令和２年度

修士論文

Paα 輝線で探る近傍LIRGの空間分解した星形成活動および銀河相互作用の影響

指導教官　本原顕太郎

東京大学理学系研究科天文学専攻修士課程
学籍番号：35-196124

中村洋貴

2021 年 2 月 19 日

概要

様々な系外銀河研究が行われる中で、特に高光度赤外線銀河 (Luminous Infrared Galaxy: LIRG) は活発な星形成活動を伴うことが分かっている。その要因や LIRG の性質の研究は、銀河進化を理解する上で非常に重要である。

銀河の星質量と星形成率の間には非常に強い相関が存在することが知られており、これを Star Forming Main Sequence (SFMS) と呼ぶ。また近年銀河を分解し、星質量面密度と星形成率面密度の間にも同様の相関があることが分かってきた (resolved SFMS)。LIRG の星形成率や星質量を一般の星形成銀河と比較することは、LIRG の特徴を探る重要な手掛かりとなる。

星形成活動が活発化する主な要因のひとつとして、銀河同士の相互作用が考えられている。実際、相互作用銀河の比星形成率が孤立銀河に比べて高いことを示す観測結果もあり、シミュレーションによっても同様の結果が得られている。これは銀河同士の相互作用によって分子ガスの流入が引き起こされ、それによって星形成活動が活発化される可能性が示唆されている。LIRG の星形成率および銀河同士の相互作用の影響を調べるため、本研究では Paα 輝線を用いて銀河の星形成率を算出し、さらに銀河を形態によって merger 段階に分類し、その傾向を調べた。

Paα 輝線 ($\lambda = 1.875\ \mu$m) は、大質量星の高エネルギー光によって電離された水素ガスの再結合線である。寿命の短い大質量星の影響を観測するため星形成活動の指標として優れている。同様に水素の再結合線である Hα 輝線と比較すると、放射強度は劣るが減光量は小さいため、LIRG のようなダストに埋もれた星形成活動を調べる指標として非常に優れていることが分かる。本研究では Paα 輝線の Subaru/IRCS による狭帯域撮像観測サーベイである、PARADSISES の 26 天体のデータを用いた。

このデータ解析の中で、データセット内で時間変動する電流「パーシステンス」の存在が確認された。これは強い露光や長時間露光など、検出器内に蓄積された電子数に比例して生じるものだと考えられている。形状が必ずしも一定ではないことにより、既存のパーシステンステンプレートのみでは完全な補正を行うことができなかったため、本研究を行うにあたって新規テンプレートを作成し、2 種類のテンプレートを用いた解析手順を確立した。

得られたデータから K' バンド連続光成分、および Paα 輝線成分を抽出し、銀河全体の開口測光から銀河の星質量および星形成率を求めた。他の研究と比較すると、本研究の LIRG サンプルは比星形成率が高い傾向にあり、これは銀河相互作用の影響が原因として第一に考えられる。しかし銀河を形態によって merger 段階に分類してもそれらに傾向は見られなかった。また銀河を分解した星質量面密度と星形成率面密度の関係に関しても銀河相互作用による影響は見られなかったが、特に銀河の中心部で比星形成率が他の研究よりも高い結果となり、LIRG は一般の星形成銀河に比べて銀河中心部における星形成活動の抑制が働きづらいことを示唆する結果となった。

今後の課題としては、銀河内の分子ガス量を調べるため他の波長での追観測や、天体数を増やすこと、より定量的な merger 分類を行うことなどが挙げられる。

目次

1 序論 2
1.1 赤外線で見た系外銀河 2
1.2 星形成活動 2
1.2.1 Star Forming Main Sequence 2
1.2.2 相互作用の影響 3
1.3 Paα 輝線 4

2 データ 6
2.1 PARADISES プロジェクト 6
2.1.1 プロジェクト概要 6
2.1.2 サンプル選択 6
2.1.3 観測 6
2.2 リダクション 8
2.2.1 新規パーシステンステンプレート 8
2.2.2 リダクション方法 8
2.2.3 パーシステンス 9
2.2.4 連続光画像および輝線画像の作成 13
2.2.5 merger 段階の分類 13
2.2.6 全データ 14

3 解析 33
3.1 星形成率 33
3.2 星質量 34

4 結果・議論 37
4.1 Global Main Sequence 37
4.2 相互作用による影響 38
4.3 Resolved Main Sequence 38

5 結論 42

謝辞 43

参考文献 44

1　序論

1.1　赤外線で見た系外銀河

今日まで多くの系外銀河研究がなされてきた。赤外線で大きな光度を持つ ($L_{IR} > 10^{11}\ L_{\odot}$) 銀河を Luminous Infrared Galaxy (LIRG) と呼ぶが、これは非常に活発な星形成活動を行う銀河だと考えられている。星形成活動により超新星爆発などが生じることで、活発な星形成領域では多量のダストが供給される。星間ガス中に多量に存在するこのダストは、大質量星から放射される強い紫外線などを吸収し赤外線で再放射する。このため赤外線で明るい LIRG は星形成が活発であると解釈されている (e.g. Sanders & Mirabel 1996)。活発な星形成活動の主な要因として、銀河同士の相互作用が考えられている。実際、観測的にも LIRG の多くが衝突銀河 (merger) または相互作用銀河 (interacting galaxy) であり (e.g. Howell et al. 2010, Haan et al. 2010)、シミュレーションによっても銀河同士が相互作用を行うことで星形成活動が高まることが確かめられている (e.g. Patton et al. 2020, Moreno et al. 2015)。

1.2　星形成活動

1.2.1　Star Forming Main Sequence

銀河の星質量と星形成率の間には相関があることが知られており、その関係を恒星の主系列と区別をして Star Forming Main Sequence (SFMS) と呼ぶ。両者の対数をとったとき、

$$\log \mathrm{SFR} = \alpha \log M_* + \beta \tag{1}$$

という形で表され、その傾きや形、分散などについて様々な議論がなされてきた (e.g. Daddi et al 2007, Peng et al. 2010)。ただしここでは星形成率を SFR ($\mathrm{M}_{\odot}$/yr)、星質量を M_* ($M_{\odot}$) で表した。α の大きさは ~ 0.4 から ~ 1 まで多岐に渡る (Speagle et al. 2014) が、これらはサンプル選択による影響だと考えられており、質量が大きく星形成率が低いものまで選択すれば傾きは小さく、同じ銀河がサンプルから除かれた場合は傾きが大きくなる。このようなサンプル選択の影響をできる限り取り除き、無バイアスな SFMS を定義したのが Renzini & Peng 2015 である。x 軸に銀河の星質量、y 軸に銀河の星形成率、z 軸にその数をプロットし、三次元プロットの稜線として SFMS を定義した (図 1)。この時の傾きは 0.76 である。

図 1　Renzini & Peng 2015 の figure 4。横軸に星質量、縦軸に星形成率、カラーマップが個数密度を表している。2 つある sequence のうち北側を SFMS と定義してる。

また、銀河を細かく分解した際の、星質量面密度と星形成率面密度の間にも SFMS 同様の相関があることが明らかになってきた (e.g. Magdis et el. 2016, Maragkoudakis et al. 2017)。これは resloved Main Sequence と呼ばれる。

図 2　Maragkoudakis et al. 2017 の空間分解した SFMS。

1.2.2　相互作用の影響

1.1 節で述べたように、銀河の星形成活動には銀河同士の相互作用が大きな影響を及ぼす。シミュレーションによれば、相互作用がガス流入のきっかけとなり、これにより星形成活動が増強されることが示唆されている (Hopkins et al. 2013, Moreno et al. 2019, Patton et al. 2020)。また、観測的にもこのような予測を支持する結果が得られており、伴銀河のある銀河は増強された星形成活動を伴うことが示唆される観測も複数ある (Ellison et al. 2008, Cao et al. 2016, Ohashi, master thesis)。(図 3)

図 3　Ohashi, master thesis の図 4.2。相互作用によって星形成率が高くなる結果が得られている。

1.3　Paα 輝線

星形成活動をトレースする代表的なものに可視光の Hα 輝線や中間・赤外領域におけるダスト放射などがある。前者は大質量星によって電離された水素の再結合線であり、後者は大質量星によって暖められたダストの再放射である。これらは比較的よく星形成領域をトレースするが、可視光での観測はダスト減光の影響を受けやすいという欠点がある。特に星形成活動が活発な銀河では、超新星爆発などに由来するダストが多量に存在すると考えられており、よりダスト減光の影響を受けにくい長波長側での観測が望ましい。一方で中間・遠赤外線を用いた観測では、可視光や近赤外線に比べて分解能が悪く、またダスト放射の他に低温な星からの放射などの影響を受けてしまう。そこで本研究では Paα 輝線 ($\lambda = 1.875$ μm) を用いて星形成率を算出する。Paα 輝線は水素原子の主量子数 $n = 3$ の準位に遷移するときに放射される輝線である。主量子数 $n = 3$ から $n = 2$ の準位へ遷移する前述の Hα 輝線 ($\lambda = 0.653$ μm) に比べて、Paα 輝線の放射強度は約 8 分の 1 程度であるが、放射波長域がダストの影響を受けにくい赤外線波長域であるため、良い星形成領域のトレーサーとなる。特に $A_V > 3.6$ で放射強度は逆転する (Tateuchi PhD thesis) ため、ダストの多い LIRG の観測に有効な輝線である。また、中間・遠赤外線波長よりも分解能が高いため、銀河のより詳細な情報を得ることができる。本研究ではダスト減光の影響が強い LIRG を Paα 輝線で高分解能な観測を行い銀河相互作用の影響を調べることで、LIRG の特徴および銀河進化の理解を目指す。

