alpha_{\text{CO}}^{1-0} = 4.36 \times \sqrt{0.67 \times \exp(0.36 \times 10^{-(12+\log(O/H)-8.67)}) \times 10^{-1.27 \times (12+\log(O/H)-8.67)}} \quad (3.5)$$

$$\frac{L_{\text{CO}}}{[\text{K km s}^{-1} \text{ pc}^2]} = 3.25 \cdot 10^7 \times \frac{S_{\text{CO}} \Delta \nu}{[\text{Jy km s}^{-1}]} \times \frac{D_L^2}{(1+z)^3 \nu_{\text{obs}}^2} \quad (3.6)$$

$$M_{mol} = \alpha_{CO} L_{CO(1-0)} [M_{\odot}] \quad (3.7)$$

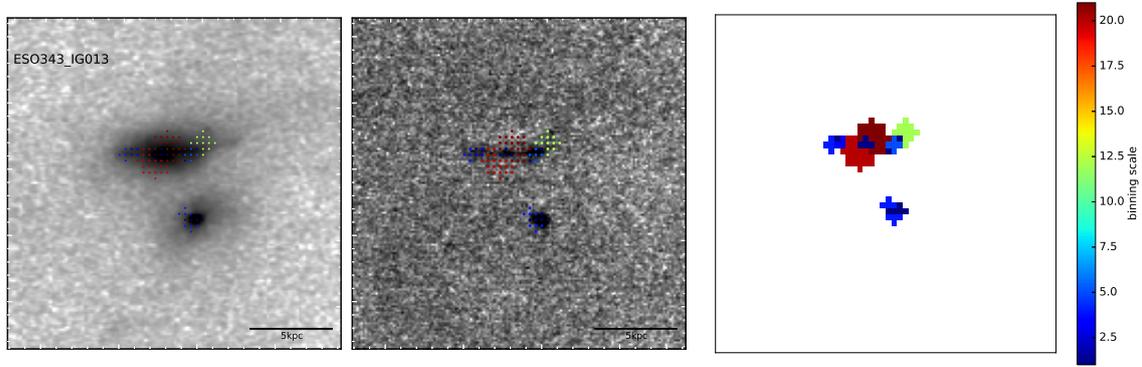


図 3.3: interacting HII LIRG の ESO343-IG13。図 3.1 と同じ。

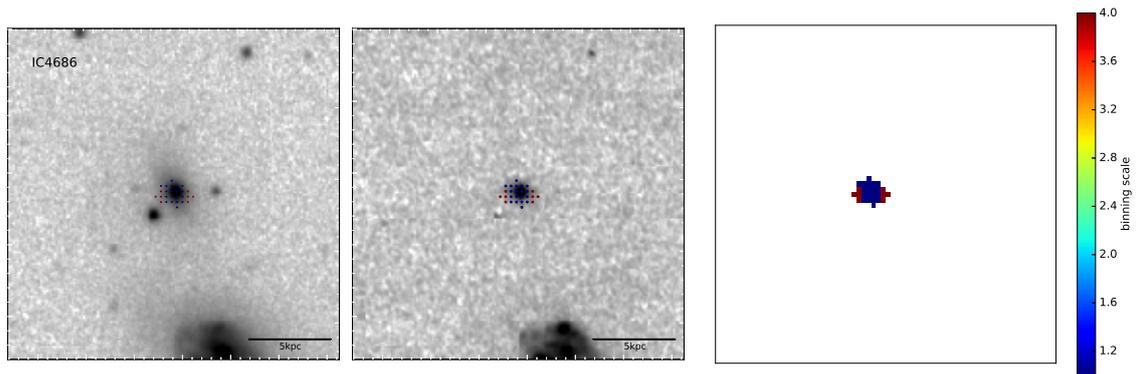


図 3.4: interacting HII LIRG の IC4686。図 3.1 と同じ。

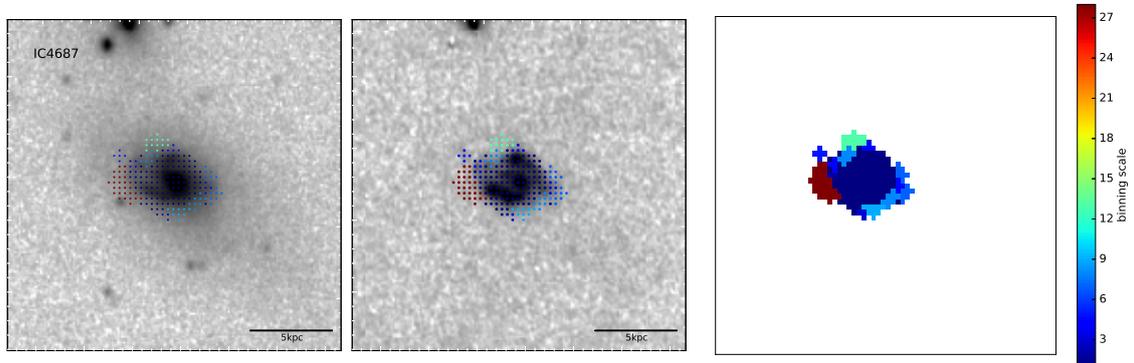


図 3.5: interacting HII LIRG の IC4687。図 3.1 と同じ。

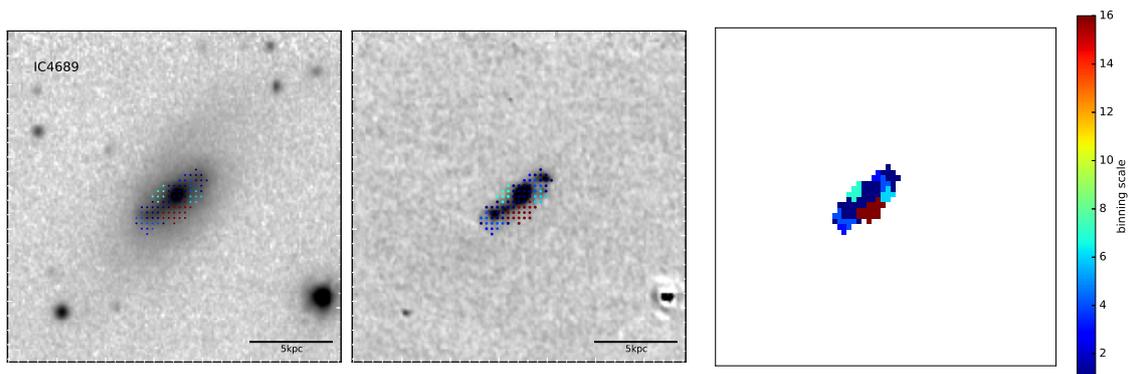


図 3.6: interacting HII LIRG の IC4689。図 3.1 と同じ。

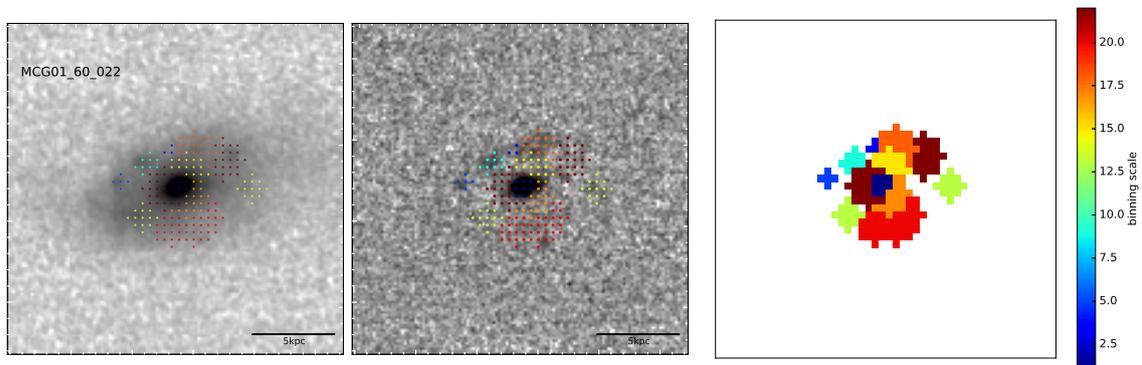


図 3.7: interacting HII LIRG の MCG1-60-22。図 3.1 と同じ。

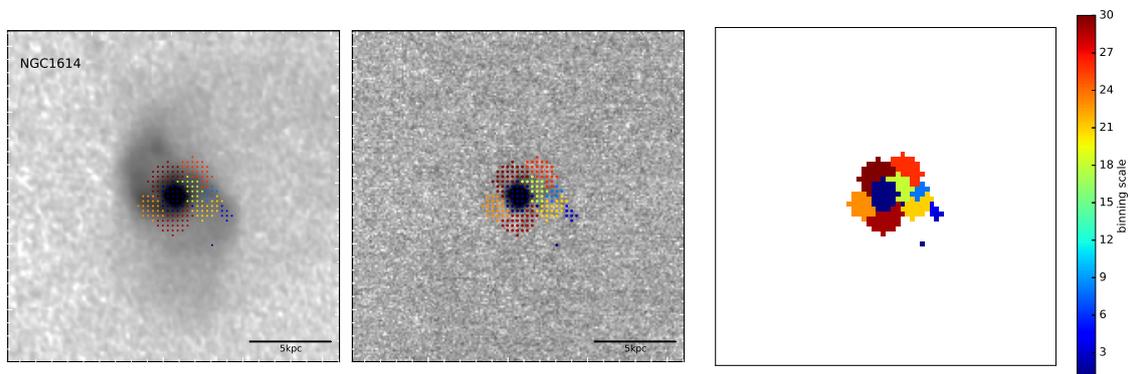


図 3.8: interacting HII LIRG の NGC1614。図 3.1 と同じ。

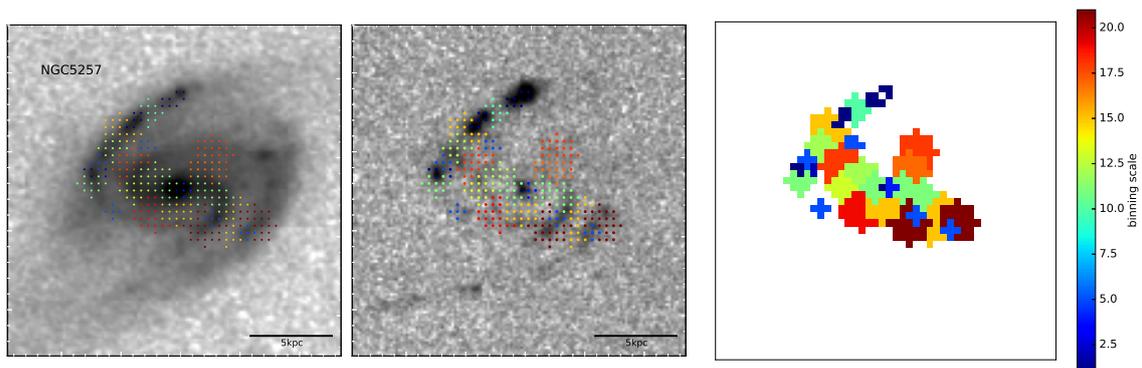


図 3.9: interacting HII LIRG に NGC5257。図 3.1 と同じ。

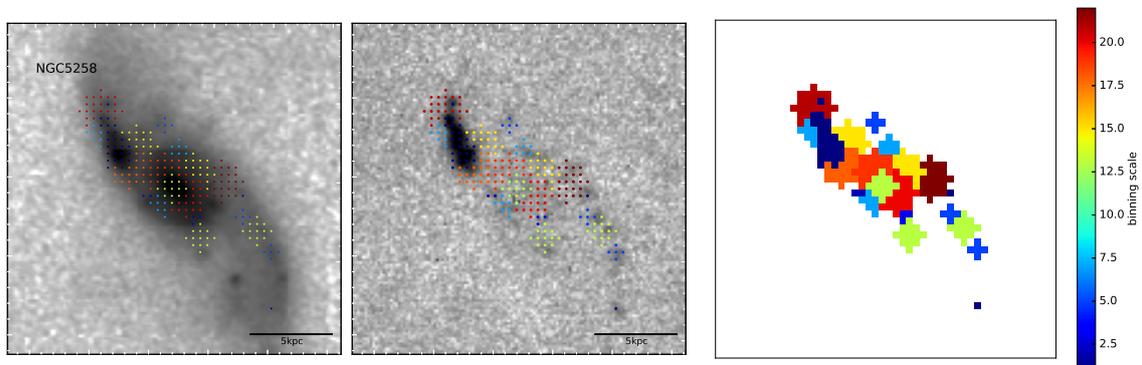


図 3.10: interacting HII LIRG の NGC5258。図 3.1 と同じ。

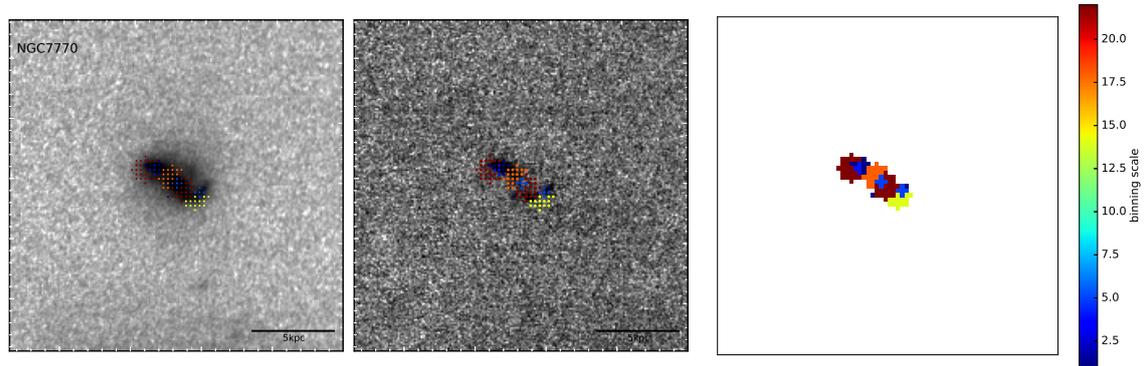


図 3.11: interacting HII LIRG の NGC7770。図 3.1 と同じ。

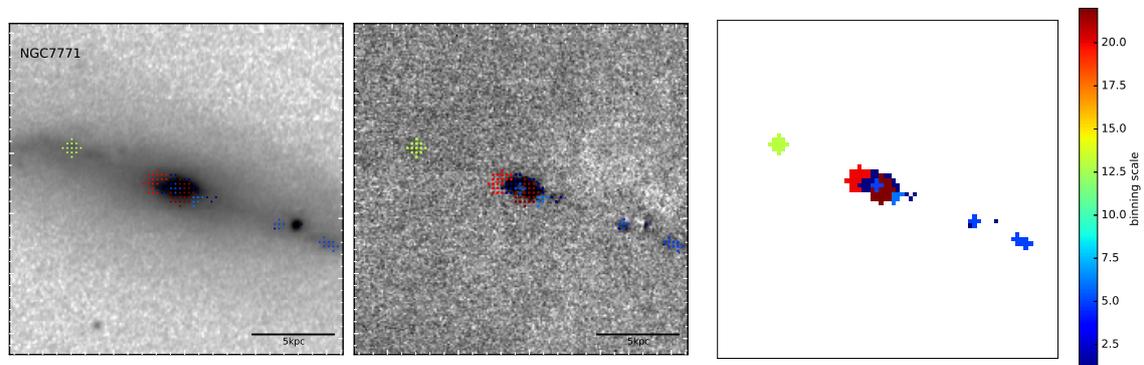


図 3.12: interacting HII LIRG の NGC7771。図 3.1 と同じ。

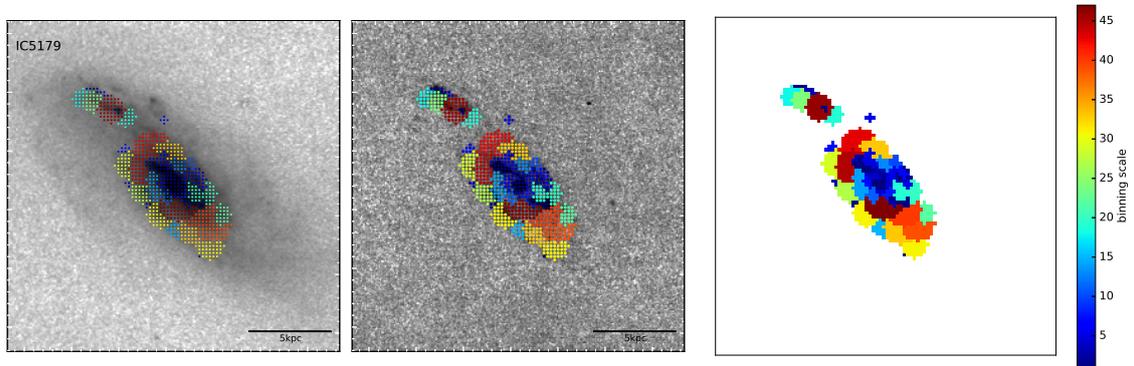


図 3.13: isolated HII LIRG の IC5179。図 3.1 と同じ。

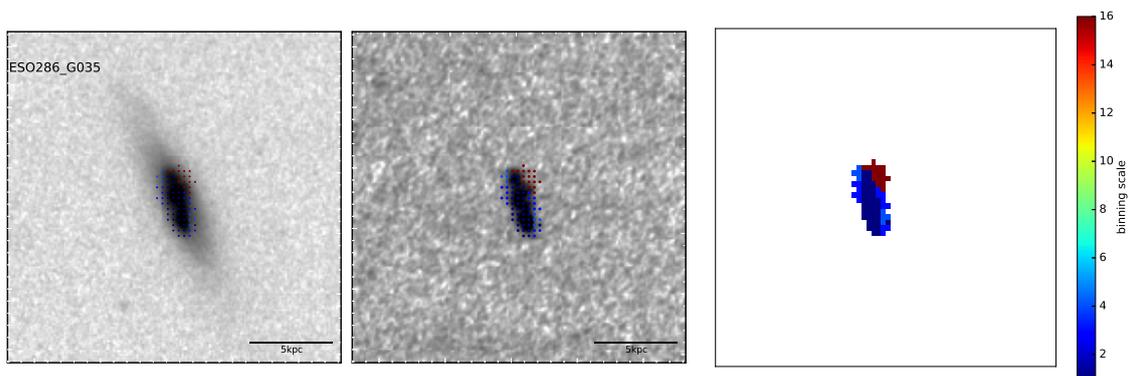


図 3.14: isolated HII LIRG の ESO286-G35。図 3.1 と同じ。

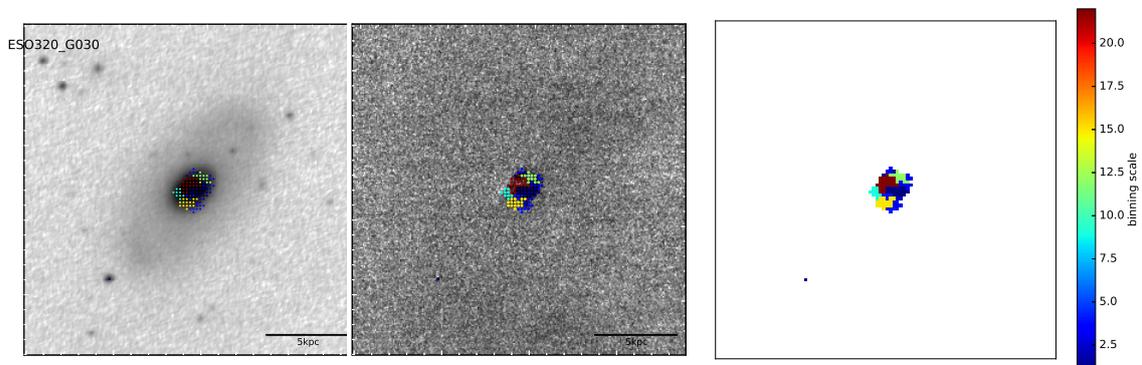


図 3.15: isolated LIRG の ESO320-G30。図 3.1 と同じ。

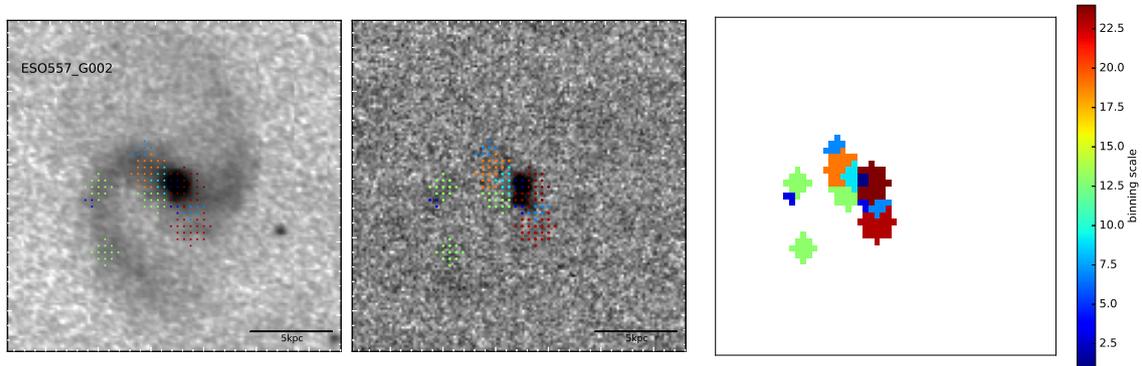


図 3.16: isolated LIRG の ESO557-G2。図 3.1 と同じ。

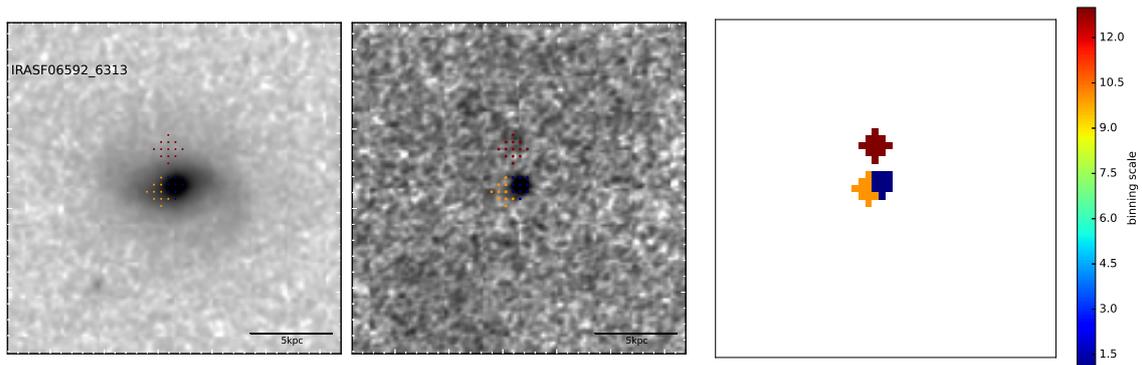


図 3.17: isolated LIRG の IRAS F 6592-6313。図 3.1 と同じ。

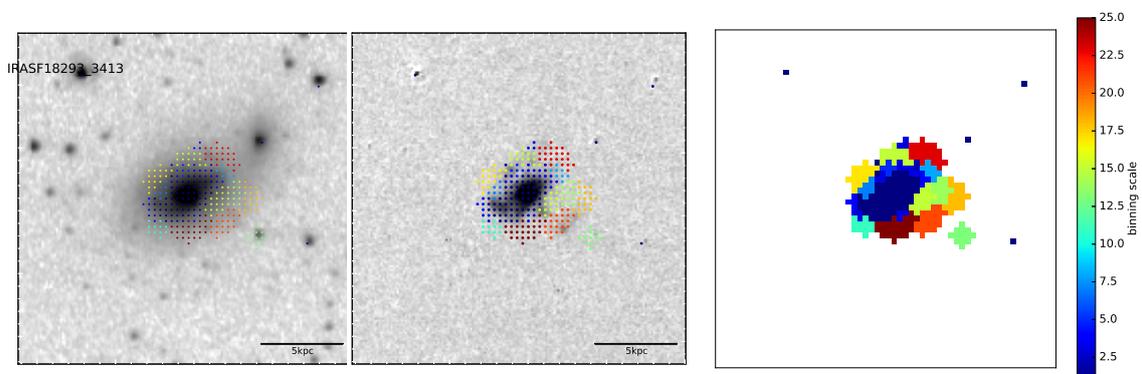


図 3.18: isolated LIRG の IRAS F 18293-3413。図 3.1 と同じ。

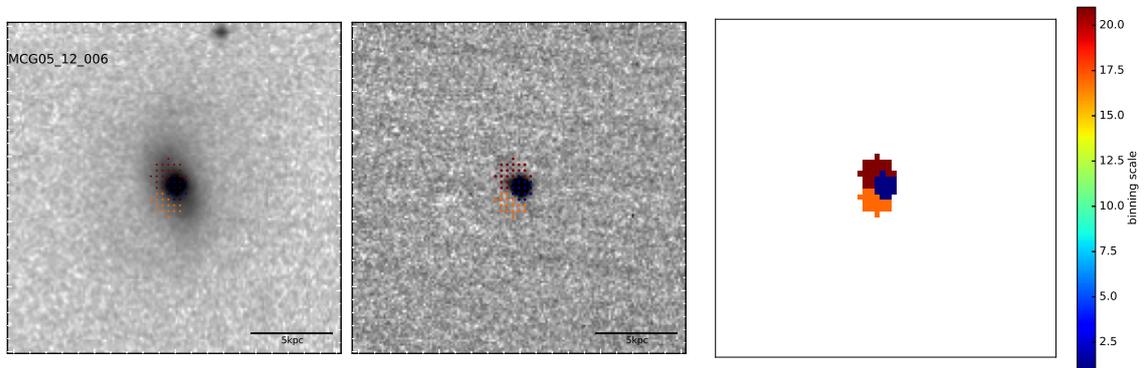


図 3.19: isolated LIRG の MCG5-12-6。図 3.1 と同じ。

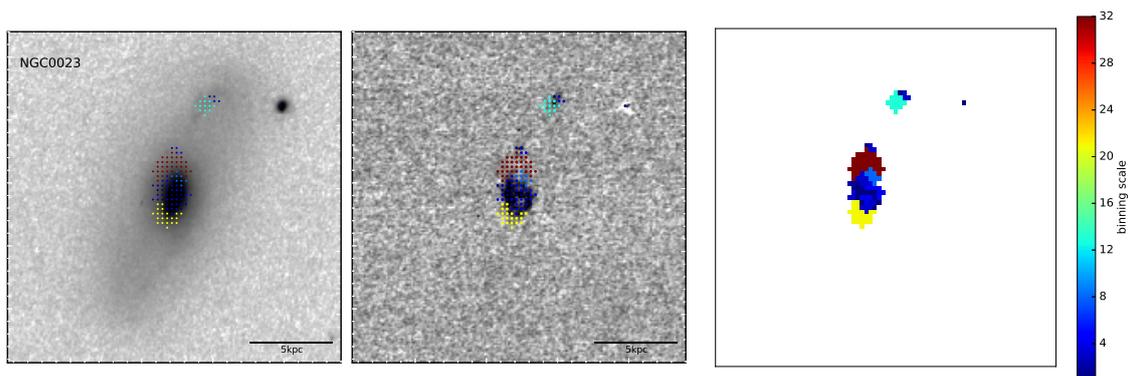


図 3.20: isolated HII LIRG の NGC23。図 3.1 と同じ。

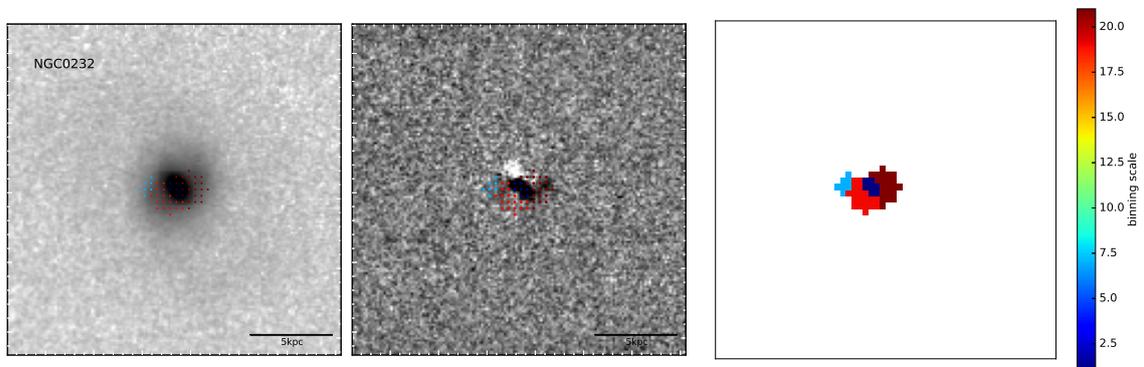


図 3.21: isolated HII LIRG の NGC232。図 3.1 と同じ。

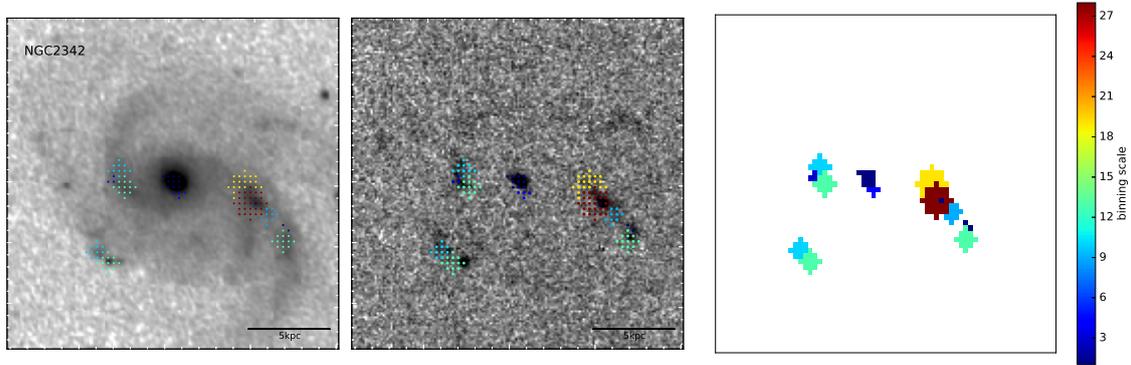


図 3.22: isolated HII LIRG の NGC2342。図 3.1 と同じ。

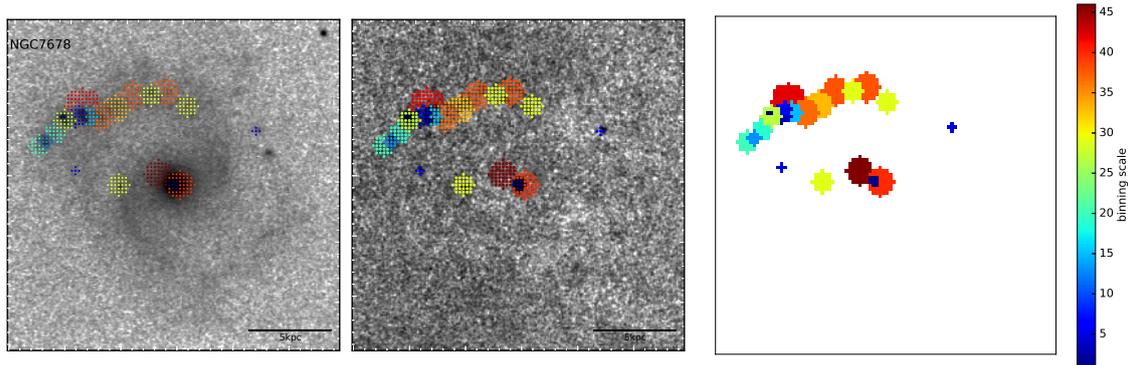


図 3.23: isolated HII LIRG の NGC7678。図 3.1 と同じ。

第4章 LIRG の空間分解したSFMS

4.1 LIRG と SFMS

