

氏名・(本籍)	よし かわ とも ひろ 吉 川 智 裕
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理博第 2 4 6 4 号
学位授与年月日	平成 21 年 3 月 4 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程後期 3 年の課程) 天文学専攻
学位論文題目	A Study of Luminous Infrared Galaxies at Redshift $z \sim 2$ in the GOODS-N Region Based on Multi-Wavelength Photometry and Near-Infrared Spectroscopy with MOIRCS (MOIRCS による近赤外線分光と多波長測光に基づく GOODS-N 領域における赤方偏移 $z \sim 2$ の高光度赤外線銀河の研究)
論文審査委員	(主査) 教授 市 川 隆 教授 山 田 亨 准教授 秋 山 正 幸

論 文 目 次

1 INTRODUCTION	1 4 AGN Contamination	67
1.1 Multi-Object near-InfraRed Camera and Spectrograph	1 4.1 Introduction	67
1.2 Luminous Infrared Galaxies	4 4.2 Data	68
1.3 Roles of ULIRGs in Distant Universe	5 4.3 Results and Discussion	68
1.4 MODS - MOIRCS Deep Survey	6 4.3.1 Line Diagnostics	68
2 DATA	11 4.3.2 Rest-NIR SEDs	69
2.1 Sample Selection	11 4.3.3 X-ray Properties and Multi-Wavelength Diagnostics	77
2.2 Observations	19 4.3.4 MIPS (24 μ m) Excess	79
2.3 Data Reduction	20 5 Conclusion	83
2.3.1 Pre-Reduction	20 A Spectra and Best Fit SEDs of Individual Galaxies	93
2.3.2 Two-Dimensional Spectrum	20 B Ks-band images of the emission line galaxies	133
2.3.3 Flux Calibration	22 C The Control System of MOIRCS	137
2.3.4 Rotation Correction	23 C.1 Introduction	138
2.3.5 Comments on the Individual Masks	25 C.1.1 Requirements to control MOIRCS	138
2.4 Emission Lines	25 C.1.2 MySQL database system and computer technologies	138
2.4.1 Measurement of Emission Lines	25 C.2 T-LECS:	
2.4.2 Background Noise	26 Tohoku University - Layered Electronic Control System	140
2.4.3 Flux Loss at the Slit Edge	27 C.2.1 Layered Structure	140
2.4.4 Flexure of the Instrument	29 C.2.2 Network Distributed System	141
2.4.5 Detection Rate and Feasibility	30 C.2.3 Object Oriented Design	142
2.5 Stacking Analysis	34 C.3 Database Schema	143
2.6 Properties of Stellar Population	35 C.3.1 Status	144
3 Starburst Galaxies	43 C.3.2 Configuration	144
3.1 Introduction	43 C.3.3 FITS	145
3.2 Data	44 C.4 Discussion	147
3.3 Results	44 C.4.1 Advantage	147
3.3.1 H α Emission Lines	44 C.4.2 Problems	150
3.3.2 Energy Sources of Ionization	45 C.5 Conclusion	151
3.3.3 Extinction	46	
3.3.4 Star Formation Rate and Stellar Mass	49	
3.3.5 SFR and Mass-Weighted Age	51	
3.4 Star Formation Rate	52	
3.4.1 SFR indicators	52	
3.4.2 Comparison among SFR Indicators	54	
3.5 Discussion	59	
3.5.1 Sample Selection and Specific Star Formation Rate	59	
3.5.2 Metallicity	62	

論文内容要旨

Abstract

We present the results of near-infrared multi-object spectroscopic (MOS) observations of sBzK-color and *Spitzer*/MIPS 24 μm selected galaxies to examine the properties of infrared luminous galaxies at $z\sim 2$.