図 4　Tateuchi PhD thesis の figure 1.2。各輝線のダスト減光に対する強度を示している。

2　データ

2.1　PARADISES プロジェクト

2.1.1　プロジェクト概要

本論文で用いるデータは、PARADISES (Paschen-Alpha Resolved Activity and Dynamics of Infrared Selected Extreme Starbursts with Subaru/SWIMS) プロジェクトによって観測されたデータである。これは、水素の再結合線の中でもダスト減光の影響を受けにくい Paschen-α 輝線を Subaru/IRCS および TAO/SWIMS により狭帯域フィルタ撮像し、ダストに埋もれた銀河内部の星形成活動を解剖することを目的としたプロジェクトである。

2.1.2　サンプル選択

PARADISES プロジェクトのターゲットは、AKARI 90 μm 全天データと SDSS カタログデータを照合し、$L_{8-1000\ \mu\mathrm{m}} = 10^{11-12}\ L_{\odot}$ であるもの、かつ Subaru/IRCS の狭帯域フィルターで Paα 輝線が観測できるよう $z = 0.106 - 0.164$ のものを選び出した。本研究ではこれまでに観測が行われた全 26 天体のデータを用いる。ただしこれは AKARI の分解能で 26 天体であり、実際は 2.2 節のように全 49 個の銀河に分解された。

2.1.3　観測

本研究で用いるデータは以下のような条件で撮像されている。

- 日付：2014 年 5 月 ~2016 年 12 月
- 広帯域フィルター：K' (中心：2.12 μm、幅：0.35 μm)
  狭帯域フィルター：NB2090 (中心：2.091 μm、幅：0.035 μm)、H_2 1-0 (中心：2.122 μm、幅：0.032 μm)、Brγ (中心：2.166 μm、幅：0.032 μm)
- 赤方偏移範囲：0.106~0.164
- ディザリング枚数：5 枚または 9 枚
- 露出時間：広帯域フィルター撮像で 30 秒程度、狭帯域フィルター撮像で 100 秒程度

以下に観測済みの PARASISES ターゲット天体の一覧を示す。

表 1　観測済み PARADISES 候補天体一覧

PARADISES_ID	AKARI_ID	z	Filter	Observed_date(HST)	Dataset
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
PARADISES_NB209_003	AKARI-FIS-0051139+002052	0.11258558	K'+NB209	2014/10/29,30	K'(5), NB209(4)
PARADISES_NB209_005	AKARI-FIS-0119079-082908	0.11810086	K'+NB209	2015/10/1	K'(10), NB209(9)
PARADISES_NB209_007	AKARI-FIS-0140387-091559	0.118926585	K'+NB209	2015/10/1	K'(9), NB209(8)
PARADISES_NB209_008	AKARI-FIS-0240186-072047	0.11759604	K'+NB209	2014/10/29	K'(5), NB209(5)
PARADISES_NB209_010	AKARI-FIS-0308404-063731	0.1101176	K'+NB209	2015/10/1	K'(10), NB209(9)
PARADISES_NB209_012	AKARI-FIS-0728151+375631	0.11632163	K'+NB209	2014/10/30	K'(5), NB209(5)
PARADISES_NB209_013	AKARI-FIS-0800310+481539	0.11930026	K'+NB209	2015/10/2	K'(9), NB209(9)
PARADISES_NB209_036	AKARI-FIS-1011283+260705	0.11651826	K'+NB209	2015/12/24	K'(9), NB209(9)
PARADISES_NB209_058	AKARI-FIS-1209390+432635	0.11356688	K'+NB209	2014/5/16	K'(17), NB209(9)
PARADISES_NB209_068	AKARI-FIS-1318102+041922	0.11302254	K'+NB209	2014/5/21	K'(5), NB209(9)
PARADISES_NB209_096	AKARI-FIS-1649140+342510	0.11257313	K'+NB209	2015/10/1	K'(10), NB209(5)
PARADISES_NB209_097	AKARI-FIS-2103012-002031	0.11154468	K'+NB209	2015/10/1	K'(10), NB209(9)
PARADISES_NB209_100	AKARI-FIS-2243238-095051	0.11418711	K'+NB209	2015/10/1	K'(10), NB209(9)
PARADISES_NB209_101	AKARI-FIS-2257443+145345	0.11069387	K'+NB209	2015/10/1	K'(8), NB209(8)
PARADISES_NB209_102	AKARI-FIS-2258543-092016	0.116052024	K'+NB209	2015/10/1	K'(10), NB209(9)
PARADISES_H2_001	AKARI-FIS-0030251-092612	0.12850899	K'+H2(1-0)	2015/10/1	K'(9), H210(8)
PARADISES_H2_002	AKARI-FIS-0111523-094555	0.13145968	K'+H2(1-0)	2015/10/1	K'(9), H210(8)
PARADISES_H2_003	AKARI-FIS-0123537+141308	0.12940912	K'+H2(1-0)	2015/10/1	K'(9), H210(5)
PARADISES_H2_004	AKARI-FIS-0317145+000531	0.12956533	K'+H2(1-0)	2015/10/1	K'(10), H210(9)
PARADISES_H2_012	AKARI-FIS-0907501+010141	0.12801602	K'+H2(1-0)	2015/12/24	K'(9), H210(9)
PARADISES_H2_054	AKARI-FIS-2037245-062159	0.13276494	K'+H2(1-0)	2016/11/3	K'(10), H210(5)
PARADISES_H2_055	AKARI-FIS-2052271+010023	0.131967	K'+H2(1-0)	2016/11/4	K'(5), H210(5)
PARADISES_H2_056	AKARI-FIS-2231503+003353	0.13068207	K'+H2(1-0)	2016/11/4	K'(5), H210(5)
PARADISES_H2_057	AKARI-FIS-2219469+123447	0.12548368	K'+H2(1-0)	2014/10/29	K'(5), H210(5)
PARADISES_H2_058	AKARI-FIS-2242512+005220	0.12789588	K'+H2(1-0)	2015/10/1	K'(10), H210(6)
PARADISES_BrG_001	AKARI-FIS-0312137+010307	0.15049367	K'+BrG	2015/12/23	K'(9), BrG(9)

Notes.-(1)PARADSISES ターゲット候補天体としての ID (2) あかりの ID (3) 赤方偏移 (4) 観測されたフィルターのうち本研究で用いたもの (5) 観測日 (6) 本研究で用いたデータフレーム数

2.2 リダクション

以下データリダクションおよび輝線成分・連続光成分抽出のために画像処理を説明する。特に狭帯域フィルターのデータについてはパーシステンスパターン (後述) が存在したため、それを取り除く工程も含まれている。

2.2.1 新規パーシステンステンプレート

以下に本研究で行ったリダクションの工程を示す。まずはじめに、新規パーシステンステンプレート作成のため、NB2090 天体について以下の手順でパーシステンスを抽出した。

1. 生画像をドームフラットで割る。
2. スカイレベルを補正する。
3. メジアンセルフスカイを作成し差し引く。
4. マスクフレームを作成し、これを適用して改めてスカイ作成およびスカイ引きをする。
5. 再度マスクフレームを作成し、これを適用しデータセット内の前半部と後半部それぞれのスカイフレームを作成し、差分をとることにより、前半と後半の間で変動したパーシステンスのパターンのフレームを作成する。

以上のような形で各天体からパーシステンスフレームを抽出し、それらの平均をとることで新規パーシステンステンプレートとした。

2.2.2 リダクション方法

次に、既存テンプレートおよび新規テンプレートの両方を用いた、リダクション全体の手順を解説する。最終画像作成までの手順を大きく二回踏んでいる。

1-1. 生画像をドームフラットで割る。
1-2. スカイレベルを補正する。
1-3. セルフスカイを作成し差し引く。
1-4. マスクフレームを作成し、これを適用して改めてスカイ作成およびスカイ引きをする。
1-5. 2 種類のテンプレートをスケールしてパーシステンスの補正を行う。
1-6. スカイレベルをもう一度補正する。
1-7. 位置合わせを行い加算平均をとり、最終画像を作成する。(作成した最終画像に対しマスクフレームを作成しておく。※)
2-1. 生画像をドームフラットで割る。
2-2. 2 種類のテンプレートをスケールしてパーシステンスの補正を行う。
2-3. スカイレベルを補正する。
2-4. セルフスカイを作成し差し引く。(ここで 1-7 で作成したマスクフレームを適用する。※)
2-5. スカイレベルをもう一度補正する。
2-6. ベースラインの傾きを補正する。
2-7. 位置合わせを行い加算平均をとり、最終画像を作成する。