個々の LIRG の空間分解した星形成活動の議論を始める前に、まず近傍銀河の中における LIRG の位置付けを確認しておく必要がある。そこで図 4.1 に今回の LIRG サンプルの質量と SFR を SFMS と比較した図を示す。青四角は interacting LIRG を、赤三角は isolated LIRG を示す。グレーで塗りつぶした領域が $z=0$ での SFMS(Renzini & Peng 2015) で、比較のために $z=1$ での SFMS(Elbaz et al. 2007) を実線で、 $z=2$ での SFMS(Daddi et al. 2007) をダッシュ線で示す。この図からわかるように、LIRG は近傍銀河としては比較的激しい星形成活動を行っていることが示唆され、interacting LIRG は MS よりも 0.6 dex, isolated LIRG は 0.3 dex 高く、LIRG 全体としては 0.5 dex 高い。この結果は、interaction が SFR をファクターで 3 から 4 程度 enhance するという観測結果 (e.g., Jogee et al. 2009, Robaina et al. 2009) と合致している。

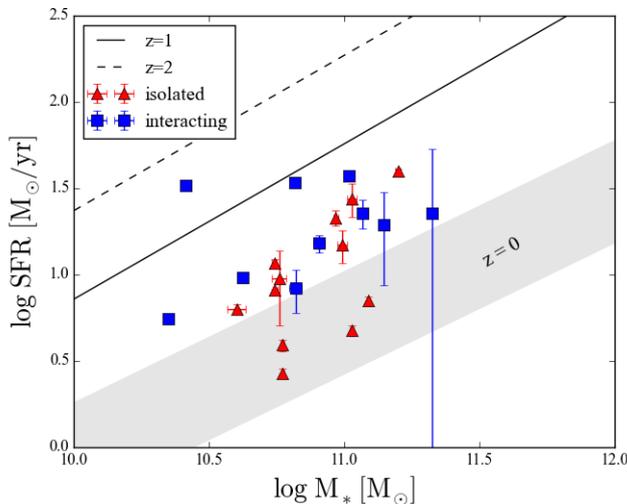


図 4.1: 銀河全体の質量-星形成率の図。赤のプロットは isolated HII LIRG の、青のプロットは interacting HII LIRG である。グレーで示した領域は SDSS のデータから得られた $z=0$ での SFMS(Renzini & Peng 2015) で、実線とダッシュ線はそれぞれ $z=1$ (Elbaz et al. 2007), $z=2$ (Daddi et al. 2007) での SFMS を表している。

4.2 LIRG の空間分解した SFMS

空間分解した星質量面密度と星形成率面密度の関係を図 4.2 に示す。なお、個々の銀河における関係については、一例を図 4.3 に、それ以外は付録 A に示す。青の点は interacting LIRG に属する領域を、赤の点は isolated LIRG に属する領域を示す。実線は Maragkoudakis et al. (2017) で、ダッシュ線は Abdurro'uf & Akiyama (2017) で得られた $z=0$ の結果を、点線は $z=1$ での disk を 5kpc で空間分解した結果 (Magdis et al. 2016) を示している。LIRG であっても、星質量面密度と星形成率面密度の間に相関があることが見て取れる。この結果に対して次の式

$$\Sigma_{\text{SFR}} = \alpha + \beta \Sigma_*$$
 (4.1)

でフィッティングした結果を表 4.1 に示す。ただし、今回のサンプルは先行研究よりも質量面密度が高い領域に偏在しているため (先行研究の主な探査領域は $7 < \Sigma_* < 10$)、ここでは Abdurro'uf & Akiyama (2017) と同じ $\beta = 1.0$ で固定してフィッティングを行った。これからわかるように、isolated LIRG は先行研究の関係線上に乗るのに対し、interacting LIRG はやや上方に位置し、isolated LIRG よりも 0.2 dex 高い。interacting LIRG が isolate 銀河よりも上方に位置する傾向は、特に質量面密度が高い領域において顕著であり、低い領域においては両者の差が小さいことが図 4.2 から示唆される。しかし interacting LIRG の $\log \Sigma_* > 10$ のデータ点は NGC 1614 のみであることには注意する必要がある。

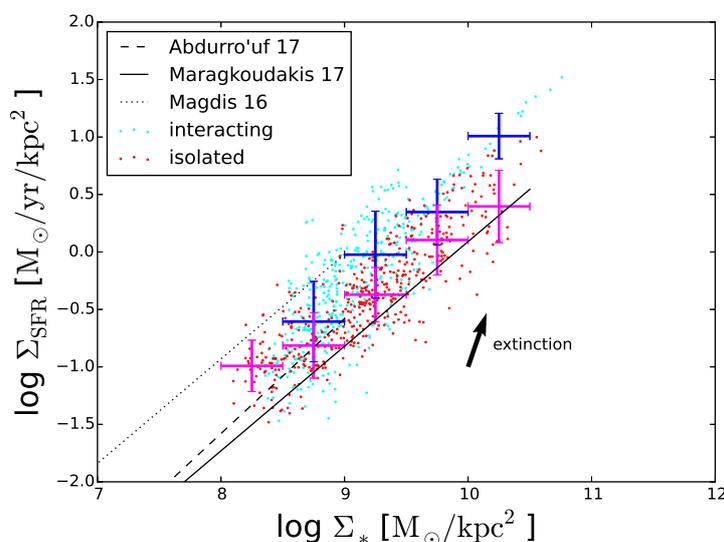


図 4.2: 空間分解した質量面密度-星形成率面密度の図。赤のプロットは isolated HII LIRG の、青のプロットは interacting HII LIRG である。各色の十字は $8.0 < \log \Sigma_* [M_\odot \text{ kpc}^{-2}] < 10.5$ の範囲において 0.5 dex 刻みの bin を取った時の、 Σ_{SFR} の median と標準偏差を示す。ただし、 Σ_* に関しては、bin の中心から 0.25 dex のエラーバーを表示している。また、 $8.0 < \log \Sigma_* [M_\odot \text{ kpc}^{-2}] < 8.5$ における interacting LIRG のデータ点が数点程度しかないため、median およびエラーバーは表示していない。 $z=0$ での先行研究で得られた空間分解した SFMS として、実線は Maragkoudakis et al. (2017) を、ダッシュ線は Abdurro'uf & Akiyama (2017) を、点線は Magdis et al. (2016) の $z=1$ において空間分解能 $\sim 5\text{kpc}$ で得られた関係を示す。矢印は $A_v=4$ の減光を受けた場合の影響を示す。

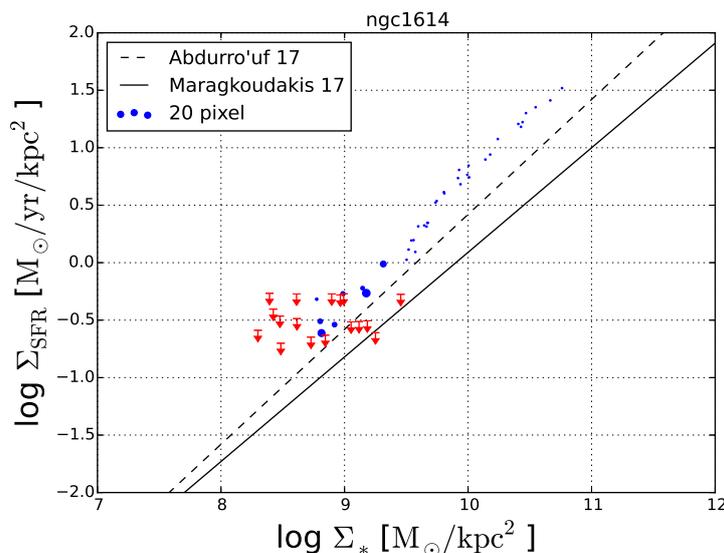