First, we examine the star-forming and stellar population properties of 23 non-X-ray galaxies, of which 15 are detected by *Spitzer* MIPS (24 μm) with $S_{24} > 80 \mu\text{Jy}$ and the rest have 24 μm fluxes with $80 \mu\text{Jy} > S_{24} > 15 \mu\text{Jy}$. We investigated the properties of both ionized gas and stellar population from observed emission lines and multi-band photometry at UV to near-infrared wavelengths. From the line ratios ($[\text{O}_{\text{II}}]/\text{H}\beta$ and $[\text{N}_{\text{II}}]/\text{H}\alpha$) of the stacked emission line, we found that the emission lines of non-X-ray galaxies are not affected by the emission from active galactic nuclei (AGN). In order to measure the star formation rate (SFR) of galaxies, dust extinctions of $\text{H}\alpha$ emission lines are estimated from the extinction derived from a SED fit. Using the Balmer decrement of the stacked emission line, we confirmed that the relation between $E(B - V)_{\text{stellar}}$ and $E(B - V)_{\text{gas}}$ for the distant starburst galaxies is in good agreement with that known for local starburst galaxies. A comparison among SFRs derived from $\text{H}\alpha$, UV, and 24 μm fluxes shows nearly consistent results, although small excess of $\text{SFR}_{\text{H}\alpha}$ against SFR_{UV} and large uncertainty in SFR_{IR} are found. We found for the first time that less massive young dusty galaxies have large specific SFR. The SFR of large specific SFR galaxies at a given mass is much larger than both that expected from the correlation known for K-selected galaxies at $z\sim 2$ and that predicted from the correlation at $z < 1$ in downsizing scenario. We also found that galaxies with the small specific SFR have a correlation between stellar mass and gas-phase oxygen metallicity. The metallicity for a given stellar mass is almost consistent with UV-selected galaxies, but the slope of the stellar mass-metallicity relation is slightly flat. On the other hand, galaxies with large specific SFR have on average slightly larger metallicity. The least massive galaxy group has large gas-phase metallicity consistent to that of local galaxies.

Second, we investigate the multi-wavelength properties of the X-ray detected galaxies in comparison with those of the non-X-ray galaxies. The non-X-ray galaxies do not have any hints of AGN in both optical emission and rest-NIR SED, which suggests that AGN extremely obscured in X-ray such as Compton-thick AGN does not pollute the emission in both the stellar continuum and the emission lines in star-forming region. On the other hand, some of the X-ray galaxies have signs of AGN. At rest-NIR wavelengths, three galaxies have power-law emission, which is expected to be the emission from AGN. Power-law emission mainly depends on the luminosity of the hard-X-ray band rather than AGN type, suggesting that it depends on activity of the nuclei. Both ratios of optical emission lines and X-ray emissions depend on AGN type as the relation known for local AGNs.

要旨

本研究では、赤方偏移 $z\sim 2$ の高光度赤外線銀河の性質を調べることを目的とし、sBzK カラー及び *Spitzer*/MIPS 24 μm で選ばれたサンプルを近赤外線多天体分光観測に基づく結果を報告する。

まず、23 個の X 線と同定されていない銀河について星形成領域と星種族の性質を調べた。23 個のうち 15 個は *Spitzer* MIPS (24 μm) によって $S_{24} > 80 \mu\text{Jy}$ で検出されており、残りの銀河も $80 \mu\text{Jy} > S_{24} > 15 \mu\text{Jy}$ の 24 μm フラックスを持っている。電離ガスと星種族の性質を調べるために、今回観測した輝線と UV から近