図 5　リダクション手順の概要図。図の左側にある橙色の分岐が新規テンプレート作成の分岐。黒の四角の部分がリダクションの主要部。

2.2.3　パーシステンス

観測データを処理する中で、時間変動する暗電流の存在が確認され、通常のリダクション工程にこれを除去する工程を加えた。時間変動する暗電流は検出器由来の電流であり、これは検出器内に存在する不純物準位にトラップされた電子が時間経過とともに染み出すために生じる電流だと考えられる (Smith et al. 2008)。これはパーシステンスと呼ばれ、強い露光や長時間露光といった、検出器内に蓄えられた電子数に比例して染み

出す電流である。本研究では特に、広帯域フィルターから狭帯域フィルターへ変更した直後の数枚のデータに大きくパーシステンスが検出されてしまう特徴がある。図 6 は NB209_097 の狭帯域フィルターのデータセット内における、ある領域でのピクセル値を統計的に算出したものである。特にはじめの数枚に強くパーシステンスが現れ、徐々に減少していくことが分かる。本来であればこの大きなパーシステンスのあるフレームを除き、残りのデータでリダクションを行うことが望ましいが、ほぼ全てのフレームにパーシステンスが現れてしまっていること、および各データセットでフレーム数が 5 枚または 9 枚と少なく質の悪いフレームを捨てることが難しいことから、パーシステンスの除去を行うことで基本的に全てのフレームを使用した。

図 6　パーシステンスの影響が強い領域 (画像中央上部) のピクセル値の統計値推移。狭帯域フィルター画像ではこのように 1 フレーム目から後半のフレームにかけて徐々にパーシステンスが定常的になっていく。

(a) NB209_097 の 1 フレーム目　　(b) NB209_097 の 9 フレーム目

図 7　NB209_097 の NB2090 の画像。どちらもドームフラットで割り、感度補正を行った後の画像で、左が 1 フレーム目、右が 9 フレーム目 (最終フレーム) である。1 フレーム目では背景に大きく現れていたパーシステンスが、9 フレーム目では影響が少なくなっているのが分かる。

パーシステンスの除去に関しては、既存のパーシステンステンプレートに加え、本研究で作成したパーシステンステンプレートの 2 種類を用いて行った。既存のテンプレートはこれまでに IRCS で取得された 1000 フレーム以上の K_S バンドの長時間露光データセットについて、データセット内の 1 フレーム目とそれ以降のフレームの平均の差のフレームを作成し、それらのメジアンをとることで得られたテンプレートである。しかし本研究で用いたデータは既存テンプレートのみでは補正しきることができなかったため、新たなテンプレートの作成を行った。新規テンプレートは、データセット内の前半部と後半部 (9 枚セットであれば前半の 4 枚と後半の 5 枚) に分け、それぞれの平均を取り差分を取ることでパーシステンスの抽出を図った。さらにこれを本研究で用いた狭帯域フィルター NB2090 で撮影された全 15 のデータセットに対して作成しそれらの平均をとることで、新たなテンプレートとした。

(a) 既存テンプレート　　(b) 新規テンプレート

図 8　既存テンプレートと新規テンプレートの比較。現れているパーシステンスの形状が異なることが分かる。

パーシステンスの補正方法は、以下の通りである。PARADISES 観測によって得られたデータの特徴として、前述のようにパーシステンスの影響がデータセット内で減少していくだけでなく、形状の時間変化も見られた。1 フレーム目では幅広く現れていたものが、後半のフレームでは狭い幅で現れていた。したがって図 9 のように 3 つの領域をとり、各領域でのピクセル値の平均が補正後に等しくなるように 2 種類のテンプレートのスケールを行った。a 領域はパーシステンスの影響が常に生じる領域、b 領域は常にパーシステンスの影響が弱い領域、c 領域は前半のフレームで強くパーシステンスの影響が現れる領域である。元画像の領域内の平均値を i、既存テンプレートの領域内の平均値を t_1、新規テンプレートの領域内の平均値を t_2 とし、既存テンプレートを x 倍、新規テンプレートを y 倍するとき、以下の等式が満たす x、y を求めた。

$$i_a + xt_{1,a} + yt_{2,a} = i_b + xt_{1,b} + yt_{2,b} = i_c + xt_{1,c} + yt_{2,c} \tag{2}$$

図 9　画像内の各領域の位置。a 領域はデータセットを通してパーシステンスの影響が強い領域。b 領域はデータセットを通してパーシステンスの影響が少ない領域。c 領域はデータセット内の前半のフレームではパーシステンスが検出されるが、後半のフレームではその影響が弱くなる領域である。

この x と y を適用してパーシステンスの補正を行った。実際に NB209_097 の NB2090 画像の 1 フレーム目に対し、既存テンプレートのみを適用した場合と新規テンプレートも合わせて適用した場合を比較したものが図 10 である。

(a) 生画像　(b) 既存テンプレートのみを使用した場合　(c) 2 種類のテンプレートを使用した場合

図 10　NB209_097 の NB2090 画像の 1 フレーム目に対し、生画像、既存テンプレートのみを用いてリダクションした場合、2 種類のテンプレートを用いてリダクションした場合の比較。既存テンプレートのみではパーシステンスパターンを補正しきれていないことが分かる。

既存テンプレートのみを使用して補正する際は、図 9 の a 領域と b 領域から求めたスケール値を用いているが、円環上にパターンが残ってしまっている。一方で 2 種類のテンプレートを用いた場合は円環状のパターンも消え、補正がうまくできている。したがって全てのデータに対し 2 種類のテンプレートによる補正を行った。

2.2.4　連続光画像および輝線画像の作成

リダクションによって得られた画像のピクセル値をフラックス密度に直すため、標準星データを用いたキャリブレーションを行った。標準星にも上記と同じ 2 種類のテンプレートによるパーシステンス補正を含めたリダクションを行っている。また、PARADISES 観測データは様々な日付にまたがって取得されており、全ての日付で全てのフィルターの標準星データがあるわけではない点に注意したい。このような場合は最も近い日付の標準星データを用いてキャリブレーションを行った。標準星の等級は 2MASS カタログの H と K_S の値から内装することで各フィルターでの等級を求め、これと開口測光の結果が一致するように合わせることで全ての画像をフラックス密度に直した。

さらに以下のようにして連続光成分、Paα 輝線成分を抽出した。$f_{\rm continuum}$ を連続光の輻射流束密度 (W/m^2/μm)、$F_{\rm emission}$ を Paα 輝線の輻射流束 (W/m^2)、$f_{\rm BB}$、$f_{\rm NB}$ を広帯域および狭帯域フィルターで撮影されたデータから得られた輻射流束密度、$\Delta_{\rm BB}$、$\Delta_{\rm NB}$ を広帯域および狭帯域フィルターの観測波長幅として、

$$f_{\rm continuum} = \frac{f_{\rm BB}\Delta_{\rm BB} - f_{\rm NB}\Delta_{\rm NB}}{\Delta_{\rm BB} - \Delta_{\rm NB}} \tag{3}$$

$$F_{\rm emission} = (f_{\rm NB} - f_{\rm continuum})\Delta_{\rm NB} \tag{4}$$

となる。

2.2.5　merger 段階の分類

本研究では、銀河同士の相互作用に着目するため、各銀河を形態に基づいて merger 段階に分類した。具体的には、Hibbard & Van Gorkom 1996 に基づき、

- Early-stage merger: 銀河同士が充分に離れているが、銀河間にテールやブリッジ等の特徴が見られるもの。
- Intermediate-stage merger: 銀河同士の核が分離はしているが、同一の銀河領域内に存在しているもの。
- Late-stage merger: 単一の核を持つ銀河だが、テールなど非対称的な構造を持つもの。

とし、それ以外を”isolate”銀河と分類した。分類する際は本研究の PARADISES データ、SDSS データ、および PanSTARRS データを参照し、いずれかに上記のような相互作用の特徴が見られる場合は merger 段階に分類し、いずれの画像でもそのような特徴が見られない場合は isolate 銀河とした。

図 11　Hibbard & Van Gorkom 1996 の figure 1。merger 段階の分類の例を示している。左列の下ふたつが early-stage、左列の上が intermediate-stage、右列が late-stage を表している。