図 4.3: NGC 1614 における、空間分解した質量面密度-星形成率面密度の図。プロットのサイズはビニングスケールの大きさに対応している。赤の下向き矢印は、 K_s 画像では 3σ 以上で検出されたが、 $Pa\alpha$ 画像では 3σ の検出限界以下だった点を示す。参考として、20 ピクセルビニングの場合のプロットのサイズを左上に示している。

表 4.1: 空間分解した SFMS へのフィッティング結果

| | α | β |
|-----------------------------|------------------|---------|
| Maragkoudakis et al. (2017) | -9.01 ± 0.05 | 0.91 |
| Abdurro'uf & Akiyama (2017) | -9.58 | 1.0 |
| interacting | -9.35 | [1.0] |
| isolated | -9.58 | [1.0] |
| interacting + isolated | -9.47 | [1.0] |

4.3 merger stage

前節では LIRG を interacting と isolated に分類したが、ここではさらに interacting LIRG を §2.1 で記したように early merger, merging, merger remnant に分類して、merger の与える影響を調べていく。図 4.4 の左図に ALMA データのある 4 天体 (NGC5257/8: early merger, IC4687: merging, NGC1614: merger remnant) の星質量面密度と星形成率面密度の関係を示す。これから分かるように、それぞれサンプル天体が少ないために統計的に有意ではないが、merger の進展に伴い面密度が上昇していることが示唆される。図 4.4 の右図には、ALMA データの無い天体についても同様に merger stage で分けて示したが、左図と同様の傾向が示唆される。

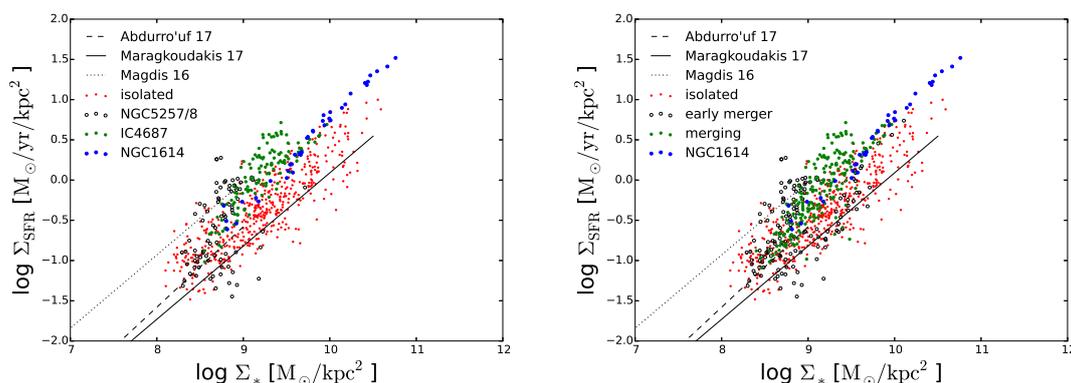


図 4.4: 左図: ALMA データのある 4 天体についての、空間分解した星質量面密度-星形成率面密度の図。赤い plot は isolated LIRG 全ての plot である。黒の中抜き plot が early merger の NGC5257/8 を、緑の plot は merging LIRG の IC4687、青の plot は merger remnant の NGC1614 を示している。右図: ALMA データの無い interacting LIRG についても、merger stage で分類して plot した図。黒の中抜き plot が early merger を、緑の plot が merging LIRG を示している。

4.4 動径方向依存性

前節で見たように、interacting LIRG は isolated LIRG よりも sSFR が enhance されている傾向が見られた。§3.1 に示した個々の天体の画像を見ても分かるように、interacting LIRG には clump が点在し、銀河中心から外れた場所でも sSFR が高くなっている傾向が見られる一方、isolated LIRG ではクランプはあまり見られず、sSFR の enhancement は見られないことが示唆される。そこで、それぞれの銀河についてどの場所で星形成活動が活性化しているかを調べるため、各星形成領域に対して銀河中心からの距離を R_{25} で規格化して星質量面密度-星形成率面密度の相関および sSFR の動径分布を調べた図を図 4.5、図 4.6 に示す。ここで R_{25} とは、B band で 25 [mag arcsec⁻²] となる銀河の半径であり、NED から取得した。ここで各領域の位置として、Ks のカウントの最も高い領域すなわちサイズ可変な aperture を作成した時の開始点を取る。ただし、2 つの銀河が近接しているために R_{25} を正しく測定できない、interacting LIRG の ESO 343 IG13 は除外している。ただし、ここでプロットされている点はいずれも Pa α の検出された星形成領域に限定されており、銀河中心から同じ距離にあっても、星形成の検出されなかった領域は含まれていないことに注意する必要がある。

図 4.5 から分かるように、中心に近い領域ほど星質量面密度も星形成率面密度も高くなっていることが分かる。さらに図 4.6 の左図では青四角が interacting LIRG、赤三角が isolated LIRG を示しており、同一の r/R_{25} であっても、interacting LIRG の方が isolated LIRG よりもわずかに質量面密度が低いものの、星形成率面密度が高い傾向があることが分かる。さらに、図 4.6 の右図から分かるように、interacting LIRG の方が isolated LIRG よりも同一の r/R_{25} で sSFR が高い傾向がある。また、interacting LIRG はどの半径においても $\log \text{sSFR} \sim -9.3$ 程度で一定であるのに対し、isolated LIRG は中心では sSFR が interacting LIRG よりも 0.5 dex 程度低く、外側に行くほど interacting LIRG の値に近づくことが分かる。

