

氏 名 稲見 華恵

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1487 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 The Properties of Starbursts in Local Infrared Luminous
Galaxies: Based on Infrared Spectra from Spitzer and
AKARI

論文審査委員 主 査 教授 有本 信雄
教授 松原 英雄
教授 堂谷 忠靖
准教授 村田 泰宏
教授 河野 孝太郎 東京大学

In this dissertation, detailed studies of the starburst properties of infrared luminous galaxies in the local Universe, based on a large and unbiased sample, are presented. The investigation has been done using the most advanced multi-wavelength observations available in the Great Observatories All-sky LIRG Survey (GOALS) project. In particular, the Spitzer 5.5 – 37 μm and the AKARI 2.5 – 5 μm spectra are employed to illustrate ionized gas and dust properties of the interstellar medium (ISM) in the nuclei of the galaxies. Then a comprehensive study of merger-induced activity in II Zw 096 using X-ray to radio observations is described.

Luminous infrared galaxies (LIRGs; $\log(L_{8-1000\mu\text{m}}/L_{\odot}) \geq 11$) and ultra luminous infrared galaxies (ULIRGs; $\log(L_{8-1000\mu\text{m}}/L_{\odot}) \geq 12$) are recognized as crucial objects for revealing buried starburst phenomena and the evolution of black holes in the Universe. Their dusty environment, illuminated by powerful energy sources such as starbursts and active galactic nuclei (AGN), causes the re-emission of infrared light by heating dust grains. As much as 85% of (U)LIRG luminosity may be generated by star formation (Bell et al., 2005; Brand et al., 2006). Both LIRGs and ULIRGs appear to dominate the star formation rate density between redshifts of $0 \leq z \leq 3$ (e.g. Chary & Elbaz 2001; Caputi et al. 2007) with a rapid increase of the number density from $z \sim 0$ to 1 (e.g. Le Floch et al. 2005; Goto et al. 2010; Magnelli et al. 2009). Therefore, they play an important role in the understanding of star formation history and galaxy evolution. While there are extensive studies of local ULIRGs, local LIRGs have suffered from a lack of attention, despite the fact that they are also essential evolutionary counterparts to high redshift systems. The complete sample of nearby LIRGs is an ideal sample for identifying interesting and rare sources, and for creating an accurate picture of the relationship between spectral lines, dust emission, and the generation of intense starbursts.

The GOALS project is a comprehensive multi-wavelength imaging and spectroscopic survey of (U)LIRGs in the local Universe. The targets are comprised of 179 LIRGs and 23 ULIRGs, drawn from all of the LIRGs in the IRAS Revised Bright Galaxy Sample (RBGS; Sanders et al. 2003). A large and unbiased sample of LIRGs will enable us to answer some fundamental questions about star formation activity, providing a valuable set of local benchmarks for comparison with infrared luminous galaxies at high redshift.

Starting with the fine-structure atomic lines detected with the Spitzer Infrared Spectrograph (IRS), these spectral lines allow the determination of the physical and chemical parameters of the gas in the galaxies. This unprecedented spectroscopic database of a complete LIRG sample is not only unique, but its wealth of available gas diagnostic features, its sensitivity, and its large spectral coverage, also affords a

unique opportunity to study the ISM properties in LIRGs in a way not possible until now. Here we characterize the state of the ionized gas and search for evidence of shocks associated with the mergers as gas is driven into the nuclei. The photo-ionization and shock-ionization models based on the Starburst99 and the Mappings III code are compared with the emission line ratios – such as [Ne III]/[Ne II], [S IV]/[Ne II], and [S III]_{33.5 μ m}/[S III]_{18.7 μ m} – to constrain the electron density, metallicity, ionization parameter, starburst age, and shock velocity of the GOALS sources. The median density of the local starburst LIRGs is 120 cm⁻³, the range of ages is $1 \leq \text{Age}[\text{Myr}] \leq 4.5$, the metallicity covers $1 \leq Z[Z_{\odot}] \leq 2$, and the ionization parameters are $2 \times 10^7 \leq q[\text{cm s}^{-1}] \leq 8 \times 10^7$. The characteristics of four of the GOALS starburst sources with resolved line emission in the [Ne III] and [Ne V] emission, which indicates the presence of shocks, can also be reproduced by the shock model. One out of five starburst sources that have intense [Fe II]/[Si II] or [Fe II]/[S III] emission, which also indicates the presence of shocks, overlay on the shock models with a shock speed of $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$, whereas the rest all lie off the shock models. In addition, the two sets of the most intense emission lines in the mid-infrared range, [Ne III] + [Ne II] and [S III]_{33.5 μ m} + [Si II], are applied for estimating star formation rates of the GOALS LIRGs.