2.2.6　全データ

以下に本研究で得られた各銀河の画像、および参照した他の観測データを示す。

表 2　リダクションにより得られた天体一覧

PARADISES_ID (1)	Sub_ID (2)	SDSS_ID (3)	Classification (4)	z(SDSS) (5)	SFR_{IR} (6)	$M_{\odot,SDSS}$ (7)	$SFR_{Pa\alpha}$ (8)	$SFR_{Pa\alpha,corr}$ (9)	$M_{\odot,K'cont}$ (10)	Aperture($''$) (11)	r_P($''$) (12)
PARADISES_NB209_003	G1	SDSS J005114.11+002049.4	intermediate	0.113		3.16E+10	23.70	28.41	7.20E+10	3.12	6.46
	G2	SDSS J005113.93+002047.2	intermediate	0.112		5.13E+09	5.77	6.92	2.40E+10	2.34	4.46
	all			0.113	65.06		36.59	43.87		5.2	
PARADISES_NB209_005	G1	SDSS J011907.56-082909.5	early	0.118		2.14E+10	5.40	6.48	3.09E+10	3.38	4.52
	G2	SDSS J011907.85-082912.1	early	0.119 *			1.63	1.96	2.02E+10	2.08	2.87
	all			0.118	129.87		0.46	0.55		6.24	
PARADISES_NB209_007	G1	SDSS J014038.60-091559.3	isolate	0.119		8.71E+09	20.98	25.16	4.91E+10	2.34	2.68
	G2	SDSS J014039.05-091602.9	isolate	0.105 *			1.77	2.12	1.73E+09	1.56	2.19
	all			0.119	87.80		22.75	27.27			
PARADISES_NB209_008	G1	SDSS J024018.57-072040.1	isolate	0.118		1.02E+10	7.36	8.82	5.12E+10	6.24	4.86
	G2	SDSS J024018.22-072057.1	isolate	0.124 *			38.31	45.93	8.93E+10	6.76	6.78
	all			0.118	47.49		45.67	54.75			
PARADISES_NB209_010	G	SDSS J030840.26-063741.3	isolate	0.110		4.57E+10	15.54	18.64	7.69E+10	5.98	6.79
	all			0.110	48.74		15.54	18.64			
PARADISES_NB209_012	G1	SDSS J072815.26+375636.5	early	0.116		7.08E+09	5.89	7.06	1.98E+10	2.6	4.2
	G2	SDSS J072814.87+375630.1	early	0.079 *			15.58	18.68	2.93E+10	6.24	6.43
	all			0.116	54.63		21.46	25.74			
PARADISES_NB209_013	G	SDSS J080031.39+481538.7	late	0.119		8.51E+09	2.34	2.81	4.76E+10	10.4	6.11
	all			0.119	88.94		2.34	2.81			
PARADISES_NB209_036	G1	SDSS J101128.25+260655.4	early	0.117		4.68E+10	94.85	113.72	1.37E+11	3.64	2.54
	G2	SDSS J101128.74+260656.6	early	0.128 *			2.60	3.12	7.94E+09	2.6	10.2
	all			0.117	46.80		8.52	10.21			
PARADISES_NB209_058	G1	SDSS J120938.70+432630.0	early	0.114		1.10E+10	51.63	61.90	7.58E+10	5.2	12.13
	G2	SDSS J120939.72+432634.6	early	0.114			-20.46	-24.53	4.65E+10	10.4	3.68
	all			0.114	128.78		31.17	37.37			
PARADISES_NB209_068	G1	SDSS J131810.21+041929.1	early	0.113		6.92E+10	29.05	34.83	1.36E+11	4.16	5.4
	G2	SDSS J131810.51+041911.8	early	0.117 *			26.69	32.00	8.53E+10	4.42	5.08
	all			0.113	152.39		55.74	66.83			
PARADISES_NB209_096	G1	SDSS J164914.09+342513.1	intermediate	0.113		4.27E+09	11.86	14.22	1.89E+10	1.82	3.2
	G2	SDSS J164914.24+342508.2	intermediate	0.090 *			63.03	75.57	5.48E+10	2.86	4.6
	all			0.113	200.91		119.74	143.56			
PARADISES_NB209_097	G1	SDSS J210300.59-002023.6	isolate	0.111		8.32E+10	33.89	40.64	8.85E+10	4.68	6.5
	G2	SDSS J210301.38-002025.4	isolate	0.112		8.91E+09	5.25	6.30	3.87E+10	3.9	3.51
	all			0.112	84.95		39.15	46.93			
PARADISES_NB209_100	G1	SDSS J224323.56-095030.8	isolate	0.138 *			-0.75	-0.90	2.35E+10	1.82	2.61
	G2	SDSS J224323.31-095037.4	isolate	0.102 *			9.82	11.77	1.67E+10	3.64	4.8
	G3	SDSS J224323.84-095059.9	isolate	0.114		1.35E+10	26.63	31.93	4.66E+10	3.64	3.91
	all			0.114	65.57		35.70	42.80			
PARADISES_NB209_101	G1	SDSS J225744.49+145342.2	late	0.111		5.37E+10	49.92	59.86	1.28E+11	5.98	5.17
	all			0.111	51.43		49.92	59.86			

PARADISES_NB209_102	G1	SDSS J225854.01-092016.9	isolate	0.086 *			28.60	34.28	3.56E+10	4.16	4.19
	G2	SDSS J225854.36-092031.6	early	0.116		2.75E+09	6.95	8.33	1.33E+10	3.38	3.28
	G3	SDSS J225854.12-092036.3	early	0.067 *			2.18	2.61	4.95E+08	2.6	2.89
	G2G3			0.116			7.26	8.70	#DIV/0!	5.98	
	all			0.116			35.85	42.99			
PARADISES_H2_001	G1	SDSS J003025.59-092618.6	early	0.129		8.51E+09	17.42	20.89	5.81E+10	2.08	2.5
	G2	SDSS J003025.65-092615.5	early	0.170 *			24.52	29.39	8.35E+10	2.6	3.16
	all			0.129	104.57		42.36	50.79		4.68	
PARADISES_H2_002	G1	SDSS J011152.64-094559.7	early	0.131		1.26E+10	24.69	29.60	7.30E+10	3.64	2.83
	G2	SDSS J011152.81-094555.5	early	0.091 *			0.63	0.75	1.19E+09	1.56	4.04
	all			0.131	170.09		27.16	32.57		6.5	
PARADISES_H2_003	G	SDSS J012354.65+141308.5	isolate	0.129		1.78E+10	15.10	18.10	5.03E+10	4.68	4.59
	all			0.129	132.42		0.00	0.00			
PARADISES_H2_004	G1	SDSS J031714.69+000531.9	early	0.130		8.71E+09	24.31	29.15	3.66E+10	2.6	3.48
	G2	SDSS J031714.85+000527.7	early	0.130		6.17E+09	3.31	3.97	1.78E+10	2.6	3.35
	all			0.130	68.20		22.17	26.58		5.98	
PARADISES_H2_012	G1	SDSS J090750.07+010141.0	late	0.128		1.62E+10	40.85	48.97	6.57E+10	4.42	3.41
	G2	SDSS J090749.90+010142.6	isolate	0.046 *			0.07	0.09	5.16E+08	1.3	3.6
	all			0.128	102.78		41.48	49.73			
PARADISES_H2_054	G	SDSS J203724.58-062200.3	isolate	0.133		2.75E+10	108.29	129.84	8.10E+10	3.38	2.42
	all			0.133	144.38		0.00	0.00			
PARADISES_H2_055	G1	SDSS J205227.46+010026.3	isolate	0.132		4.17E+10	58.14	69.71	6.70E+10	4.16	3.65
	G2	SDSS J205226.95+010039.8	isolate	0.132		3.47E+09	4.61	5.53	2.28E+10	3.12	2.27
	all			0.132	73.84		0.00	0.00			
PARADISES_H2_056	G1	SDSS J223150.93+003340.9	isolate	0.190 *			4.49	5.38	4.61E+10	1.3	5.73
	G2	SDSS J223150.92+003343.7	isolate	0.131		1.00E+11	15.04	18.03	4.81E+10	1.3	5.6
	all			0.131	83.25		31.53	37.80		6.24	
PARADISES_H2_057	G1	SDSS J221947.20+123436.5	late	0.125		1.29E+11	-19.60	-23.50	2.69E+11	8.32	8.7
	G2	SDSS J221946.99+123440.9	isolate	0.044 *			0.15	0.18	9.45E+08	1.04	15.24
	all			0.125			-18.28	-21.91			
PARADISES_H2_058	G1	SDSS J224251.68+005225.4	early	0.128		5.50E+10	-6.51	-7.80	8.96E+10	4.42	4.77
	G2	SDSS J224251.79+005218.5	early	0.139 *			17.00	20.38	4.21E+10	2.34	2.03
	G3	SDSS J224251.63+005206.7	isolate	0.139 *			18.63	22.34	7.50E+10	2.6	2.78
	all						0.00	0.00			
PARADISES_BrG_001	G1	SDSS J031213.65+010311.1	late	0.150		2.45E+10	20.20	24.22	1.28E+11	4.68	4.05
	all			0.150			0.00	0.00			