以上の議論は星形成領域に限定して行ってきた。しかし、星形成領域に限定しない、無バ

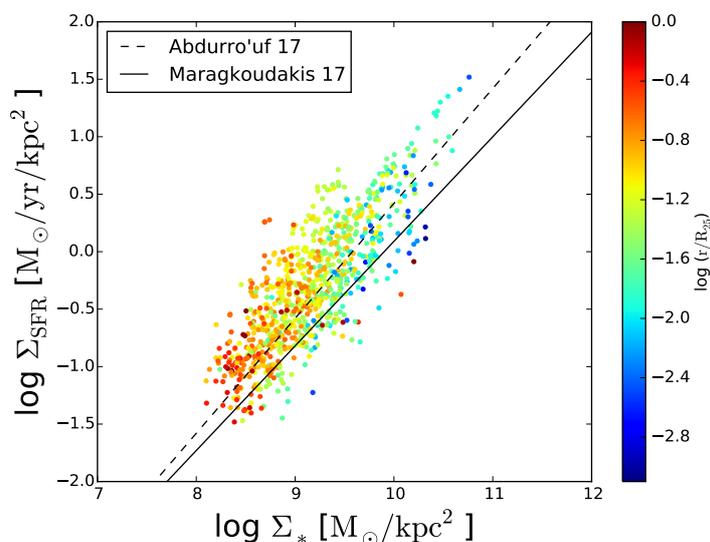


図 4.5: 銀河中心からの距離を R_{25} で規格化して色付けをしたときの、空間分解した星質量面密度-星形成率面密度図。

イアスな情報を取得することも星形成活動の理解には重要である。そこで、無バイアスな星形成活動の動径分布を調べるために、 r/R_{25} で規格化した楕円もしくは楕円環の aperture で測光を行った。その結果を図 4.7 の左図に示す。ここで、個々の線は別々の天体を表し、青線は interacting LIRG を、赤線は isolated LIRG を示す。同じ分類の中でも、個々の天体間の分散が大きいことが分かる。そこで、各 r/R_{25} bin で interacting/isolated 別に中央値と分散を求めた図を図 4.7 の右図に示す。interacting LIRG の方が isolated LIRG よりも中心部で星形成活動が enhance しているように見えるが、エラーも大きくここでは有意な差は見られないことが分かる。

4.5 MS からの offset

§4.1 で、LIRG 全体として SFMS よりも上方に位置することが示唆されたが、この現象が個々の LIRG 内部の星形成領域が全体的に enhance された星形成を行っているのか、それとも一部の領域でのみ enhance しているのかを調べることは、LIRG の星形成活動の性質を知る上で重要になる。そこで、個々の銀河の $z=0$ での MS (Renzini & Peng 2015) からの距離として、以下で定義するパラメーター

$$\Delta MS_{\text{global}} = \text{SFR} - \text{SFR}_{\text{MS}}(M_*) \quad (4.2)$$

を導入することで、個々の星形成領域が、その領域が属している銀河の MS からの距離に応じて星質量面密度-星形成率面密度図上でどの位置を占めるのかを調べた。ここで、 $\text{SFR}_{\text{MS}}(M_*)$ とは、MS 上に位置する質量 M_* の銀河の星形成率である。その結果を図 4.8 の左図に示す。MS 上に位置する銀河は $z=0$ での先行研究 (Abdurro'uf & Akiyama 2017,

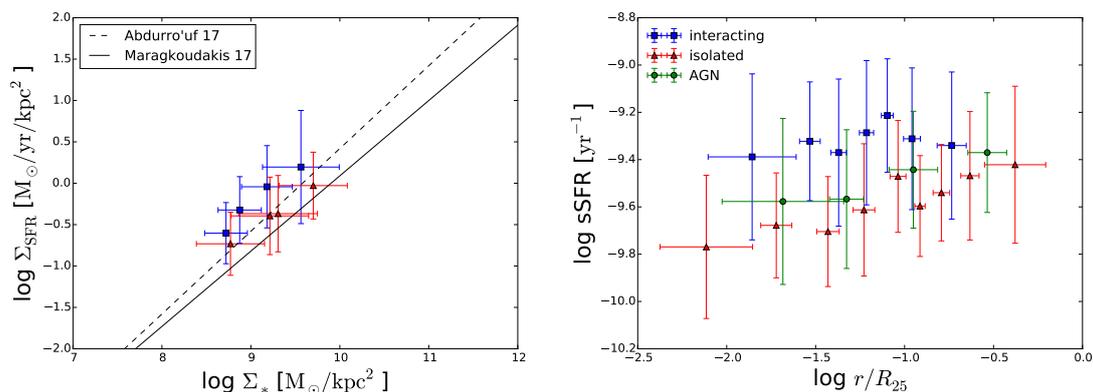


図 4.6: 左図: 銀河中心からの距離を R_{25} で規格化して、 $r/R_{25} < -1.5$, $-1.5 < r/R_{25} < -1.2$, $-1.2 < r/R_{25} < -0.9$, $-0.9 < r/R_{25}$ で bin 分けしたときの、各 bin における median のプロット。青四角は interacting LIRG を、赤三角は isolated LIRG を示す。最も内側の bin ほど、右上に位置している。右図: R_{25} で規格化したときの、銀河中心からの距離と sSFR の関係。青四角は interacting LIRG を、赤三角は isolated LIRG を、緑丸は AGN (§6.3.1) を示す。

Maragkoudakis et al. 2017) の関係線に乗るのに対し、MS よりも上に位置する銀河は、空間分解しても先行研究の関係より上に位置することが分かる。

そこで、 $z=0$ での空間分解された SFMS (Abdurro'uf & Akiyama 2017) からの距離として、新しく以下のパラメーター

$$\Delta MS_{\text{local}} = \Sigma_{\text{SFR}} - \Sigma_{\text{SFR}_{\text{MS}}}(\Sigma_*) \quad (4.3)$$

を導入し、 ΔMS_{local} と $\Delta MS_{\text{global}}$ の間の関係を調べた図を図 4.8 の右図に示す。直線は $\Delta MS_{\text{global}} = \Delta MS_{\text{local}}$ となるところを示す。ダッシュ線は全プロットに対して同一の重みをかけてフィッティングした結果を示す。この図からわかるように、個々の天体内部での ΔMS_{local} のばらつきは大きいものの、 $\Delta MS_{\text{global}}$ の増加とともに ΔMS_{local} も増加していることが分かる。

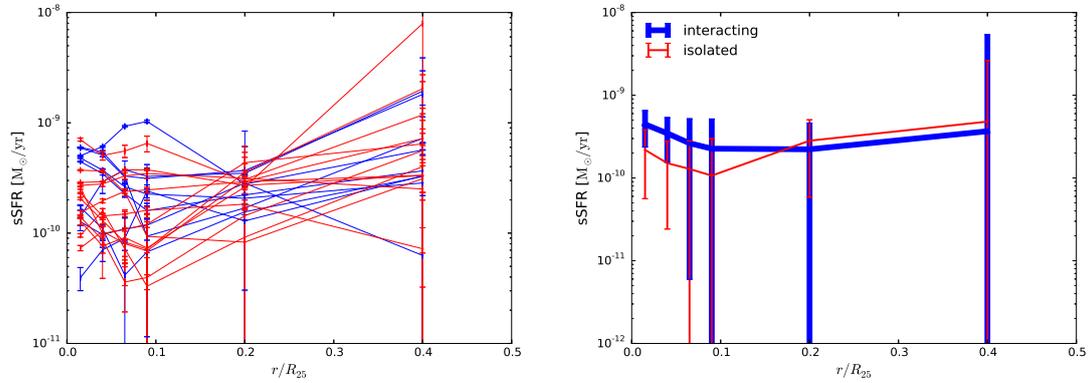


図 4.7: 左図: $r/R_{25} < 0.03$, $0.03 < r/R_{25} < 0.05$, $0.05 < r/R_{25} < 0.08$, $0.08 < r/R_{25} < 0.1$, $0.1 < r/R_{25} < 0.3$, $0.3 < r/R_{25} < 0.5$ の円もしくは円環で測光した場合の、sSFR の動径分布。それぞれの線は、別々の天体のプロファイルを示している。青線は interacting LIRG を、赤線は isolated LIRG を示す。右図: 左図のデータを、interacting/isolated LIRG で分けて中央値と分散を求めたときの sSFR の動径分布。

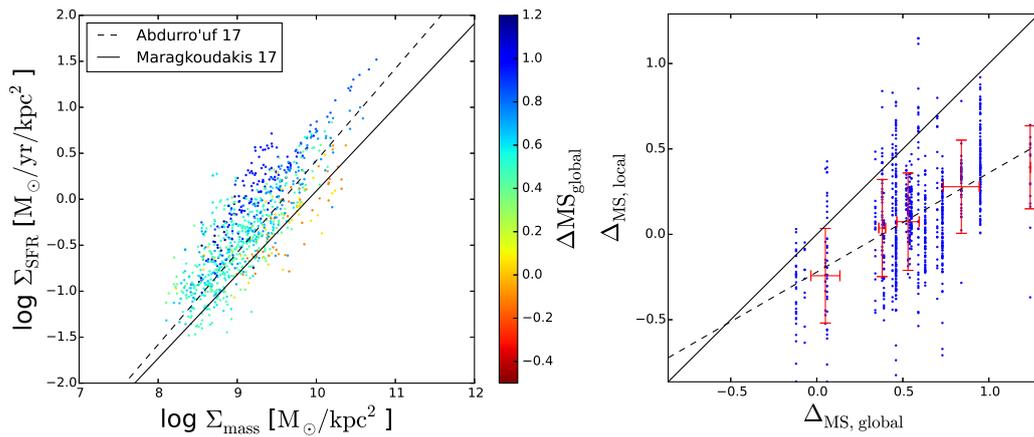


図 4.8: 左図: ΔMS に応じて各領域を色付けした星質量面密度-星形成率面密度図。右図: $\Delta MS_{\text{global}}$ と ΔMS_{local} の関係を示した図。実線は $\Delta MS_{\text{global}} = \Delta MS_{\text{local}}$ となるところを、ダッシュ線は全プロットに対して同一の重みをかけてフィッティングした結果を示す。

第5章 STAR FORMATION LAW

5.1 空間分解したKS law

分子ガス面密度と星形成率面密度の間の相関を調べることは、星形成を支配する物理を知る上で、非常に重要になる。そこで、我々は $^{12}\text{CO}(1-0)$ もしくは $^{12}\text{CO}(2-1)$ のデータのある HII LIRG について、それらの関係を調べた。なお、上記の条件を満たす天体は IC 4687, NGC 1614, NGC 5257, NGC 5258 の、いずれも interacting LIRG だけであった。図 5.1 に、半径 $1''$ の aperture を各銀河にばらまいて空間分解した場合の分子ガス面密度と、星形成率面密度の関係を示す。なお、ここでは CO と Pa α がともに 3σ 以上で検出された領域だけをプロットしている。プロットの形の違いは、aperture が属している天体の違いを表している。比較のため、Daddi et al. (2010) で示された normal 銀河のディスクでの関係を赤の実線で、スターバーストの関係を青の実線で示す。なお、これらのプロットは Pa α (\leftrightarrow SFR) の検出限界でリミットされている。

この図から分かるように、NGC5257を除くと interacting LIRG は近傍 normal 銀河の関係と矛盾せず、 $\log \tau_{\text{dep}} / \text{yr} = \Sigma_{\text{gas}} / \Sigma_{\text{SFE}} = 8.7 \pm 0.3$ であった。

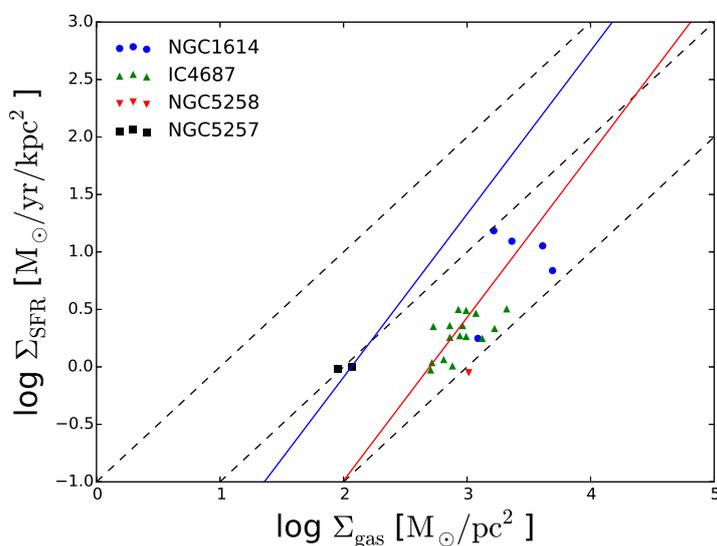


図 5.1: 半径 $1.0''$ (~ 400 pc) の aperture を銀河内部にばらまいて得られた、空間分解された KS law。プロットの違いは天体の違いを表す。赤の実線は Daddi et al. (2010) のディスクでの関係を、青の実線は同じく Daddi et al. (2010) のスターバーストの関係を示している。ダッシュ線は τ_{dep} 一定の線を表し、上から順に $\tau_{\text{dep}}=10\text{Myr}$, 100Myr , 1Gyr を示している。

5.2 extended KS law

Shi et al. (2011) において、星質量面密度をパラメーターに加えた extended KS law を考えると、star formation law がより小さな分散で記述されることが示唆されている。しかし、これを近傍 U/LIRG などの starburst regime にまで拡張した研究は少なく、(Shi et al. 2018)、ここではそれを試みしてみる。Shi et al. (2018) では、 $\Sigma_*^N \Sigma_{\text{gas}}$ を考えたとき、 $N = 0.5$ の場合に mid-plane pressure と相関があることを示唆しており、我々も $\Sigma_*^{0.5} \Sigma_{\text{gas}}$ と Σ_{SFR} の間の相関を調べた結果を図 5.2 に示す。aperture のサイズは前節と同様 $1''.0$ とし、CO と Pa α , Ks がいずれも 3σ 以上で検出された領域だけをプロットしている。なお、CO と Ks では検出されたが、Pa α では検出されなかった点に関しては、上限値として灰色の矢印で示している。ダッシュ線は Shi et al. (2018) で得られた近傍 normal 銀河での関係を示し、同じ傾き 1.09 で今回のサンプルに対して fitting した結果をドット線で示す。

この図から分かるように、LIRG の点は Shi et al. (2018) の関係とほぼ一致した。一方、Shi et al. (2018) では今回のサンプルにも含まれる NGC1614 と IC4687 に対して同様の解析を、より高い空間分解能 (~ 200 pc) で行っており、それらはこの関係よりも上にオフセットしていることが示唆されている。実際、このような dense な領域 ($\log \Sigma_{\text{gas}} \gtrsim 3$ [M_{\odot}/pc^2]) では dense gas fraction が高いことが先行研究から示唆されており (e.g., Elbaz et al. 2011, Genzel et al. 2015)、 Σ_{gas} の代わりに $\Sigma_{\text{dense gas}}$ を使うことで統一性が取り戻せる可能性は残されている。