Next, dust properties are revealed using the AKARI observations of the local (U)LIRGs. The spectral slopes are seen to vary dramatically among the sources, because of a direct detection of hot dust emission at the AKARI spectral wavelength covering the gap between stellar and warm dust emission. This is a critical wavelength regime which facilitates not only a measure of the hot dust, but also the polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) feature at 3.3 μ m, the hydrogen recombination line Br α at 4.05 μ m, and the 3.1 μ m H₂O ice absorption feature of the GOALS targets. The AKARI spectra alongside of the Spitzer photometric spectral energy distributions and the low-resolution spectra are employed to establish new diagnostic diagrams of starbursts and AGN. The first new diagnostic is based on the 3.3 μ m PAH equivalent width and the F(4.3 μ m)/F(2.8 μ m) color from the AKARI spectra alone. The second diagnostic is based on mid- and near-infrared colors: F(30 μ m)/F(15 μ m) versus F(4.3 μ m)/F(2.8 μ m) in conjunction with Spitzer spectra. The starburst ages, the contribution of the 3.3 μ m PAH emission and Br α emission to LIR, and the properties of the ice mantle on dust grains are also provided as a baseline for high redshift surveys in the near future.

At the end, the results of a detailed study of a merging galaxy II Zw 096 with an infrared luminosity of $\log(L_{\text{IR}}/L_{\odot}) = 11.94$ are presented. Imaging from Spitzer has resolved that at least 80% of the total infrared luminosity comes from a hidden source which is not seen at ultraviolet and visible wavelengths. Spitzer mid-infrared spectra indicate no obvious high-ionization lines from a buried AGN in this source, although the 6.2 μ m PAH equivalent width is about half of a pure starburst. The star

formation rate of this extra-nuclear source is estimated to be $120 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ based on the infrared bolometric luminosity and $> 45 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ based on the direct measure of the hydrogen recombination line. This extreme off-nuclear starburst source, which dominates the infrared emission from the entire system, is evocative of NGC 4038/9 (the Antennae Galaxies) whose infrared emission is also predominant in the overlap region between the merging galactic nuclei.

All of these investigations provide an excellent foundation for the local LIRGs in terms of understanding gas and dust properties. In particular, in the era of the James Webb Space Telescope (JWST) and the Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA), observations with their higher spatial and spectral resolutions will facilitate greatly detailed studies of the ISM. In addition, for high- z LIRG cosmological surveys, the $3.3 \mu\text{m}$ PAH emission is the only strong PAH feature accessible with JWST at $z > 3$ for revealing dust properties in the early Universe.

高光度赤外線銀河 (Luminous InfraRed Galaxies, LIRG) と超高光度赤外線銀河 (Ultra Luminous InfraRed Galaxies, ULIRG) は、ダストで覆われた爆発的な星形成 (スターバースト) とブラックホールの進化を調べるのに最適の銀河である。LIRG と ULIRG の中心領域にある多量のダストは、若い星と活動中心核 (ブラックホール) からの膨大なエネルギーによって暖められており、紫外・可視域の光子を吸収し、中間・遠赤外域で再放射している。これらの銀河の光度の85%はスターバーストに起因する。LIRG と ULIRG の個数密度は赤方偏移が $z=0$ から $z\sim 1$ にかけて急激に増加し、 $0 < z < 3$ の宇宙における星形成密度の大部分を担っている。それゆえ LIRG と ULIRG は銀河における星形成を理解するのに非常に重要な天体である。ULIRG に比べて LIRG の系統的な研究はまだあまり進んでいない。本研究はこの点に着目し、赤外線宇宙望遠鏡 (スピッツァーと「あかり」) による観測を用いて、近傍の LIRG のスターバーストの特性を明らかにしたものである。