Notes.-(1)PARADSISES 候補天体 ID (2) 分解した結果銀河が複数個あった場合の補助 ID (3)SDSS の天体 ID (4)merger stage の分類 (5)SDSS から引用した赤方偏移 (ただし photoZ には「$*$」を付けている) (6) 赤外線光度から求めた星形成率 (7)SDSS から引用した星質量 (8)Paα 輝線から求めた星形成率 (9) ダスト減光補正をした $\mathrm{SFR}_{\mathrm{Pa}\alpha}$ (10)K' 連続光から求めた星質量 (11) 開口測光をする際の半径 (12)SDSS から引用したペトロシアン半径

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 12　PARADISES_NB209_003 の G1 および G2 の画像。緑の円が開口測光時に定めた aperture。赤の円が SDSS から引用した $r_{\rm P}$。以下同様。

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 13　PARADISES_NB209_003 の G3 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 14　PARADISES_NB209_007 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 15　PARADISES_NB209_008 の G1 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 16　PARADISES_NB209_008 の G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 17　PARADISES_NB209_010 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 18　PARADISES_NB209_012 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 19　PARADISES_NB209_013 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 20　PARADISES_NB209_036 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 21　PARADISES_NB209_058 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 22　PARADISES_NB209_068 の G1 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 23　PARADISES_NB209_068 の G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 24　PARADISES_NB209_096 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 25　PARADISES_NB209_097 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 26　PARADISES_NB209_100 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 27　PARADISES_NB209_100 の G3 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 28　PARADISES_NB209_101 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 29　PARADISES_NB209_102 の G1 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 30　PARADISES_NB209_102 の G2 および G3 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 31　PARADISES_H2_001 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 32　PARADISES_H2_002 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 33　PARADISES_H2_003 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 34　PARADISES_H2_004 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 35　PARADISES_H2_012 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 36　PARADISES_H2_054 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 37　PARADISES_H2_055 の G1 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 38　PARADISES_H2_055 の G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 39　PARADISES_H2_056 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 40　PARADISES_H2_057 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 41　PARADISES_H2_058 の G1 および G2 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 42　PARADISES_H2_058 の G3 の画像

(a) K' 連続光画像　　(b) Paα 輝線画像

図 43　PARADISES_BrG_001 の画像

3 解析

3.1 星形成率

本研究では、Tateuchi et al. 2015 を参照し、以下の式を用いて Paα 光度から星形成率を求めた。

$$\mathrm{SFR}_{\mathrm{Pa}\alpha}\ (M_\odot/\mathrm{yr}) = 6.4 \times 10^{-41}\ L_{\mathrm{Pa}\alpha}\ (\mathrm{erg/s}) \tag{5}$$

ただし、$\mathrm{SFR}_{\mathrm{Pa}\alpha}$ は Paα 輝線強度から求めた星形成率、$L_{\mathrm{Pa}\alpha}$ は Paα 光度である。これは星形成率と Hα フラックスの関係、および Kroupa の初期質量関数を仮定し、スターバースト銀河のフラックス比を Hα/Paα = 8.6 (T = 1000K, $n_{\mathrm{e}} = 10^4\mathrm{cm}^{-3}$; Hummer & Storey 1987) とすることで得られた関係式である。

リダクションによって得られた連続光画像および Paα 輝線画像を基に、開口測光によって各銀河の連続光強度および輝線強度を測定した。開口半径は、各銀河の動径方向特性、ガウス関数フィッティングによる FWHM、および目視によって銀河全体が覆われるように設定し、連続光画像と輝線画像で同じ座標、同じ開口半径で測光を行った。中心は K' 画像のピーク座標に設定した。その結果を全赤外線光度から求めた星形成率 $\mathrm{SFR}_{\mathrm{IR}}$ と比較したものが図 44 の青い点である。

ただし、ターゲット天体として 1 つに登録されていても PARADISES 観測で複数の銀河に分解された場合は、それらの星形成率の和、もしくは複数の銀河を覆う大きさの開口測光によって求められた値を用いている。この図から、本研究で求められた星形成率が全赤外線光度から求めた星形成率に比べて小さく見積もられていることが分かる。

$\mathrm{SFR}_{\mathrm{IR}}$ は、赤外線天文衛星あかりの観測によって得られた WIDE-S (90 μm) および WIDE-L (140 μm) の測光データから、Tekeuchi et al. 2010 の換算式を使って全赤外線光度に変換し、それを以下の式で星形成率へと変換している (Koyama et al. 2019)。

$$\mathrm{SFR}_{\mathrm{IR}} = 3.1 \times 10^{-44}(1-\eta)\mathrm{L}_{\mathrm{IR}}\ (\mathrm{erg/s}) \tag{6}$$

ここで η は古い星による赤外線放射の割合を示す指標であり、Buat et al. 2011 における近傍星形成銀河の平均値 $\eta = 0.17$ が使われている。

中間-遠赤外線放射は大質量星により温められた星間ダストからの放射を観測していてダスト減光の影響を受けにくい。一方で Paα 輝線は大質量星からの高エネルギー放射によって電離された水素ガスの再結合線であり、中間-遠赤外線に比べて波長が短いためダスト減光の影響が大きい。そこで本研究で得られた Paα 輝線のダスト減光補正を考える。

Calzetti et. al 2000 によれば、0.63 μm $\leq \lambda \leq$ 2.20 μm での減光曲線は以下の式で表される。

$$A(\lambda) = k(\lambda)E_s(B-V) \tag{7}$$

$$k(\lambda) = 2.659 \times (-1.857 + 1.040/\lambda) + R_V \tag{8}$$

また、Calzetti 1997 より、HII 領域に適用される $E_s(B-V)$ と $E(B-V)$ の関係式は以下で与えられる。

$$E_s(B-V) = (0.44 \pm 0.03)E(B-V) \tag{9}$$

$R_V = 4.05$(Calzetti et al. 2000) を仮定すると、$A_V/A_{\mathrm{Pa}\alpha} = 6.88$ と求まる。ただし、 $\lambda_{\mathrm{Pa}\alpha} = 1.875\mu$m、$\lambda_V = 0.5505\mu$m とした。Alonso-Herrero et al. 2006 によれば、LIRG の V バンドでのダスト減光の典型値

は $A_V \sim 4$ である。これを用いれば、LIRG の Paα 輝線のダスト減光の典型値は $A_{\mathrm{Pa}\alpha} = 0.58$ であるので、この値を用いて一律の減光補正を行った結果が図 44 の赤いプロットである。

図 44　全赤外線光度から求めた星形成率 $\mathrm{SFR_{IR}}$ と Paα 輝線強度から求めた $\mathrm{SFR_{Pa\alpha}}$ の比較。青の丸がダスト減光補正を行わない場合、赤い三角がダスト減光補正を行った場合。灰色の破線は $\mathrm{SFR_{IR}} = \mathrm{SFR_{Pa\alpha}}$ の線を表す。

図 44 から、ダスト減光補正を行うと両者は比較的良く一致するが、全体として Paα 輝線強度から求めた星形成率の方が全赤外線光度から求めた星形成率に比べて少なく見積もられている。これは先行研究の結果 (Tateuchi master's thesis) と一致する。この原因として、同論文ではダスト減光モデルが不十分である可能性が指摘されている。また Piqueras López et al. 2013 では LIRG の中心領域におけるダスト減光は $A_V = 5 \sim 13$ 程度である可能性が言及されており、本研究で仮定したダスト減光が不十分である可能性も考えられる。本研究では一律のダスト減光補正を行ったが、銀河ごとの個別の色超過による減光補正を行うためのデータを取得する必要がある。