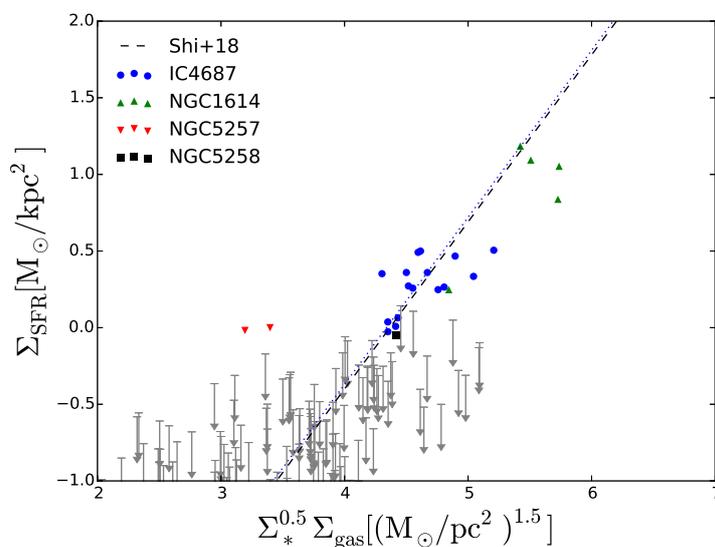


図 5.2: 半径 $1.0''$ の aperture を銀河内部にばらまいて得られた、空間分解された extended-KS law。プロットされているのは、Ks, Pa α , CO(1-0) のいずれの画像でも $\text{SN} > 3$ で検出された領域を示し、プロットの違いは天体の違いを表す。下向き矢印は Pa α が検出限界以下だった領域の 3σ 上限値を示す。ダッシュ線は Shi et al. (2018) で得られた関係を示す。点線は Shi et al. (2018) と同じ傾きを仮定した場合の best fit である。

第6章 議論

6.1 質量光度比による不定性

§3.2において、我々はB03の質量光度比を用いて、質量面密度を算出した。しかし、Z09の星形成領域の色補正を考慮した質量光度比を用いると、青い領域では質量が軽めに見積もられることが分かった。そこで、このことが interacting/isolated LIRG に対してどのような影響を与えるかを調べる。ただし、サンプル天体を SDSS の測光データのある天体に限定したため、interacting LIRG としては NGC 1614, NGC 5257, NGC 5258, NGC 7771 の4天体、isolated LIRG は NGC 23, NGC 7678, UGC 2982 の3天体だけを使用する。それぞれの銀河に対して半径 $2''.0$ の aperture をばらまき、Ks, Pa α , i, r の4バンドの全てで SN 3 以上で検出された領域について、2つの質量光度比を適用した時の図を図 6.1 に示す。青三角と中抜き青三角はそれぞれ interacting LIRG に属する星形成領域に対して B03, Z09 を適用した場合、赤丸と中抜き赤丸はそれぞれ isolated LIRG に属する星形成領域に対して B03, Z09 を適用した場合のプロットである。これから分かるように、interacting LIRG の方が青い領域が多く、Z09 を使った場合、質量面密度がより軽い方向に見積もられ、 0.7 ± 0.3 dex 軽くなるのに対し、isolated LIRG には赤い領域が多く、質量面密度は 0.2 ± 0.3 dex しか軽く見積もられないことが分かる。つまり、4.2 で見積もられた isolated LIRG に対する interacting LIRG の offset は 0.2 dex からさらに 0.5 dex 程度大きくなりうることを示唆される。

6.2 銀河同士の相互作用による影響

§4.2 で見たように、空間分解した SFMS を調べると、interacting LIRG は isolated LIRG よりも 0.2 dex 高く、さらに前節で述べた質量光度比の効果を考えて、その差がさらに 0.5 dex 程度大きくなりうることを示唆された。そこで、銀河相互作用が星形成活動に与える影響について、そのシナリオをここでは考えたい。merger のシミュレーション (e.g., Bournaud et al. 2010, Powell et al. 2013, Renaud et al. 2014) では、潮汐トルクによってガスが銀河中心の数 kpc に輸送されることでガス面密度と速度分散、そして重力不安定性が増加し、高密度で大質量な冷たい分子ガスが形成し、いわゆる starburst regime (e.g., Tacconi et al. 2013, Renaud et al. 2014, Genzel et al. 2015) を作ることを示されている。これは semi-analytical model でも再現されている (e.g., Renaud et al. 2012, Hopkins 2013)。一方で、この regime において、fgas の高さもしくは SFE の高さ、あるいはその両方が効いているのか、観測からも様々な研究が行われてきているが (e.g., Tacconi et al. 2010, Tacconi et al. 2013, Silverman et al. 2015, Saintonge et al. 2016, Tacconi et al.

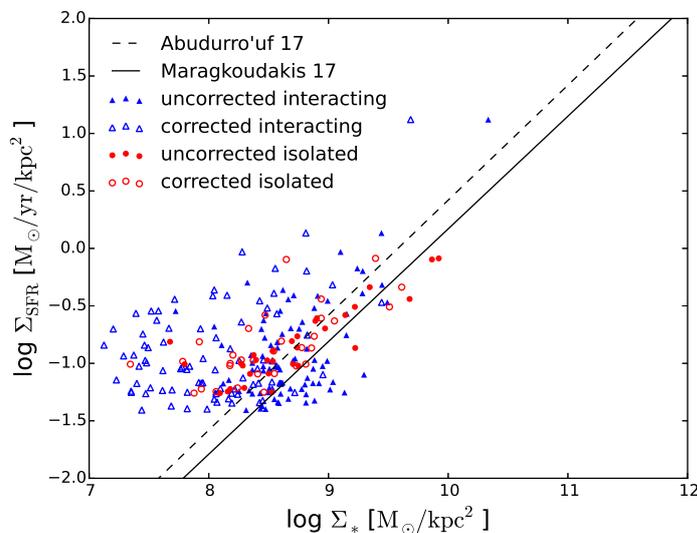


図 6.1: B03 の質量光度比と、Z09 の星形成領域の色を考慮した質量光度比を用いた場合の、interacting LIRG と isolated LIRG の星質量面密度-星形成率面密度図への影響の比較。青上三角とシアン下三角はそれぞれ interacting LIRG に対して B03, Z09 を適用した場合、赤丸とマゼンダ四角はそれぞれ isolated LIRG に対して B03, Z09 を適用した場合のプロットである。

2017)、未だ決着は付いていない。

しかし、今回の結果は ALMA を用いて LIRG の空間分解した star formation law を調べた Saito et al. (2016) や Xu et al. (2015)、Pereira-Santaella et al. (2016) と同じく、星形成率面密度の高い LIRG においては SFE が高いことを支持するものであった。さらに今回の天体はスターバーストではなくディスクの関係 (Daddi et al. 2010) に従い、Renaud et al. (2014) などのシミュレーションで示された結果とは異なっていた。一方で、近傍の LIRG を面分光観測した Rich et al. (2012) では、merger の進行に伴い金属量の動径方向の勾配が negative から平坦になり、merger の初期段階では metal-poor gas の流入が起きているが、星形成に伴い中心部で金属量が増加することが指摘している。また、Larson et al. (2016) では近傍 LIRG の CO 観測を行い、merger の early-mid stage では原子ガスがより内側に集められ、分子ガスが形成されて gas fraction (f_{gas}) が増加することが示されている。この議論への決着をつけるためには、様々な merger stage の近傍銀河を電波干渉計で空間分解した分子ガスの観測を行い、 f_{gas} および SFE が merger とともにどのように進化するかを今後調べていく必要がある。

6.3 Pa α の電離源

6.3.1 AGN

我々はここまで、AGN 天体を除き、Pa α の電離源は星形成活動によるものと仮定して議論を進めてきた。LIRG の高い赤外線光度には AGN の影響が強いものも多いが、AGN からの強くて硬い放射は中心部において水素ガスを電離し、星形成由来でない再結合線の

放射が観測される (e.g., Kaviraj 2009, Iwasawa et al. 2011, Davies et al. 2014)。他にも、ジェットや銀河風による衝撃波なども電離源となる (e.g., Singh et al. 2013, Davies et al. 2014)。しかし、中心部に AGN を持つ銀河であっても、中心部以外では星形成活動による電離が支配的な天体も存在している (e.g., Zhang et al. 2016, Belfiore et al. 2016, Belfiore et al. 2017)。そこで、AGN 天体であっても中心から $1''.8$ 以上離れている領域 (median psf FWHM $0''.9$ の2倍) を、AGN による再結合線フラックスへの影響が無い領域と仮定し、星質量面密度と星形成率面密度を求めた。その結果を図 6.2 に示す。シアンのプロットが HII LIRG の、青のプロットが AGN LIRG の中心部以外の領域を表している。傾き 1 で固定した直線でフィッティングした結果は $\log \Sigma_{\text{SFR}} = \log \Sigma_* - 9.56$ と、表 4.1 に示した結果と比較すると isolated LIRG や近傍 normal 銀河との差が見られない結果となった。

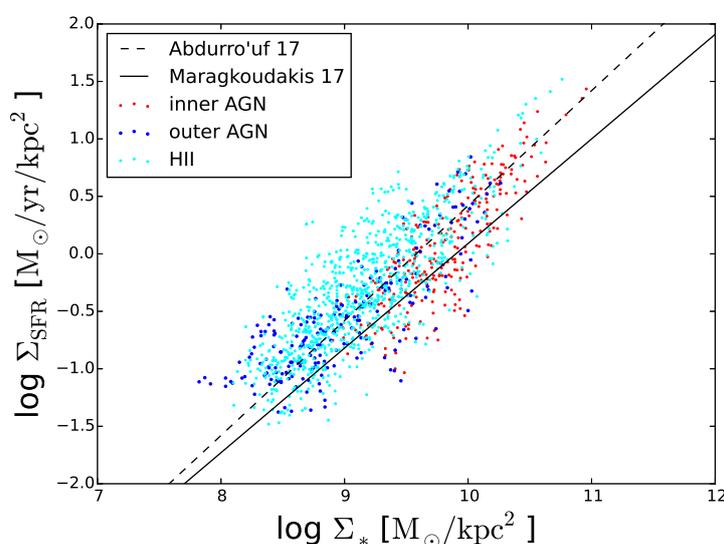


図 6.2: 青と赤のプロットは、それぞれ AGN LIRG 中の中心領域 ($r \geq 1''.8$) と中心部以外の領域 ($r < 1''.8$) を表す。シアンのプロットは HII LIRG 中の領域を表す。

一方で、AGN の影響を強く受けていると思われる、AGN 銀河の中心領域に着目したときの星質量面密度と星形成率面密度の関係を図 6.2 の赤のプロットに示す。なお、ここでも $\text{Pa}\alpha$ の電離源は星形成活動と想定して星形成率面密度を求めているため、星形成率は実際よりも大きく見積もられている可能性が高いことに注意する必要がある。AGN 銀河の中心領域でも星質量面密度と星形成率面密度が相関を示し、その分布が星質量面密度の高い領域に偏っている一方で、星形成率面密度は AGN でない銀河と比較して低い値を示すことが示唆される。傾き 1 で固定した直線でフィッティングした結果は $\log \Sigma_{\text{SFR}} = \log \Sigma_* - 9.72$ と、isolated LIRG や、AGN の中心以外の領域よりも 0.15 dex 程度低い値を示している。その原因としては、AGN や星形成活動、あるいはそれ以外のメカニズムにより $\text{Pa}\alpha$ 輝線が放射されるが、AGN negative feedback などが効いているために星形成活動は抑制されていることが考えられる。

6.3.2 それ以外の電離源

星形成活動や AGN 以外にも、低金属量ウォルフ・ライエ星や、post-AGB star、HII 領域周辺の diffuse な電離ガス、衝撃波なども水素ガスの電離源となりうる (Belfiore et al. 2016, Belfiore et al. 2017, Medling et al. 2018)。これらの影響は特にバルジなどの質量面密度が高いところでの影響が大きいことが先行研究で示唆されている (Pan et al. 2018)。そこで、LIRG のバルジ領域における $\text{Pa}\alpha$ の電離源が何であるかを探るため、領域をバルジの内外で分類して、星質量面密度と星形成率面密度の比較を行った。なお、バルジ半径は、Ks 画像に対してディスクとバルジの 2 成分で GALFIT を行った Tateuchi (2015) から取得した。その図を図 6.3 に示す。赤のプロットは $r < r_{\text{bulge}}$ の領域、青のプロットは $r > 2r_{\text{bulge}}$ の領域を表す。傾き 1 で固定した直線でフィッティングを行った結果はともに $\log \Sigma_{\text{SFR}} = \log \Sigma_* - 9.51$ であったが、その分散は後者は 0.34 dex であったのに対し、前者は 0.40 dex であった。このことは、バルジにおける f_{gas} や SFE、あるいはこの節の始めに述べたような多様な電離源の影響を受けるために分散が大きくなっていることが示唆されている。

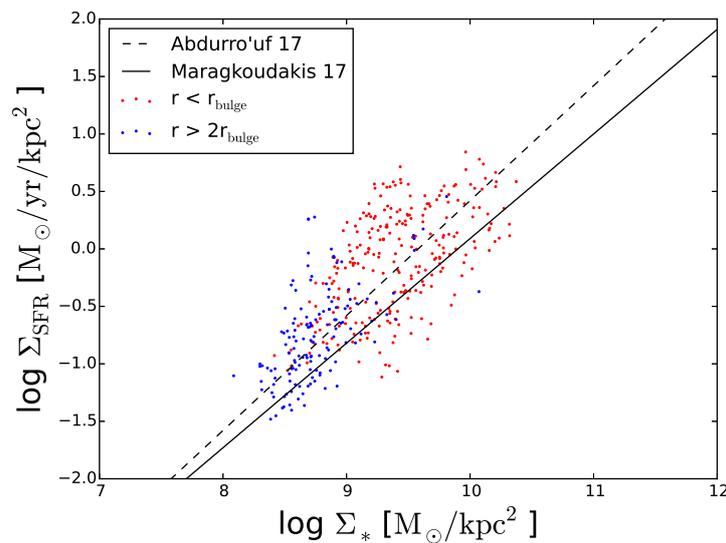


図 6.3: HII LIRG のバルジの内外を比較した図。赤のプロットはバルジの影響の強い領域 ($r < r_{\text{bulge}}$)。青のプロットはディスク領域 ($r > 2r_{\text{bulge}}$) を示す。

第7章 総括

我々はダスト減光に強く、かつ空間分解可能な波長の水素原子再結合線 $\text{Pa}\alpha$ ($\lambda 1.875\mu\text{m}$) を用いて、LIRG における空間分解された SFMS を調べた。結果、以下のことが明らかになった。