Great Observatories All-sky LIRG Survey (GOALS) は近傍にある 179 個の LIRG と 23 個の ULIRG の多波長の包括的な分光サーベイである。本研究ではまず星の種族合成モデル (Starburst99) と輝線スペクトル合成コード (Mapping III) を組み合わせて、ガスの輝線が①光電離と②衝撃波による電離で発生する場合について、 $[\text{Ne III}]/[\text{Ne II}]$, $[\text{S IV}]/[\text{Ne II}]$, $[\text{S III}]_{33.5\mu\text{m}}/[\text{S III}]_{18.7\mu\text{m}}$ といった輝線の強度比の理論値を求め、それらをスピッツァーの測定値と比較して、GOALS サンプル中の LIRG の星形成領域の電子密度・スターバースト年齢・金属量・イオン化パラメータ・衝撃波速度を導出した。近傍 LIRG の電子密度の平均値は $\sim 100\text{cm}^{-3}$ 、この値は水素電離領域 ($< 100\text{cm}^{-3}$) よりも高く、スターバースト銀河 ($\sim 350\text{cm}^{-3}$) よりも低い。スターバースト年齢は $10^6 \sim 4.5 \times 10^6$ 年と非常に若い、これはもっとも新しいバーストで生成された星の年齢を表していると考えられる。金属量は太陽のその 1~2 倍が得られ、従来の可視光観測で報告されていた値よりも高めの傾向を示唆した。本研究は、可視光観測では解らない塵に覆われた星形成領域の金属量について新たな知見をもたらした。イオン化パラメータは $q = 2 \times 10^7 \sim 8 \times 10^7 \text{ cm}^{-1}$ であった。イオン化パラメータが大きい LIRG は金属量が低いという傾向が見られ、これは星間ガスの冷却の効率が悪いことを示唆する。また、イオン化パラメータが高い LIRG は $[\text{Ne V}]$ 輝線を示すか、小さな $\text{PAH}_{6.2\mu\text{m}}$ の等値幅 ($< 0.3\mu\text{m}$) を示し、活動銀河核 (AGN) の存在を示す。また広い速度幅の $[\text{Ne III}]$ 及び $[\text{Ne V}]$ 輝線が見られるスターバースト銀河や、高い $[\text{Fe II}]/[\text{Si II}]$ 比や $[\text{Fe II}]/[\text{S III}]$ 比を示し衝撃波の存在が示唆されるスターバースト銀河を衝撃波モデルで説明し、衝撃波速度として $v \sim 100\text{--}200\text{kms}^{-1}$ を得ている。将来、これらの衝撃波の存在を ALMA サブミリ波・電波干渉計やハーシェル宇宙望遠鏡で検証することが可能であろう。また、輝線の合成光度 $L([\text{Ne III}] + [\text{Ne II}])$ が遠赤外光度と強い相関を示すことを明らかにし、星形成率の導出に有効であることを示した。GOALS は近傍の明るい LIRG をすべてサンプルしており、本研究で得られた LIRG のスターバーストの特性は LIRG の統計的な特性を表しており、将来、遠方宇宙の LIRG と比較する上で優れた基礎データになると考えられる。

本研究は次に、「あかり」とスピッツァーのデータを用いて、近傍の LIRG をスターバーストと AGN に分類する診断方法を考案している。その①は、「あかり」の $3.3\mu\text{m}$ の PAH (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons、多環芳香族炭化水素) 輝線の等値幅データと

$F(4.3\mu\text{m})/F(2.8\mu\text{m})$ フラックス比を使い、その②は、スピッツァーと「あかり」のデータを組み合わせた、 $F(30\mu\text{m})/F(15\mu\text{m})$ 比と $F(4.3\mu\text{m})/F(2.8\mu\text{m})$ 比を使う診断方法である。この方法は近赤外域 ($2\text{--}5\mu\text{m}$) に現れる高温のダスト ($\sim 1000\text{K}$) の輝線に着目して、AGN によって加熱されたダストを直接検出することでスターバーストと AGN が分離出来ることを示したものである。また、スターバーストが卓越している LIRG では、 $\text{PAH}_{3.3\mu\text{m}}$ の光度と赤外線光度との比 $L(\text{PAH}_{3.3\mu\text{m}})/L(\text{IR})$ が AGN の卓越する LIRG よりも大きく、スターバーストと AGN の識別が可能なのに対し、ブラケット α 輝線との光度比 $L(\text{Br}\alpha)/L(\text{IR})$ にはほとんど違いがなく、識別には適さないことも明らかにした。 $\text{PAH}_{3.3\mu\text{m}}$ は $z>3$ では唯一観測可能な PAH であるので、ここで提案された診断方法は遠方の LIRG の研究に非常に重要である。

最後にスピッツァーのデータを用いて、衝突・合体途上にある ULIRG II Zw096 の詳細な物理状態を明らかにした。この銀河の赤外光度は $10^{11.94}$ 太陽光度であり、その光度の少なくとも 80% は紫外域や可視光では見えない光源から来ていることがわかった。中間赤外スペクトルを見る限りでは、ダストに覆われた AGN から高電離の輝線が現れている兆しはない。にもかかわらず $\text{PAH}_{6.2\mu\text{m}}$ 輝線の等価幅は光源がすべてスターバーストだとすると期待される値の半分にしかならない。星形成領域は中心核を外れて存在し、星形成率は $12\text{--}45$ 太陽質量/年となる。この星形成領域は中心を外れているにもかかわらず、銀河の光度のすべてを担っており、有名なアンテナ銀河 (NGC4038/4039) と非常に良く似ている。

本研究では、近傍の LIRG のスターバーストの特性を明らかにしてきた。将来の赤外線宇宙天文台 JWST や SPICA によってより高い分解能と高分散の観測がなされれば、スターバースト銀河における星間ガスとダストの理解は著しく進歩するであろう。赤方偏移が $z>3$ にある遠方宇宙の銀河では $3.3\mu\text{m}$ の PAH 輝線のみが受かることを考えると、本研究で明らかにした PAH 輝線の近傍 LIRG での振る舞いは、遠方のスターバースト銀河、AGN を理解するためのベンチマークとなるであろう。本研究のデータ整約から解析、結果のとりまとめ、議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に行っていることが認められる。したがって、審査委員全員が博士論文として合格であると判断した。