3.2　星質量

星形成率と星質量の相関を見るため、各銀河の星質量を算出する。本研究では Bell et al. 2003 の質量光度関係を用いて銀河の星質量を見積もった。星の質量と光度の関係は、以下の式で与えられる。

$$\log M/L = a_\lambda + (b_\lambda \times \mathrm{color}) \tag{10}$$

ただし、M および L は太陽単位であり、式内で用いる定数値は以下の表中の値から内挿することで任意の波長における値を求めた。

STELLAR MASS-TO-LIGHT RATIO AS A FUNCTION OF COLOR

Color	a_g	b_g	a_r	b_r	a_i	b_i	a_z	b_z	a_J	b_J	a_H	b_H	a_K	b_K
$u-g$	−0.221	0.485	−0.099	0.345	−0.053	0.268	−0.105	0.226	−0.128	0.169	−0.209	0.133	−0.260	0.123
$u-r$	−0.390	0.417	−0.223	0.299	−0.151	0.233	−0.178	0.192	−0.172	0.138	−0.237	0.104	−0.273	0.091
$u-i$.....	−0.375	0.359	−0.212	0.257	−0.144	0.201	−0.171	0.165	−0.169	0.119	−0.233	0.090	−0.267	0.077
$u-z$	−0.400	0.332	−0.232	0.239	−0.161	0.187	−0.179	0.151	−0.163	0.105	−0.205	0.071	−0.232	0.056
$g-r$	−0.499	1.519	−0.306	1.097	−0.222	0.864	−0.223	0.689	−0.172	0.444	−0.189	0.266	−0.209	0.197
$g-i$.....	−0.379	0.914	−0.220	0.661	−0.152	0.518	−0.175	0.421	−0.153	0.283	−0.186	0.179	−0.211	0.137
$g-z$	−0.367	0.698	−0.215	0.508	−0.153	0.402	−0.171	0.322	−0.097	0.175	−0.117	0.083	−0.138	0.047
$r-i$	−0.106	1.982	−0.022	1.431	0.006	1.114	−0.052	0.923	−0.079	0.650	−0.148	0.437	−0.186	0.349
$r-z$.....	−0.124	1.067	−0.041	0.780	−0.018	0.623	−0.041	0.463	−0.011	0.224	−0.059	0.076	−0.092	0.019

Color	a_B	b_B	a_V	b_V	a_R	b_R	a_I	b_I	a_J	b_J	a_H	b_H	a_K	b_K
$B-V$.....	−0.942	1.737	−0.628	1.305	−0.520	1.094	−0.399	0.824	−0.261	0.433	−0.209	0.210	−0.206	0.135
$B-R$.....	−0.976	1.111	−0.633	0.816	−0.523	0.683	−0.405	0.518	−0.289	0.297	−0.262	0.180	−0.264	0.138

図 45　Bell et al. 2003 の table 7。質量光度関係の式に用いる定数値が各バンドごとに記されている。

本研究では K' バンドの連続光成分、および SDSS における可視バンドの等級を用いて星質量を見積もる。また、Colina & Bohlin 1996 から太陽の赤外バンドでのフラックスを計算し、連続光成分を太陽光度単位へ換算した。ただし、用いる質量光度関係は静止波長における関係式であることに注意が必要であり、以下の数値は全て赤方偏移 z の関数として静止波長へ直した。

- K' バンドの観測波長。観測波長が K' バンド (2.12μm) であるため、静止波長 $2.12/(1+z)$ μm での連続光とみなす。
- 参照する太陽光度。H バンドと K バンドの光度から、$2.12/(1+z)$ μm における光度を内挿により求める。
- SDSS の各バンド等級。本研究では u 等級と g 等級を用いるため、これらの線形補完によって静止波長における u 等級と g 等級を算出した。
- 質量光度関係の定数 a および b。H バンドと K バンドの表の値 (図 45) から、$2.12/(1+z)$ μm における値を内挿によって求める。

また、この質量光度関係は diet Salpeter IMF を仮定している一方で SDSS では Kroupa IMF が仮定されているため、同論文中に記載の方法で質量光度関係を −0.15 dex することで Kroupa IMF に合わせた。以上のようにして求めた銀河の質量と、SDSS の分光観測により見積もられた質量を比較すると図 46 のようになる。

図 46　SDSS で質量が見積もられていたデータに関して、その質量と本研究で得られた質量との比較。ただし、SDSS で分光観測が実施され星質量が求められていた銀河のみの比較である。

これより、高質量側で比較的よく一致し、低質量側で K' バンド連続光から求めた星質量の方が大きくなっていることが見て取れる。これは低質量側で SDSS の SED フィッティングが質量を小さく見積もってしまっている可能性、または本研究が質量を大きく見積もってしまっている可能性のいずれかが考えられる。前者の原因として、仮定した星形成史が実際の星形成史を反映できていない可能性がある。大質量星の爆発的な星形成を仮定したが実際は定常的な低質量星の形成が長く続いた場合は質量を過小評価してしまうことが予想される。また後者の原因として、連続光成分の過大評価が考えられる。本研究で使用した K' バンド連続光は静止波長でも近赤外領域の波長帯であり、低質量星放射、および高質量星放射のダスト吸収による再放射のほかに、赤外線シラスと呼ばれる低質量星放射のダスト再放射を含むことが指摘されている (Tateuchi master's thesis)。これによって特に低質量銀河で連続光成分が実際の質量よりも大きく見積もられている可能性が考えられる。

4　結果・議論

4.1　Global Main Sequence

個々の銀河に対し、K' バンド画像のピーク座標に中心を設定し、目視や動径方向特性により設定した半径で行った開口測光から求められた星形成率および星質量の分布を図 47 に示す。

図 47　本研究で求めた星質量と星形成率の分布。各点が個々の銀河を表しており、青の実線がフィッティング結果、グレーの破線が Maragkoudakis et al. 2017 の MS、点破線が Renzini & Peng 2015 の MS を表す。

本研究で得られた結果に対しフィッティングを行ったところ、$\alpha = 0.92$、$\beta = -8.60$ と求められた。Maragkoudakis et al. 2017 では $\alpha = 0.98 \pm 0.03$、$\beta = -9.63 \pm 0.27$ と求められており、傾きがよく一致していることが分かる。一方で Renzini & Peng 2015 によれば $\alpha = 0.76 \pm 0.01$、$\beta = -7.64 \pm 0.02$ と求められており、傾きに違いがあることが分かる。これは、同論文では抑制銀河まで含めた幅広い星形成率を持つ銀河をプロットしている一方で、本研究では赤外線光度の高い銀河のみを選択しており、星形成率の高い銀河のみが選択されている可能性が考えられる。したがって本研究では高質量かつ高星形成率の銀河が多く、無バイアスな MS プロットに比べて傾きが大きくなると予想される。全体としては、他の研究から得られた MS プロットより 0.4 dex ほど上側に分布しており、Ohashi master's thesis の結果と一致する。これは LIRG の比星形成率が一般の星形成銀河に比べて高いことを示しており、考えられる要因として相互作用の影響によるものが挙げられる。実際、同論文では相互作用銀河と孤立銀河の 2 種類に分類した際、相互作用銀河の比星形成が僅かに孤立銀河に比べて高くなる傾向が示されている。したがって本研究でも相互作用の影響を調べる。

4.2　相互作用による影響

Merger 段階で分けた場合のプロットを図 48 に示す。これによると、merger 段階による違い、および相互作用銀河か孤立銀河かの違いは有意には見られらなかった。したがって、前節で LIRG の比星形成率が一般の星形成銀河に比べて高くなる要因として相互作用の影響を挙げたが、本研究の結果では相互作用の影響が示唆されるものとはならなかった。これは LIRG では相互作用以外の要因によって比星形成率が増強される可能性を示唆し、すなわち何らかの要因で分子ガス割合が一般の星形成銀河に比べて高くなることや、星形成効率が高まっていることなどが考え得る。これを確かめるために今後分子ガスの観測などが必要である。一方で本研究の LIRG サンプル中に相互作用銀河が多いことも事実であり (49 の銀河のうち 29 が相互作用銀河)、相互作用の影響がないとは言えないことに注意したい。

図 48　MS プロットを merger 段階で色分けした図。白抜きの丸が isolate、青の四角が early-stage、緑の三角が intermediate-stage、赤のひし形が late-stage merger を示す。

4.3　Resolved Main Sequence

前節までは銀河全体に対する星質量および星形成率を見たが、本節では星質量面密度および星形成率面密度の関係を見ていく。銀河を空間分解する際、統一的な半径の基準として SDSS の r バンドでのペトロシアン半径を参照した。ペトロシアン半径とは、ある半径での表面輝度とそれより内部の表面輝度の比 (ペトロシアン比) をとり、その比が設定した値となるときの半径である。具体的には、次式のように求められたペトロシアン比 $R_{\rm P}(r)$ に対し、SDSS では $R_{\rm P}(r) = 0.2$ となる半径をペトロシアン半径 $r_{\rm P}$ と設定している。

$$R_{\rm P}(r) \equiv \frac{\int_{0.8r}^{1.25r} dr' 2\pi r' I(r')/[\pi(1.25^2 - 0.8^2)]}{\int_0^r dr' 2\pi r' I(r')/(\pi r^2)} \tag{11}$$

このペトロシアン半径を 4 つに分け、$r_{\rm P}$、$3/4r_{\rm P}$、$2/4r_{\rm P}$、$1/4r_{\rm P}$、で測光を行った。その結果から、銀河を最中心の円およびその周り同心円状の 3 つの円環に分解し、それぞれで星質量面密度、星形成率面密度を算出した。本節では最中心領域を nuclear 領域、その周りの 3 つの円環を nuclear 領域に近い側から circumnuclear 領域、offnuclear 領域、outer 領域と呼ぶことにする。その結果が図 49 であり、merger 段階で色分けがされている。