- 空間分解をせずに銀河全体としてみたとき、LIRG は近傍 normal 銀河の SFMS よりも 0.5 dex 上に位置する。
- LIRG であっても空間分解した SFMS を形成している。isolated LIRG の SFMS は近傍 normal 銀河の SFMS と一致するが、interacting LIRG は isolated LIRG よりも 0.2 dex 高い位置に MS が位置し、質量光度比や減光などの影響を考慮するとさらに 0.5 dex の差が広がる可能性がある。
- 空間分解した時の interacting LIRG の τ_{dep} は isolated LIRG や normal 銀河と差は無かった。
- LIRG の AGN 領域では negative feedback が原因と思われる $\text{Pa}\alpha$ 輝線強度の suppression が見られたが、AGN LIRG であっても中心部以外の領域では isolated LIRG や近傍 normal 銀河の空間分解した SFMS と一致し、その電離源としては星形成活動が支配的であることが期待される。
- バルジ領域における空間分解した SFMS の分散が大きいことから、そこでは $\text{Pa}\alpha$ の電離源として星形成活動だけでなく、衝撃波や post-AGB などの星の影響も強く存在することが示唆された。

本研究では K_s と $\text{Pa}\alpha$ の受けるダスト減光の影響は小さいことを考慮して、減光補正を行わずに議論を進めた。一方で、質量の算出に用いた質量光度比は領域の色に依存するため、今後は狭輝線観測もしくは可視赤外線面分光観測を行うことで減光マップを作成し、より詳細な議論を行っていきたいと考えている。さらに同様の観測は [NII] や [OIII] などの高電離輝線の輝線強度マップを取得することにより、LIRG 内部の個々の領域での電離源が何であるかを調べることで、より正確な星形成の議論が可能となると期待される。

さらに、sub-kpc スケールでの LIRG のガス密度を isolated LIRG でも調べることにより、interacting LIRG の星形成率の enhancement が局所的な SFE の増加によるものであるのか、さらには normal と starburst という bimodal な SF law が存在するのかを検証していきたい。

謝辞

はじめに、本論文の作成にあたり、ご指導と助言をいただいた指導教官の本原顕太郎准教授に深く感謝いたします。

小西真弘氏、高橋英則氏、加藤夏子氏、寺尾恭範氏、河野志洋氏、櫛引洸佑氏には普段よりSWIMSチームメンバーとして非常にお世話になりました。ありがとうございました。

研究室OBの館内謙氏、小早川大氏、そして北川祐太郎氏には、本研究に関わる直接の先輩として、解析や研究発表に関して幅広くご指導頂きました。ありがとうございました。また、国立天文台の斎藤俊貴氏にはALMAのデータの提供と再解析を快く引き受けてくださり、ありがとうございました。

MIMIZUKUチームおよびTomo-eチームをはじめとする天文センターの方々には、日々の様々な場面や実験でお世話になりました。ありがとうございました。

最後に、日々の生活でお世話になり、そして私の研究生生活を支え応援してくれた家族と友人、そして天文学専攻の同期に深く感謝いたします。

参考文献

- Abdurro'uf & Akiyama, M. 2017, MNRAS, 469, 2806
- Albrecht, M., Krügel, E., & Chini, R. 2007, A&A, 462, 575
- Alonso-Herrero, A., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Colina, L., Pérez-González, P. G., & Ryder, S. D. 2006, Apj, 650, 835
- Belfiore, F., Maiolino, R., Maraston, C., Emsellem, E., Bershad, M. A., Masters, K. L., Bizyaev, D., Boquien, M., Brownstein, J. R., Bundy, K., Oravetz, A., Pan, K., Roman-Lopes, A., Thomas, D., Weijmans, A.-M., Westfall, K. B., & Yan, R. 2017, MNRAS, 466, 2570
- Belfiore, F., Maiolino, R., Maraston, C., Emsellem, E., Bershad, M. A., Masters, K. L., Yan, R., Boquien, M., Brownstein, J. R., & Bundy, K. 2016, MNRAS, 461, 3111
- Bell, E. F., McIntosh, D. H., Katz, N., & Weinberg, M. D. 2003, Astrophysical Journal, 149, 289
- Bournaud, F., Powell, L. C., Chapon, D., & Teyssier, R. 2010, Proceedings of the International Astronomical Union, 6, 160
- Brennan, R., Pandya, V., Somerville, R. S., Barro, G., Bluck, A. F. L., Taylor, E. N., Wuyts, S., Bell, E. F., Dekel, A., Faber, S., Ferguson, H. C., Koekemoer, A. M., Kurczynski, P., McIntosh, D. H., Newman, J. A., & Primack, J. 2017, MNRAS, 465, 619
- Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R. C., Kinney, A. L., Koornneef, J., & Storchi Bergmann, T. 2000, The Astrophysical Journal, 533, 682
- Cano-Díaz, M., Sánchez, S. F., Zibetti, S., Ascasibar, Y., Bland-Hawthorn, J., Ziegler, B., Delgado, R. M. G., Walcher, C. J., García-Benito, R., Mast, D., Mendoza-Pérez, M. A., Falcón-Barroso, J., Galbany, L., Husemann, B., Kehrig, C., Marino, R. A., Sánchez-Blázquez, P., López-Cobá, C., López-Sánchez, A. R., & Vilchez, J. M. 2016, ApJL, 821, L26
- Cerviño, M. & Luridiana, V. 2002, Astrophysics and Space Science, 281, 207
- Daddi, E., Dickinson, M., Morrison, G., Chary, R., Cimatti, A., Elbaz, D., Frayer, D., Renzini, A., Pope, A., Alexander, D. M., Bauer, F. E., & Giavalisco, M. 2007, ApJ, 670, 156

- Daddi, E., Elbaz, D., Walter, F., Bournaud, F., Salmi, F., Carilli, C., Dannerbauer, H., Dickinson, M., Monaco, P., & Riechers, D. 2010, *The Astrophysical Journal Letters*, 714, 118
- Dale, D. A., de Paz, A. G., Gordon, K. D., Hanson, H. M., Armus, L., Bendo, G. J., Bianchi, L., Block, M., Boissier, S., Boselli, A., Buckalew, B. A., Buat, V., Burgarella, D., Calzetti, D., Cannon, J. M., Engelbracht, C. W., Helou, G., Hollenbach, D. J., Jarrett, T. H., Kennicutt, R. C., Leitherer, C., Li, A., Madore, B. F., Martin, D. C., Meyer, M. J., Murphy, E. J., Regan, M. W., Roussel, H., Smith, J. D. T., Sosey, M. L., Thilker, D. A., & Walter, F. 2007, *The Astrophysical Journal*, 655, 863
- Davies, R. L., Rich, J. A., Kewley, L. J., & Dopita, M. A. 2014, *MNRAS*, 439, 3835
- Delgado, R. M. G., Fernandes, R. C., Pérez, E., García-Benito, R., Fernández, R. L., Lacerda, E. A. D., Cortijo-Ferrero, C., de Amorim, A. L., Asari, N. V., Sánchez, S. F., Walcher, C. J., Wisotzki, L., Mast, D., Alves, J., Ascasibar, Y., Bland-Hawthorn, J., Galbany, L., Kennicutt, R. C., Márquez, I., Masegosa, J., Mollá, M., Sánchez-Blázquez, P., Vílchez, J. M., & Collaboration, C. 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 44, 17
- Elbaz, D., Daddi, E., Le Borgne, D., Dickinson, M., Alexander, D. M., Chary, R.-R., Starck, J.-L., Brandt, W. N., Kitzbichler, M., Macdonald, E., Nonino, M., Popesso, P., Stern, D., & Vanzella, E. 2007, *A&A*, 468, 33
- Elbaz, D., Dickinson, M., Hwang, H. S., Díaz-Santos, T., Magdis, G., Magnelli, B., Le Borgne, D., Galliano, F., Pannella, M., Chanical, P., Armus, L., Charmandaris, V., Daddi, E., Aussel, H., Popesso, P., Kartaltepe, J., Altieri, B., Valtchanov, I., Coia, D., Dannerbauer, H., & Dasyra, K. 2011, *A&A N. Förster Schreiber C. Papovich*, 533151826
- Ellison, S. L., Sánchez, S. F., Ibarra-Medel, H., Antonio, B., Mendel, J. T., & Barrera-Ballesteros, J. 2018, *Mon. Not. R. Astron. Soc*, 474, 2039
- Gallazzi, A., Brinchmann, J., Charlot, S., & White, S. D. M. 2008, *Mon. Not. R. Astron. Soc*, 383, 1439
- García-Burillo, S., Usero, A., Alonso-Herrero, A., Graciá-Carpio, J., Pereira-Santaella, M., Colina, L., Planesas, P., & Arribas, S. 2012, *A&A*, 539
- Genzel, R., Tacconi, L. J., Gracia-Carpio, J., Sternberg, A., Cooper, M. C., Shapiro, K., Bolatto, A., Bouché, N., Bournaud, F., Burkert, A., Combes, F., Comerford, J., Cox, P., Davis, M., Schreiber, N. M. F., Garcia-Burillo, S., & Lutz, D. 2010, *Mon. Not. R. Astron. Soc*, 407, 2091
- Genzel, R., Tacconi, L. J., Lutz, D., Saintonge, A., Berta, S., Magnelli, B., Combes, F., García-Burillo, S., Neri, R., Bolatto, A., Contini, T., Lilly, S., Boissier, J., Boone, F.,

- Bouché, N., Bournaud, F., Burkert, A., Carollo, M., Colina, L., Cooper, M. C., Cox, P., Feruglio, C., Förster Schreiber, N. M., Freundlich, J., Gracia-Carpio, J., Juneau, S., Kovac, K., Lippa, M., Naab, T., Salome, P., Renzini, A., Sternberg, A., Walter, F., Weiner, B., Weiss, A., & Wuyts, S. 2015, *The Astrophysical Journal*, 800
- Haan, S., Surace, J. A., Armus, L., Evans, A. S., Howell, J. H., Mazzarella, J. M., Kim, D. C., Vavilkin, T., Inami, H., Sanders, D. B., Petric, A., Bridge, C. R., Melbourne, J. L., Charmandaris, V., Diaz-Santos, T., Murphy, E. J., U, V., Stierwalt, S., & Marshall, J. A. 2010, *Jet Propulsion*, 51
- Hahn, C., Tinker, J. L., & Wetzell, A. 2017, *The Astrophysical Journal*, 841, 6
- Hopkins, P. F. 2013, *MNRAS*, 433, 170
- Howell, J. H., Armus, L., Mazzarella, J. M., Evans, A. S., Surace, J. A., Sanders, D. B., Petric, A., Appleton, P., Bothun, G., Bridge, C., Chan, B. H. P., Frayer, D. T., Haan, S., Inami, H., Kim, D.-C., Lord, S., Madore, B. F., Melbourne, J., Schulz, B., U, V., Vavilkin, T., Veilleux, S., & Xu, K. 2010, *The Astrophysical Journal*, 715, 572
- Hummer, D. G. & Storey, J. 1987, *MNRAS*, 224, 801
- Iwasawa, K., Sanders, D. B., Teng, S. H., Armus, L., Evans, A. S., Howell, J. H., Komossa, S., Mazzarella, J. M., Petric, A. O., Surace, J. A., Vavilkin, T., Veilleux, S., & Trentham, N. 2011, *A&A*, 529
- Jogee, S., Miller, S. H., Penner, K., Skelton, R. E., Conselice, C. J., Somerville, R. S., Bell, E. F., Zhong Zheng, X., Rix, H.-W., Robaina, A. R., Barazza, F. D., Barden, M., Borch, A., W Beckwith, S. V., R Caldwell, J. A., Peng, C. Y., Heymans, C., McIntosh, D. H., Außler, B., Jahnke, K., Meisenheimer, K., Sanchez, S. F., Wisotzki, L., Wolf, C., Papovich, C., & Mitchell, C. W. 2009, *The Astrophysical Journal*, 697, 1971
- Kaviraj, S. 2009, *Mon. Not. R. Astron. Soc*, 394, 1167
- Kennicutt, R. C. 1989, *The Astrophysical Journal*, 344, 685
- . 1998, *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, 498, 541
- Kennicutt, R. C. & Evans II, N. J. 2012, *Annu. Rev. Astron. Astrophys*, 50, 531
- Kennicutt, R. C., Hao, C.-N., Calzetti, D., Moustakas, J., Dale, D. A., Bendo, G., Engelbracht, C. W., Johnson, B. D., & Lee, J. C. 2009, *The Astrophysical Journal*, 703, 1672
- Kim, C.-G., Kim, W.-T., & Ostriker, E. C. 2011, *The Astrophysical Journal*, 743
- Kobayakawa, H. 2016, PhD thesis, The University of Tokyo

- Konishi, M., Motohara, K., Tateuchi, K., Takahashi, H., Kitagawa, Y., Kato, N., Sako, S., Uchimoto, Y. K., Toshikawa, K., Ohsawa, R., Yamamuro, T., Asano, K., Ita, Y., Kamizuka, T., Komugi, S., Koshida, S., Manabe, S., Matsunaga, N., Minezaki, T., Morokuma, T., Nakashima, A., Takagi, T., Tanabé, T., Uchiyama, M., Aoki, T., Doi, M., Handa, T., Kato, D., Kawara, K., Kohno, K., Miyata, T., Nakamura, T., Okada, K., Soyano, T., Tamura, Y., Tanaka, M., Tarusawa, K. i., & Yoshii, Y. 2015, *Astron. Soc. Japan Publications of the Astronomical Society of Japan*, 67, 1
- Krumholz, M. R., Dekel, A., & Mckee, C. F. 2012, *The Astrophysical Journal*, 745
- Larson, K. L., Sanders, D. B., Barnes, J. E., Ishida, C. M., Evans, A. S., Mazzarella, J. M., Kim, D.-C., Privon, G. C., & Flewelling, H. A. 2016, *The Astrophysical Journal*, 825
- Leroy, A. K., Walter, F., Brinks, E., Bigiel, F., De Blok, W. J. G., Madore, B., & Thornley, M. D. 2008, *The Astronomical Journal*, 136, 2782
- Leroy, A. K., Walter, F., Sandstrom, K., Schruba, A., Munoz-Mateos, J.-C., Bigiel, F., Bolatto, A., Brinks, E., de Blok, W. J. G., Meidt, S., Rix, H.-W., Rosolowsky, E., Schinnerer, E., Schuster, K.-F., & Usero, A. 2013, *The Astronomical Journal*, 146, 19
- Ma, X., Hopkins, P. F., Faucher-Gigù Ere, C.-A., Zolman, N., Muratov, A. L., Kereš, D., & Quataert, E. 2016, *MNRAS*, 456, 2140
- Magdis, G. E., Bureau, M., Stott, J. P., Tiley, A., Swinbank, A. M., Bower, R., Bunker, A. J., Jarvis, M., Johnson, H., & Sharples, R. 2016, *MNRAS*, 456, 4533
- Maragkoudakis, A., Zezas, A., Ashby, M. L. N., & Willner, S. P. 2017, *MNRAS*, 466, 1192
- Medling, A. M., Cortese, L., Croom, S. M., Green, A. W., Groves, B., Hampton, E., Ho, I.-T., Davies, L. J. M., Kewley, L. J., Moffett, A. J., Schaefer, A. L., Taylor, E., Zafar, T., Bekki, K., Bland-Hawthorn, J., Bloom, J. V., Brough, S., Bryant, J. J., Catinella, B., Cecil, G., Colless, M., Couch, W. J., Drinkwater, M. J., Driver, S. P., Federrath, C., Foster, C., Goldstein, G., Goodwin, M., Hopkins, A., Lawrence, J. S., Leslie, S. K., Lewis, G. F., Lorente, N. P. F., Owers, M. S., Mcdermid, R., Richards, S. N., Sharp, R., Scott, N., Sweet, S. M., Taranu, D. S., Tescari, E., Tonini, C., Van De Sande, J., Walcher, C. J., & Wright, A. 2018, *MNRAS Preprint*, 000, 0
- Miralles-Caballero, D., Colina, L., & Arribas, S. 2012, *A&A*, 538
- Mitra, S., Davé, R., Simha, V., & Finlator, K. 2017, *MNRAS*, 464, 2766
- Muraoka, L. K., Takeda, M., Yanagitani, K., Kaneko, H., Nakanishi, K., Kuno, N., Sorai, K., Tosaki, T., & Kohno, K. 2015, *PASJ*, 68, 18