赤外線までの多波長の測光データを利用した。スタックした輝線から $[O_{III}]/H\beta$ と $[NII]/H\alpha$ 輝線比の解析を行い、今回の非 X 線銀河の輝線は活動銀河核 (AGN) の影響を受けていないことを確認した。銀河の星形成率を求めるために、 $H\alpha$ 輝線に対するダスト吸収量補正は SED フィットから見積もられたものから求めた。そのため、スタックした輝線の Balmer 透減を利用して、星に対する吸収量とガスに対する吸収量の間関係は近傍の銀河で知られているものとよく合うことを確認している。このようにして吸収補正を行った $H\alpha$ 、UV、および $24\mu\text{m}$ フラックスから見積もられる星形成率は、ほぼ無矛盾な一致が見られた。ただし、UV 星形成率に対する $H\alpha$ 星形成率の系統的な超過、赤外星形成率の大きな不定性が見られる。星質量が小さく若くて吸収量が大きな銀河が、大きな単位質量あたりの星形成率を持つことが、今回の研究で初めて見つかった。これらの銀河の星形成率は、知られている赤方偏移 $z\sim 2$ の K バンドサンプルの星質量-星形成率相関や、 $z < 1$ の銀河についての同様の相関に対してダウンサイジングシナリオを適用して予測されるものの両方と比べても大きい。また、単位質量あたりの星形成率が小さな銀河では、星質量とガス中の重元素量 (酸素) の間に相関があることがわかった。ある星質量に対する重元素量は UV で選ばれたサンプルで知られているものとほぼ同程度であるが、星質量-重元素量関係の傾きはやや浅い。一方、単位質量あたりの星形成率が大きな銀河では平均して大きな重元素量を持っている。特に、星質量が最も小さな銀河のグループでは、近傍の銀河に匹敵するくらいのガス重元素量を持つ。

次に、X 線銀河についての多波長の性質を非 X 線銀河との比較とともに調べた。非 X 線銀河には、可視輝線、近赤外線 SED とも AGN の兆候は見られなかった。このことから、Compton-thick AGN のように X 線が検出されない極めて吸収の強い AGN がいたとしても星の連続光や星形成領域からの輝線に影響していることは無いと考えられる。一方、X 線銀河のいくつかからは AGN の兆候が見られた。近赤外線の波長において、3 つの銀河がべき乗則に従う連続光が見られた。これは、AGN に起因する放射であると考えられる。べき乗則の連続光は AGN の型には依らず、X 線の明るさ、即ち、銀河核の活動性に依存することを確認した。また、近傍で知られているものと同様に、可視の輝線比と X 線のスペクトルは AGN の型に依存していることがわかった。

論文審査の結果の要旨

本論文は赤方偏移 $z \sim 2$ の高光度赤外線銀河の性質を調べることを目的とし、sBzK カラー及び *Spitzer* /MIPS $24\mu\text{m}$ で選ばれたサンプルを近赤外線多天体分光観測に基づく研究成果について論述している。電離ガスと星種族の性質を調べるために、今回観測した輝線と UV から近赤外線までの多波長の測光データを利用した。スタックした輝線から [OIII]/ $H\beta$ と [NII]/ $H\alpha$ 輝線比の解析を行い、今回の非 X 線銀河の輝線は活動銀河核 (AGN) の影響を受けていないことを確認した。銀河の星形成率を求めるために、 $H\alpha$ 輝線に対するダスト吸収量補正は SED フィットから見積もられたものから求めた。スタックした輝線の Balmer 逓減を利用して、星に対する吸収量とガスに対する吸収量の間関係は近傍の銀河で知られているものとよく合うことを確認している。このようにして吸収補正を行った $H\alpha$ 、UV、および $24\mu\text{m}$ フラックスから見積もられる星形成率は、ほぼ無矛盾な一致が見られた。星質量が小さく若くて吸収量が大きな銀河が、大きな単位質量あたりの星形成率を持つことを今回の研究で初めて発見した。これらの銀河の星形成率は、知られている赤方偏移 $z \sim 2$ の K バンドサンプルの星質量-星形成率相関や、 $z < 1$ の銀河についての同様の相関に対してダウンサイジングシナリオを適用して予測されるものの両方と比べても大きい。また、単位質量あたりの星形成率が小さな銀河では、星質量とガス中の重元素量 (酸素) の間に相関があることがわかった。ある星質量に対する重元素量は UV で選ばれたサンプルで知られているものとほぼ同程度であるが、星質量-重元素量関係の傾きはやや浅い。一方、単位質量あたりの星形成率が大きな銀河では平均して大きな重元素量を持っている。特に、星質量が最も小さな銀河のグループでは、近傍の銀河に匹敵するくらいのガス重元素量を持つことを解明した。以上の論文の内容は、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、吉川智裕提出の博士論文は、博士 (理学) の学位論文として合格と認める。