図 49　銀河を同心円状の 4 つの領域に空間分解したときの、各領域の星質量面密度と星形成率面密度の関係。merger 段階に応じて色分けされており、白抜きの丸が isolate、青の四角が early-stage、緑の三角が intermediate-stage、赤のひし形が late-stage である。青の実線がフィッティング結果、グレーの破線が Maragkoudakis et al. 2017n の SGMS (sub-galactic MS) の線である。

傾きはともに Maragkoudakis et al. 2017 とよく一致しており、全体として 0.5 dex 程度上に分布している。これは Ohashi master's thesis の結果と一致しており、LIRG は銀河のどの領域でも比星形成率が増強されていることが分かる。一方で merger 段階による差、および相互作用銀河か孤立銀河かの差は有意には見られず、これは同論文の結果とは異なる。同論文のでは S/N の高い領域を選択的に抽出してプロットしており、選択された領域の数が銀河によって異なる。そのためサンプル中で特に星形成率が高い銀河は選択された領域の数が多く、それらにフィッティング結果が依存している可能性が指摘されている。本研究では銀河ごとに領域数は同じであり、先行研究とは領域の取り方が異なることに注意したい。

次に、図 49 に対し、動径方向で色付けを行ったものが図 50 である。

図 50　空間分解した MS を領域ごとに色分けした図。最中心の nuclear 領域が黒、最も外側の outer 領域が白の点である。直線は図 49 と同じである。緑の破線は Maragkoudakis et al. 2017 において全ての sub-region に対し曲線近似を行ったものである。

先行研究では高質量領域で resloved MS の直線から僅かに離れ、星形成率面密度が抑制されるような挙動が見える一方で、本研究の結果はむしろ高質量領域で高い星形成率面密度を持つことが分かる。すなわち本研究の LIRG サンプルは一般の星形成銀河に比べて中心領域で特に高い比星形成率を持つことが分かる。この中心領域に着目して、銀河全体の星形成活動のうちどの程度を中心領域で担っているかを示したものが図 51 である。

図 51　Nuclear 領域における星形成率の全体に占める割合を示した図。横軸に銀河の global mass、縦軸に $SFR_{nuclear}/SFR_{global}$ をプロットしている。グレーの破線は Maragkoudakis et al. 2017 の NMS/MS である。

先行研究では高質量銀河で中心領域が担う星形成活動の割合が落ちる一方で、本研究の LIRG サンプルではむしろ高質量銀河で星形成率の中心割合が高いことが見て取れる。同論文において高質量銀河の星形成中心割合の低下は、銀河の星質量の増加に伴って銀河のバルジが成長し星形成活動を抑制する可能性や、AGN の負のフィードバックの影響が強まる可能性などが指摘されている。本研究における LIRG サンプルでそのような傾向が見られないということは、LIRG では何らかの影響で高質量領域でも星形成活動が抑制されにくいことが考えられる。また merger 段階による色分けに注目すると、これまでと同様 merger による有意な差は見られなかった。しかし本研究全体を通して merger 分類が不完全な可能性があり、すなわち孤立銀河と分類している銀河が過去に merger を経験済みの可能性や、遠距離で相互作用を及ぼしている可能性も考え得る。より定量的な分類による評価が必要である。

5　結論

本研究では星形成活動が活発な LIRG を、ダスト減光に強い Paα 輝線を用いて観測し、解析方法の確立および銀河の空間分解した情報の取得を行った。取得できたデータから銀河の global MS および resolved MS をプロットし、先行研究と比較することで LIRG の特徴の理解を試みた。さらに銀河を merger 段階に分類することで、LIRG における銀河相互作用の影響を調べた。結論を以下に示す。

- Subaru/IRCS データには強い露光などの直後にパーシステンスと呼ばれる時間変動する電流の影響が強く現れてしまう。しかし 2 種類のテンプレートを用いることで時間変動するパターンをうまく除去することが可能となった。
- MS プロットから、LIRG は一般の星形成銀河に比べて高い比星形成率を持つことが分かった。
- Resolved MS から、LIRG は銀河のどの領域でも一般の星形成銀河に比べて高い比星形成率を持つことが分かった。特に中心付近では先行研究で見られた星形成活動の抑制の傾向が見られなかった。
- LIRG では一般の高質量星形成銀河に比べて中心領域で担う星形成活動の割合が高く、銀河の成長に伴って生じる AGN フィードバックなどの星形成活動を抑制する働きが影響しにくい可能性がある。
- Merger 段階に分類しても星形成率への大きな影響は見られなかったが、サンプル中に相互作用銀河が多いことも事実である。

今後は分子ガスの観測によって LIRG 中の分子ガス割合を調べることや、より定量的な merger 分類などが必要である。

謝辞

本研究を進める上で、本原顕太郎教授には解析手法や研究内容など様々な場面で非常に多くの助言をいただきました。深く感謝の意を表します。

また小西真広助教授、高橋英則助教授には解析や学問の習得の際に大変多くのご協力を賜りました。誠にありがとうございました。

国立天文台ハワイ観測所の小山佑世助教授には研究方針や解析手法の改善などに関して熱心なご指導をいただきました。心より感謝いたします。

さらに本原研究室の加藤夏子技術職員には日頃の生活の上で多大なるご協力をいただいたことに感謝いたします。

また同研究室の櫛引洸佑氏、陳諾氏、および OB の寺尾恭範氏には研究活動から論文作成に至るまで大変お世話になり、心より感謝いたします。

本研究に関わった全ての方に深い感謝の意を表します。誠にありがとうございました。

参考文献

[1] Alonso-Herrero, Almudena, Rieke, George H., Rieke, Marcia J., Colina, Luis, Pérez-González, Pablo G. and Ryder, Stuart D., 2006, ApJ, 650, 835

[2] Bell, Eric F., McIntosh, Daniel H., Katz, Neal and Weinberg, Martin D., 2003, ApJS, 149, 289

[3] Buat, V., Giovannoli, E., Takeuchi, T. T., Heinis, S., Yuan, F. -T., Burgarella, D., Noll, S. and Iglesias-Páramo, J., 2011, A&A, 529, 22

[4] Calzetti, Daniela, 1997, AJ, 113, 162

[5] Calzetti, Daniela, Armus, Lee, Bohlin, Ralph C., Kinney, Anne L., Koornneef, Jan and Storchi-Bergmann, Thaisa, 2000, ApJ, 533, 682

[6] Cao, Chen, Xu, Cong Kevin, Domingue, Donovan, Buat, Veronique, Cheng, Yi-Wen, Gao, Yu, Huang, Jiasheng, Jarrett, Thomas H., Lisenfeld, Ute, Lu, Nanyao, Mazzarella, Joe, Sun, Wei-Hsin, Wu, Hong, Yun, Min S., Ronca, Joseph and Jacques, Allison, 2016, ApJS, 222, 16

[7] Colina, Luis, Bohlin, Ralph C. and Castelli, Fiorella, 1996, AJ, 112, 307

[8] 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., Huynh, M., Kurk, J. and Mignoli, M., 2007, ApJ, 670, 156

[9] Ellison, Sara L., Patton, David R., Simard, Luc and McConnachie, Alan W., 2008, AJ, 135, 1877

[10] Hibbard, J. E. and van Gorkom, J. H., 1996, AJ, 111, 655

[11] Hopkins, Philip F., Cox, Thomas J., Hernquist, Lars, Narayanan, Desika, Hayward, Christopher C. and Murray, Norman, 2013, MNRAS, 430, 1901

[12] Howell, Justin H., Armus, Lee, Mazzarella, Joseph M., Evans, Aaron S., Surace, Jason A., Sanders, David B., Petric, Andreea, Appleton, Phil, Bothun, Greg, Bridge, Carrie, Chan, Ben H. P., Charmandaris, Vassilis, Frayer, David T., Haan, Sebastian, Inami, Hanae, Kim, Dong-Chan, Lord, Steven, Madore, Barry F., Melbourne, Jason, Schulz, Bernhard, U, Vivian, Vavilkin, Tatjana, Veilleux, Sylvain and Xu, Kevin, 2010, ApJ, 715, 572

[13] Hummer, D. G. and Storey, P. J., 1987, MNRAS, 224, 801

[14] Koyama, Yusei, Kodama, Tadayuki, Hayashi, Masao, Shimakawa, Rhythm, Yamamura, Issei, Egusa, Fumi, Oi, Nagisa, Tanaka, Ichi, Tadaki, Ken-ichi, Takita, Satoshi and Makiuti, Sin'itirou, 2015, MNRAS, 453, 879

[15] Koyama, Yusei, Shimakawa, Rhythm, Yamamura, Issei, Kodama, Tadayuki and Hayashi, Masao, 2019, PASJ, 71, 8

[16] Magdis, Georgios E., Bureau, Martin, Stott, J. P., Tiley, A., Swinbank, A. M., Bower, R., Bunker, A. J., Jarvis, Matt, Johnson, Helen and Sharples, Ray, 2016, MNRAS, 456, 4533