- Nelson, E. J., Van Dokkum, P. G., Förster Schreiber, N. M., Franx, M., Brammer, G. B., Momcheva, I. G., Wuyts, S., Whitaker, K. E., Skelton, R. E., Fumagalli, M., Hayward, C. C., Kriek, M., Labbé, I., Leja, J., Rix, H.-W., Tacconi, L. J., Van Der Wel, A., Van Den Bosch, F. C., Oesch, P. A., Dickey, C., & Lange, J. U. 2016, *The Astrophysical Journal*, 828
- Oey, M. S., Meurer, G. R., Yelda, S., Furst, E. J., Caballero Nieves, S. M., Hanish, D. J., Levesque, E. M., Thilker, D. a., Walth, G. L., Bland Hawthorn, J., Dopita, M. a., Ferguson, H. C., Heckman, T. M., Doyle, M. T., Drinkwater, M. J., Freeman, K. C., Kennicutt, Jr., R. C., Kilborn, V. a., Knezek, P. M., Koribalski, B., Meyer, M., Putman, M. E., Ryan Weber, E. V., Smith, R. C., Staveley Smith, L., Webster, R. L., Werk, J., & Zwaan, M. a. 2007, *The Astrophysical Journal*, 661, 801
- Ostriker, E. C., Mckee, C. F., & Leroy, A. K. 2010, *The Astrophysical Journal*, 721, 975
- Ostriker, E. C. & Shetty, R. 2011, *The Astrophysical Journal*, 731
- Pan, H.-A., Lin, L., Hsieh, B.-C., Sanchez, S. F., Ibarra-Medel, H., Boquien, M., Lacerna, I., Argudo-Fernandez, M., Bizyaev, D., Cano-Diaz, M., Drory, N., Gao, Y., Masters, K., Pan, K., Tabor, M., Tissera, P., & Xiao, T. 2018, *ApJ in press*
- Pandya, V., Brennan, R., Somerville, R. S., Choi, E., Barro, G., Wuyts, S., Taylor, E. N., Behroozi, P., Kirkpatrick, A., Faber, S. M., Primack, J., Koo, D. C., Mcintosh, D. H., Kocevski, D., & Lu, Y. 2017, *MNRAS*, 472, 2054
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2002, *ApJ*, 124, 266
- Pereira-Santaella, M., Alonso-Herrero, A., Santos-Lleo, M., Colina, L., Jiménez-Bailón, E., Longinotti, A. L., Rieke, G. H., Ward, M., & Esquej, P. 2011, *Astronomy & Astrophysics*, 535, 93
- Pereira-Santaella, M., Colina, L., García-Burillo, S., Planesas, P., Usero, A., Alonso-Herrero, A., Arribas, S., Cazzoli, S., Emonts, B., Piqueras López, J., & Villar-Martín, M. 2016, *A&A*, 587
- Powell, L. C., Bournaud, F., Chapon, D., & Teyssier, R. 2013, *MNRAS*, 434, 1028
- Rahman, N., Bolatto, A. D., Xue, R., Wong, T., Leroy, A. K., Walter, F., Bigiel, F., Rosolowsky, E., Fisher, D. B., Vogel, S. N., Blitz, L., West, A. A., & Ott, U. 2012, *The Astrophysical Journal*, 745
- Renaud, F., Bournaud, F., Kraljic, K., & Duc, P.-A. 2014, *MNRASL*, 442, 33
- Renaud, F., Kraljic, K., & Bournaud, F. 2012, *The Astrophysical Journal Letters*, 760
- Renzini, A. & Peng, Y. J. 2015, *Astrophysical Journal Letters*, 801

- Rich, J. A., Torrey, P., Kewley, L. J., Dopita, M. A., & Rupke, D. S. N. 2012, *The Astrophysical Journal*, 753
- Robaina, A. R., Bell, E. F., Skelton, R. E., McIntosh, D. H., Somerville, R. S., Zheng, X., Rix, H.-W., Bacon, D., Balogh, M., Barazza, F. D., Barden, M., Ohm, A., Caldwell, J. A. R., Gallazzi, A., Gray, M. E., Aussler, B., Heymans, C., Jahnke, K., Jogee, S., Van Kampen, E., Lane, K., Meisenheimer, K., Papovich, C., Peng, C. Y., An, S., Sanchez, F., Skibba, R., Taylor, A., Wisotzki, L., & Wolf, C. 2009, *The Astrophysical Journal*, 704, 324
- Romeo, A. B. & Mogotsi, K. M. 2017, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 000, 1
- Saintonge, A., Catinella, B., Cortese, L., Genzel, R., Giovanelli, R., Haynes, M. P., Janowiecki, S., Kramer, C., Lutz, K. A., Schiminovich, D., Tacconi, L. J., Wuyts, S., & Accurso, G. 2016, *MNRAS*, 462, 1749
- Saito, T., Iono, D., Xu, C. K., Ueda, J., Nakanishi, K., Yun, M. S., Kaneko, H., Yamashita, T., Lee, M., Espada, D., Motohara, K., & Kawabe, R. 2016, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 68, 11
- Sanders, D. B., Mazzarella, J. M., Kim, D.-C., Surace, J. A., & Soifer, B. T. 2003, *The Astronomical Journal*, 126, 1607
- Schmidt, M. 1959, *ApJ*, 129, 243
- Schruba, A., Leroy, A. K., Walter, F., Bigiel, F., Brinks, E., De Blok, W. J. G., Dumas, G., Kramer, C., Rosolowsky, E., Sandstrom, K., Schuster, K., Usero, A., Weiss, A., & Wiesemeyer, H. 2011, *The Astronomical Journal*, 142
- Shi, Y., Helou, G., Yan, L., Armus, L., Wu, Y., Papovich, C., & Stierwalt, S. 2011, *The Astrophysical Journal*, 73387
- Shi, Y., Yan, L., Armus, L., Gu, Q., Helou, G., Qiu, K., Gwyn, S., Stierwalt, S., Fang, M., Chen, Y., Zhou, L., Wu, J., Zheng, X., Zhang, Z.-Y., Gao, Y., & Wang, J. 2018
- Silverman, J. D., Kashino, D., Sanders, D., Kartaltepe, J. S., Arimoto, N., Renzini, A., Rodighiero, G., Daddi, E., Zahid, J., Nagao, T., Kewley, L. J., Lilly, S. J., Sugiyama, N., Baronchelli, I., Capak, P., Carollo, C. M., Chu, J., Hasinger, G., Ilbert, O., Juneau, S., Kajisawa, M., Koekemoer, A. M., Mccracken, H. J., Onodera, M., Schulze, A., Scoville, N., Strazzullo, V., & Taniguchi, Y. 2015, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 220, 12
- Singh, R., van de Ven, G., Jahnke, K., Lyubenova, M., Falcón-Barroso, J., Alves, J., Cid Fernandes, R., Galbany, L., García-Benito, R., Husemann, B., Kennicutt, R. C., Marino, R. A., Márquez, I., Masegosa, J., Mast, D., Pasquali, A., Sánchez, S. F., Walcher, J., Wild, V., Wisotzki, L., & Ziegler, B. 2013, *Astronomy & Astrophysics*, 558, A43

- Sparre, M., Hayward, C. C., Springel, V., Vogelsberger, M., Genel, S., Torrey, P., Nelson, D., Sijacki, D., & Hernquist, L. 2015, *MNRAS*, 447, 3548
- Tacchella, S., Dekel, A., Carollo, C. M., Ceverino, D., Degraf, C., Lapiner, S., Mandelker, N., & Primack, J. R. 2016, *MNRAS*, 457, 2790
- Tacconi, L. J., Genzel, R., Neri, R., Cox, P., Cooper, M. C., Shapiro, K., Bolatto, A., Bouché, N., Bournaud, F., Burkert, A., Combes, F., Comerford, J., Davis, M., Förster Schreiber, N. M., Garcia-Burillo, S., Gracia-Carpio, J., & Lutz, D. 2010, *Nature*, 463
- Tacconi, L. J., Genzel, R., Saintonge, A., Combes, F., García-Burillo, S., Neri, R., Bolatto, A., Contini, T., Schreiber, N. M. F., Lilly, S., Lutz, D., Wuyts, S., Accurso, G., Boissier, J., Boone, F., Bouché, N., Bournaud, F., Burkert, A., Carollo, M., Cooper, M., Cox, P., Feruglio, C., Freundlich, J., Herrera-Camus, R., Juneau, S., Lippa, M., Naab, T., Renzini, A., Salome, P., Sternberg, A., Tadaki, K., Übler, H., Walter, F., Weiner, B., & Weiss, A. 2017, Preprint, (Arxiv:1702.01140)
- Tacconi, L. J., Neri, R., Genzel, R., Combes, F., Bolatto, A., Cooper, M. C., Wuyts, S., Bournaud, F., Burkert, A., Comerford, J., Cox, P., Davis, M., Förster Schreiber, N. M., García-Burillo, S., Gracia-Carpio, J., Lutz, D., Naab, T., Newman, S., Omont, A., Saintonge, A., Griffin, K. S., Shapley, A., Sternberg, A., & Weiner, B. 2013, *The Astrophysical Journal*, 768
- Tateuchi, K. 2015, PhD thesis, The University of Tokyo
- Tateuchi, K., Konishi, M., Motohara, K., Takahashi, H., Kato, N. M., Kitagawa, Y., Todo, S., Toshikawa, K., Sako, S., Uchimoto, Y. K., Ohsawa, R., Asano, K., Ita, Y., Kamizuka, T., Komugi, S., Koshida, S., Manabe, S., Nakamura, T., Nakashima, A., Okada, K., Takagi, T., Tanabé, T., Uchiyama, M., Aoki, T., Doi, M., Handa, T., Kawara, K., Kohno, K., Minezaki, T., Miyata, T., Morokuma, T., Soyano, T., Tamura, Y., Tanaka, M., Tarusawa, K. i., & Yoshii, Y. 2015, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 217
- Torrey, P., Vogelsberger, M., Genel, S., Sijacki, D., Springel, V., & Hernquist, L. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 438, 1985
- Veilleux, S., Kim, D.-C., Sanders, D. B., Mazzarella, J. M., & Soifer, B. T. 1995, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 98, 171
- Verley, S., Corbelli, E., Giovanardi, C., & Hunt, L. K. 2010, *Astronomy and Astrophysics*, 510, A64
- Whitaker, K. E., Franx, M., Leja, J., van Dokkum, P. G., Henry, A., Skelton, R. E., Fumagalli, M., Momcheva, I. G., Brammer, G. B., Labbé, I., Nelson, E. J., & Rigby, J. R. 2014, *The Astrophysical Journal*, 795, 104

- Xu, C. K., Cao, C., Lu, N., Gao, Y., Diaz-Santos, T., Herrero-Illana, R., Meijerink, R., Privon, G., Zhao, Y.-H., Evans, A. S., König, S., Mazzarella, J. M., Aalto, S., Appleton, P., Armus, L., Haan, S., Inami, H., Murphy, E. J., Sanders, D. B., Schulz, B., & Van Der Werf, P. 2015, *The Astrophysical Journal*, 799
- Yoshii, Y., Doi, M., Kohno, K., Miyata, T., Motohara, K., Kawara, K., Tanaka, M., Minezaki, T., Sako, S., Morokuma, T., Tamura, Y., Tanabe, T., Takahashi, H., Konishi, M., Kamizuka, T., Kato, N., Aoki, T., Soyano, T., Tarusawa, K., Handa, T., Koshida, S., Bronfman, L., Ruiz, M. T., Hamuy, M., & Garay, G. 2010, *Proceedings of the SPIE*, 773308, 99060R
- Yuan, T.-T., Kewley, L. J., & Sanders, D. B. 2010, *The Astrophysical Journal*, 709, 884
- Zhang, K., Yan, R., Bundy, K., Bershady, M., Haffner, L. M., Walterbos, R., Maiolino, R., Tremonti, C., Thomas, D., Drory, N., Jones, A., Belfiore, F., Sánchez, S. F., Diamond-Stanic, A. M., Bizyaev, D., Nitschelm, C., Andrews, B., Brinkmann, J., Brownstein, J. R., Cheung, E., & Li, C. 2016, *MNRAS*, 000, 1
- Zheng, Z., Wang, H., Ge, J., Mao, S., Li, C., Li, R., Mo, H., Goddard, D., Bundy, K., Li, H., Nair, P., Lin, L., Long, R. J., Riffel, R., Thomas, D., Masters, K., Lopes, A. R., & Malanushenko, O. 2016, *MNRAS*, 456, 4572
- Zibetti, S., Charlot, S., & Rix, H.-W. 2009, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 400, 1181

付録A 個々のLIRGの空間分解したSFMS

今回の解析に使用した全天体について、それぞれの Σ_* - Σ_{SFR} の図を示す。青のプロットは K_s および $\text{Pa}\alpha$ の両方でSNが10以上もしくは3以上で検出された領域を、赤のプロットは $\text{Pa}\alpha$ のSNが3以下の領域の、 3σ 上限値を示す。プロットの大きさはピクセルピンニングのスケールに対応し、例として20ピクセルピンニングの場合の大きさを各図の左上に示している。

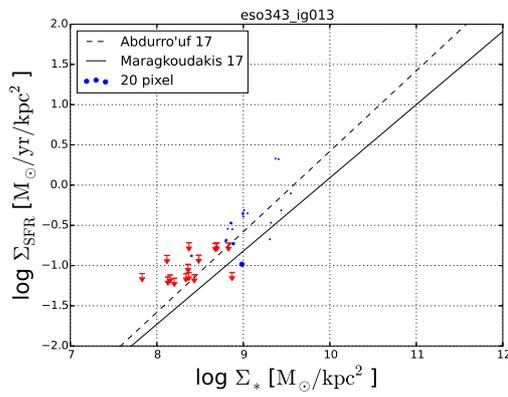


図 A.1: ESO343 IG13, interacting LIRG

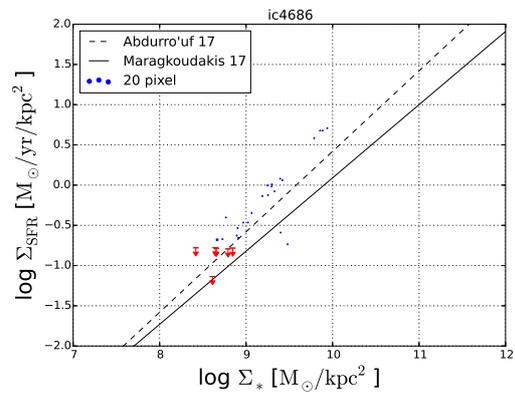


図 A.2: IC4686, interacting LIRG

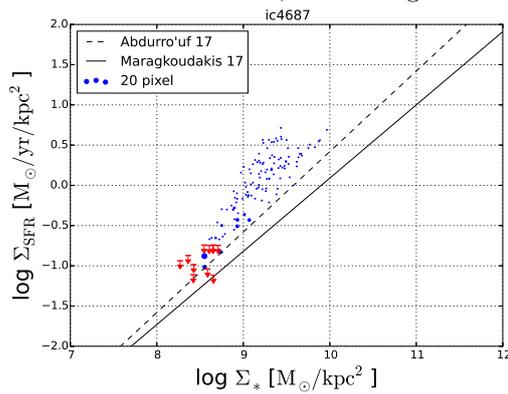


図 A.3: IC4687, interacting LIRG

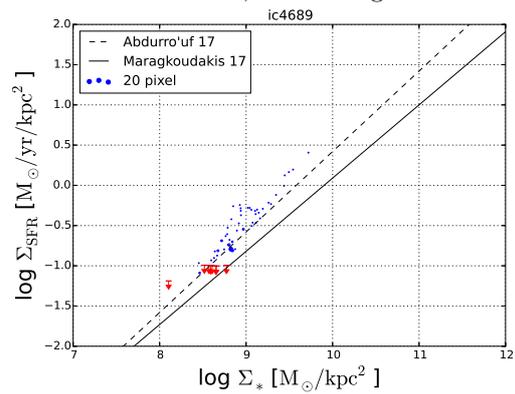
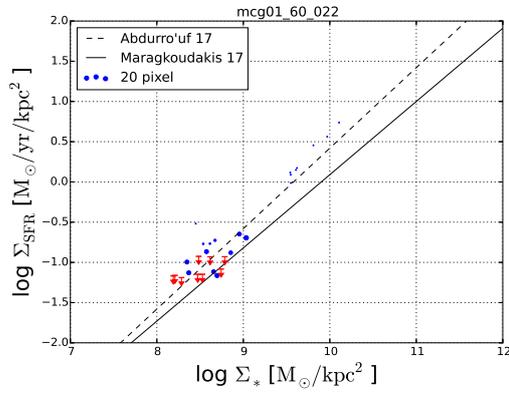
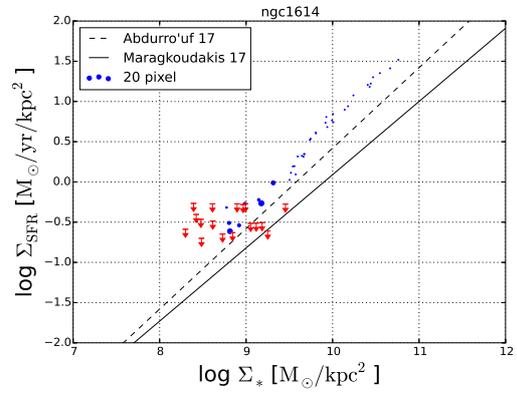


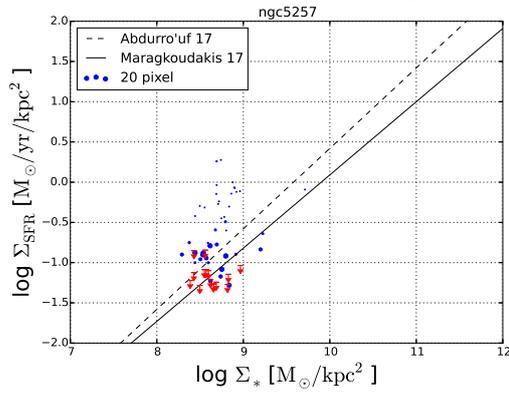
図 A.4: IC4689, interacting LIRG



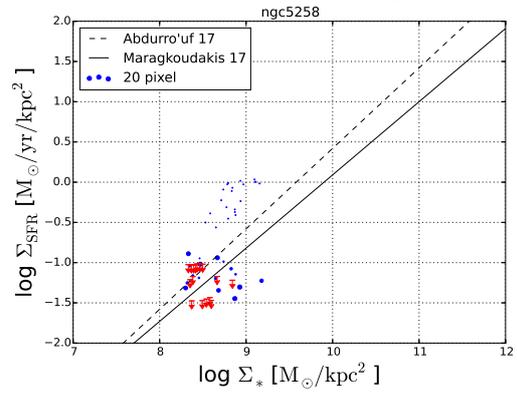
☒ A.5: MCG 1-60-22, interacting LIRG



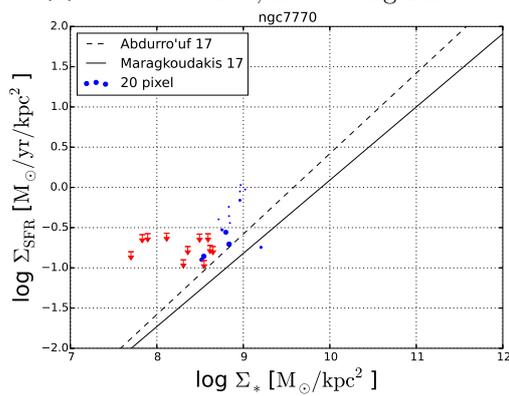
☒ A.6: NGC 1614, interacting LIRG



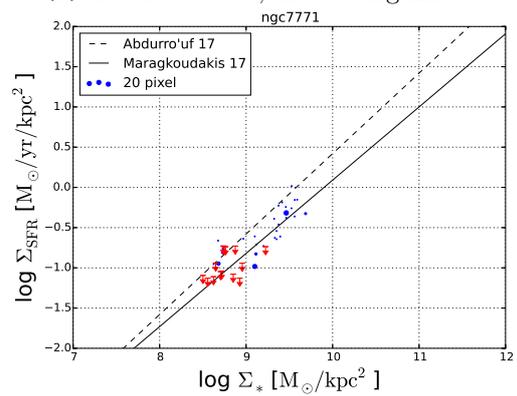
☒ A.7: NGC 5257, interacting LIRG



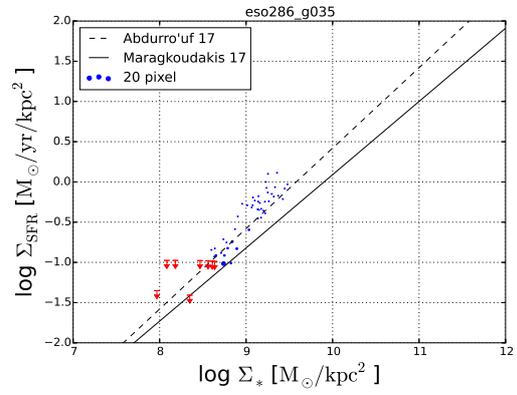
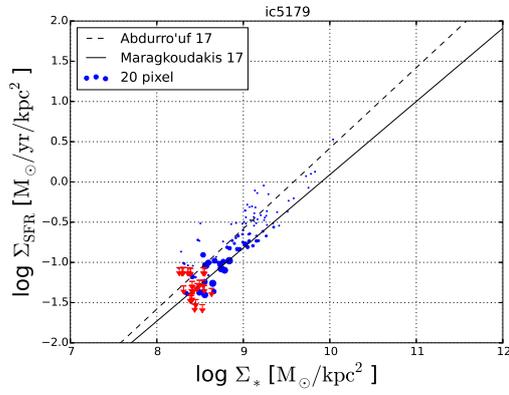
☒ A.8: NGC 5258, interacting LIRG



☒ A.9: NGC 7770, interacting LIRG

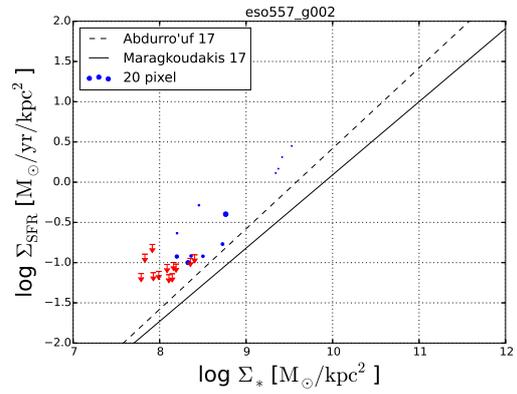
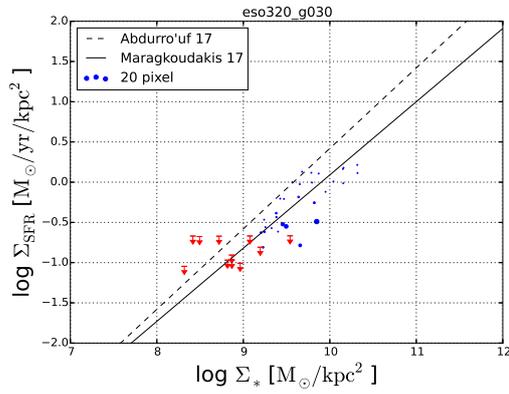


☒ A.10: NGC 7771, interacting LIRG



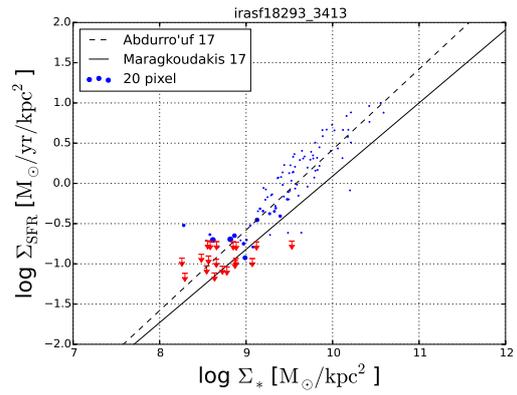
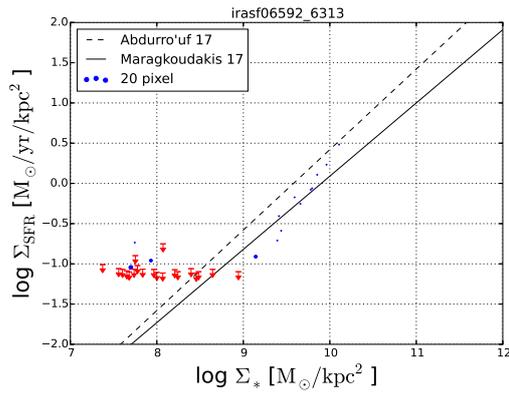
☒ A.11: IC5179, isolated LIRG

☒ A.12: ESO286-G35, isolated LIRG



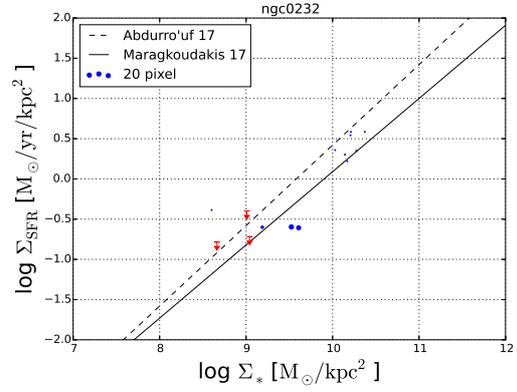
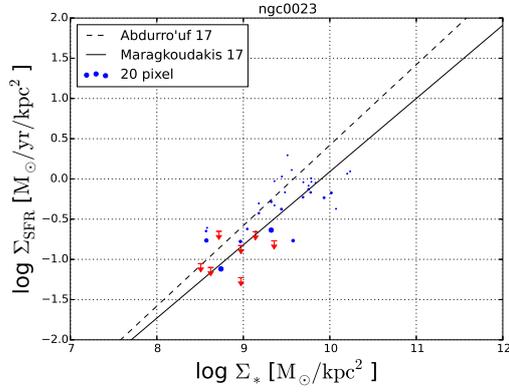
☒ A.13: ESO320-G30, isolated LIRG

☒ A.14: ESO557-G2, isolated LIRG

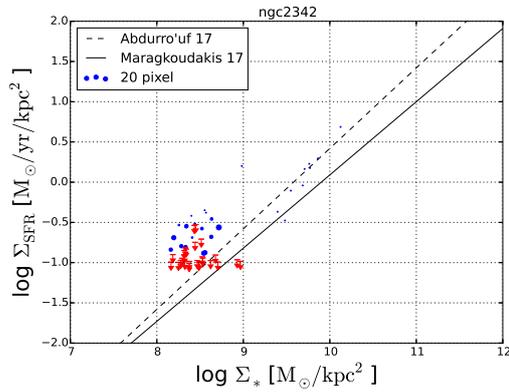


☒ A.15: IRAS F 6592-6313, isolated LIRG

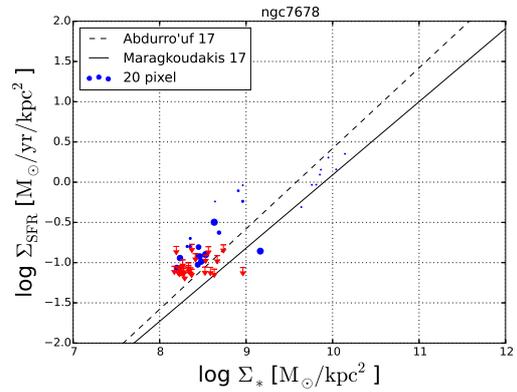
☒ A.16: IRAS F 18293-3413, isolated LIRG



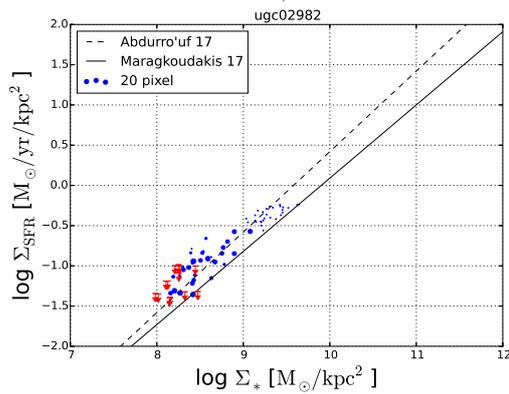
☒ A.17: NGC23, isolated LIRG



☒ A.18: NGC232, isolated LIRG



☒ A.19: NGC2342, isolated LIRG



☒ A.20: NGC7678, isolated LIRG

☒ A.21: UGC2982, isolated LIRG