[17] Maragkoudakis, A., Zezas, A., Ashby, M. L. N. and Willner, S. P., 2017, MNRAS, 466, 1192

[18] Moreno, Jorge, Torrey, Paul, Ellison, Sara L., Patton, David R., Bluck, Asa F. L., Bansal, Gunjan and Hernquist, Lars, 2015, MNRAS, 448, 1107

[19] Moreno, Jorge, Torrey, Paul, Ellison, Sara L., Patton, David R., Hopkins, Philip F., Bueno, Michael, Hayward, Christopher C., Narayanan, Desika, Kereš, Dušan, Bluck, Asa F. L. and Hernquist, Lars,

2019, MNRAS, 485, 1320

[20] Ohashi., 2018, Master's thesis, 東京大学理学系研究科

[21] Patton, David R., Wilson, Kieran D., Metrow, Colin J., Ellison, Sara L., Torrey, Paul, Brown, Westley, Hani, Maan H., McAlpine, Stuart, Moreno, Jorge and Woo, Joanna, 2020, MNRAS, 494, 4969

[22] Peng, Ying-jie, Lilly, Simon J., Kovač, Katarina, Bolzonella, Micol, Pozzetti, Lucia, Renzini, Alvio, Zamorani, Gianni, Ilbert, Olivier, Knobel, Christian, Iovino, Angela, Maier, Christian, Cucciati, Olga, Tasca, Lidia, Carollo, C. Marcella, Silverman, John, Kampczyk, Pawel, de Ravel, Loic, Sanders, David, Scoville, Nicholas, Contini, Thierry, Mainieri, Vincenzo, Scodeggio, Marco, Kneib, Jean-Paul, Le Fèvre, Olivier, Bardelli, Sandro, Bongiorno, Angela, Caputi, Karina, Coppa, Graziano, de la Torre, Sylvain, Franzetti, Paolo, Garilli, Bianca, Lamareille, Fabrice, Le Borgne, Jean-Francois, Le Brun, Vincent, Mignoli, Marco, Perez Montero, Enrique, Pello, Roser, Ricciardelli, Elena, Tanaka, Masayuki, Tresse, Laurence, Vergani, Daniela, Welikala, Niraj, Zucca, Elena, Oesch, Pascal, Abbas, Ummi, Barnes, Luke, Bordoloi, Rongmon, Bottini, Dario, Cappi, Alberto, Cassata, Paolo, Cimatti, Andrea, Fumana, Marco, Hasinger, Gunther, Koekemoer, Anton, Leauthaud, Alexei, Maccagni, Dario, Marinoni, Christian, McCracken, Henry, Memeo, Pierdomenico, Meneux, Baptiste, Nair, Preethi, Porciani, Cristiano, Presotto, Valentina and Scaramella, Roberto, 2010, ApJ, 721, 193

[23] Piqueras López, J., Colina, L., Arribas, S. and Alonso-Herrero, A., 2013, A&A, 553, 85

[24] Renzini, Alvio and Peng, Ying-jie, 2015, ApJ, 801, 29

[25] Sanders, D. B. and Mirabel, I. F., 1996, ARA&A, 34, 749

[26] Smith, Roger M., Zavodny, Maximilian, Rahmer, Gustavo and Bonati, Marco, 2008, SPIE, 7021, 0

[27] Speagle, J. S., Steinhardt, C. L., Capak, P. L. and Silverman, J. D., 2014, ApJS, 214, 15

[28] Takeuchi, T. T., Buat, V., Heinis, S., Giovannoli, E., Yuan, F. -T., Iglesias-Páramo, J., Murata, K. L. and Burgarella, D., 2010, A&A, 514, 4

[29] Tateuchi. 2012, Master's thesis, 東京大学理学系研究科

[30] Tateuchi., 2014, PhD thesis, 東京大学理学系研究科

[31] Tateuchi, Ken, Konishi, Masahiro, Motohara, Kentaro, Takahashi, Hidenori, Mitani Kato, Natsuko, Kitagawa, Yutaro, Todo, Soya, Toshikawa, Koji, Sako, Shigeyuki, Uchimoto, Yuka K., Ohsawa, Ryou, Asano, Kentaro, Ita, Yoshifusa, Kamizuka, Takafumi, Komugi, Shinya, Koshida, Shintaro, Manabe, Sho, Nakamura, Tomohiko, Nakashima, Asami, Okada, Kazushi, Takagi, Toshinobu, Tanabé, Toshihiko, Uchiyama, Mizuho, Aoki, Tsutomu, Doi, Mamoru, Handa, Toshihiro, Kawara, Kimiaki, Kohno, Kotaro, Minezaki, Takeo, Miyata, Takashi, Morokuma, Tomoki, Soyano, Takeo, Tamura, Yoichi, Tanaka, Masuo, Tarusawa, Ken'ichi and Yoshii, Yuzuru, 2015, ApJS, 217, 1

[32] Toba, Yoshiki, Nagao, Tohru, Wang, Wei-Hao, Matsuhara, Hideo, Akiyama, Masayuki, Goto, Tomotsugu, Koyama, Yusei, Ohyama, Youich and Yamamura, Issei, 2017, ApJ, 840, 21

[33] York, Donald G., Adelman, J., Anderson, John E., Jr., Anderson, Scott F., Annis, James, Bahcall, Neta A., Bakken, J. A., Barkhouser, Robert, Bastian, Steven, Berman, Eileen, Boroski, William N., Bracker, Steve, Briegel, Charlie, Briggs, John W., Brinkmann, J., Brunner, Robert, Burles, Scott, Carey, Larry, Carr, Michael A., Castander, Francisco J., Chen, Bing, Colestock, Patrick L., Connolly, A. J., Crocker, J. H., Csabai, István, Czarapata, Paul C., Davis, John Eric, Doi, Mamoru, Dombeck,

Tom, Eisenstein, Daniel, Ellman, Nancy, Elms, Brian R., Evans, Michael L., Fan, Xiaohui, Federwitz, Glenn R., Fiscelli, Larry, Friedman, Scott, Frieman, Joshua A., Fukugita, Masataka, Gillespie, Bruce, Gunn, James E., Gurbani, Vijay K., de Haas, Ernst, Haldeman, Merle, Harris, Frederick H., Hayes, J., Heckman, Timothy M., Hennessy, G. S., Hindsley, Robert B., Holm, Scott, Holmgren, Donald J., Huang, Chi-hao, Hull, Charles, Husby, Don, Ichikawa, Shin-Ichi, Ichikawa, Takashi, Ivezić, Željko, Kent, Stephen, Kim, Rita S. J., Kinney, E., Klaene, Mark, Kleinman, A. N., Kleinman, S., Knapp, G. R., Korienek, John, Kron, Richard G., Kunszt, Peter Z., Lamb, D. Q., Lee, B., Leger, R. French, Limmongkol, Siriluk, Lindenmeyer, Carl, Long, Daniel C., Loomis, Craig, Loveday, Jon, Lucinio, Rich, Lupton, Robert H., MacKinnon, Bryan, Mannery, Edward J., Mantsch, P. M., Margon, Bruce, McGehee, Peregrine, McKay, Timothy A., Meiksin, Avery, Merelli, Aronne, Monet, David G., Munn, Jeffrey A., Narayanan, Vijay K., Nash, Thomas, Neilsen, Eric, Neswold, Rich, Newberg, Heidi Jo, Nichol, R. C., Nicinski, Tom, Nonino, Mario, Okada, Norio, Okamura, Sadanori, Ostriker, Jeremiah P., Owen, Russell, Pauls, A. George, Peoples, John, Peterson, R. L., Petravick, Donald, Pier, Jeffrey R., Pope, Adrian, Pordes, Ruth, Prosapio, Angela, Rechenmacher, Ron, Quinn, Thomas R., Richards, Gordon T., Richmond, Michael W., Rivetta, Claudio H., Rockosi, Constance M., Ruthmansdorfer, Kurt, Sandford, Dale, Schlegel, David J., Schneider, Donald P., Sekiguchi, Maki, Sergey, Gary, Shimasaku, Kazuhiro, Siegmund, Walter A., Smee, Stephen, Smith, J. Allyn, Snedden, S., Stone, R., Stoughton, Chris, Strauss, Michael A., Stubbs, Christopher, SubbaRao, Mark, Szalay, Alexander S., Szapudi, Istvan, Szokoly, Gyula P., Thakar, Anirudda R., Tremonti, Christy, Tucker, Douglas L., Uomoto, Alan, Vanden Berk, Dan, Vogeley, Michael S., Waddell, Patrick, Wang, Shu-i., Watanabe, Masaru, Weinberg, David H., Yanny, Brian, Yasuda, Naoki and SDSS Collaboration, 2000, AJ, 120, 1579