

氏 名 村田 一心

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1709 号

学位授与の日付 平成26年9月29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 Studies in mid-infrared properties of galaxies at intermediate
redshift based on the AKARI North Ecliptic Pole surveys

論文審査委員 主 査 教授 中川 貴雄 宇宙航空研究開発機構
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

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

In this thesis, mid-infrared properties of galaxies are investigated with data from the AKARI North Ecliptic Pole surveys (NEP-surveys). For many years, for the understanding of galaxy evolution and formation, many researches have been conducted in various ranges of wavelengths. However, previous studies did not pay much attention to dust features in galaxies at intermediate redshift due to sparse filter sampling of previous telescopes, although the dust features have much information of the star-formation and physical conditions of the interstellar matters. On the other hand, the AKARI NEP-surveys have been carried out with a continuous mid-infrared wavelength coverage of Infrared Camera on-board AKARI satellite. With this survey data, three studies are carried out in this thesis.

First, the catalogue of the AKARI NEP-Deep survey is revised by devising new image analysis methods. Although this survey has an unique advantage of continuous filter coverage from 2 to 24 μm over nine photometric bands, the initial version of the survey catalogue left room for improvement in the image analysis stage; the original images were strongly degraded due to anomalous behaviour of the detector and the optical system. In this study, new image analysis methods are devised and all the images are reanalysed for the improvement of the detection limit and the reliability of the source extraction. The scattered light and stray light from the Earth limb are removed, and artificial patterns in the images are corrected by creating appropriate templates. Artificial sources due to bright sources are also removed by using their properties or by masking them out visually. Detection images are produced by stacking six mid-infrared bands for the mid-infrared source extraction. This reduces the sky noise and faint sources can be extracted more reliably. As a result, the detection limits of all mid-infrared bands are improved by $\sim 20\%$, and the total number of detected objects is increased from 7300 into 9560. The 5σ detection limits in the catalogue are 11, 9, 10, 30, 34, 57, 87, 93 and 256 μJy in the N2, N3, N4, S7, S9W, S11, L15, L18W and L24 bands respectively. The 1σ astrometric accuracies of these band detections are 0.48, 0.52, 0.55, 0.99, 0.95, 1.1, 1.2, 1.3 and 1.6 arcsec respectively. The false-detection rate of all nine bands is decreased to less than 0.3%.

Second, the galaxy-number counts of the nine AKARI/IRC bands are presented. We perform source extraction on the revised images in order to produce reliable number counts. Completeness and difference between observed and intrinsic magnitudes are corrected through a Monte Carlo Simulation. Stellar contribution is subtracted by using stellar fraction estimated with optical data. The resultant source counts are provided down to the 80 % completeness limit; 0.18, 0.16, 0.10, 0.05, 0.06, 0.10, 0.15, 0.16, and

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

0.44 mJy in the 2.4, 3.2, 4.1, 7, 9, 11, 15, 18 and 24 μm bands. At bright side of the counts of all bands, the counts show a flat distribution, consistent with the Euclidean Universe while the faint side shows a deviation, which suggests an evolution in the galaxy population at early universe. The counts are compared with the previous galaxy counts at similar waveband, and they are consistent with each other. The counts are also compared with evolutionary models, showing good agreements with each other. The model with spectral energy distribution (SED) evolution implies that ULIRGs at $z \lesssim 1$ have a local LIRG SED. By integrating the models down to the 80% completeness limits, it is calculated that the AKARI NEP-survey revolved 20-50% of the cosmic infrared background, depending on the wavebands.

Finally, the behaviour of the polycyclic aromatic hydrocarbon emission is investigated at redshift range of $z=0.3-1.4$. This study is conducted with 1868 samples from the revised catalogue of the AKARI North Ecliptic Pole Deep survey. The continuous filter coverage at 2-24 μm enables the measurements of 8 μm luminosity, which is dominated by polycyclic aromatic hydrocarbon emission, for galaxies at up to $z = 2$. The IR8 ($\equiv L_{\text{IR}}/L(8)$) and 8 μm to 4.5 μm luminosity ratio ($\nu L(8)/\nu L(4.5)$) are compared with the starburstiness, R_{SB} , defined as a ratio of specific star-formation rate to that of main-sequence galaxy. All AGN candidates are excluded from the present sample by using an SED fitting. It is found that $\nu L(8)/\nu L(4.5)$ increases with starburstiness at $\log R_{\text{SB}} < 0.5$ and stays constant at $\log R_{\text{SB}} > 0.5$. On the other hand, IR8 is constant at $\log R_{\text{SB}} < 0$ while it increases with starburstiness at $\log R_{\text{SB}} > 0$. This behaviour is seen in all redshift range of the current study. These results indicate that starburst galaxies have a deficit in polycyclic aromatic hydrocarbon emission compared with that in main-sequence galaxies. It is also found that galaxies with extremely high $\nu L(8)/\nu L(4.5)$ ratio have only moderate starburstiness. These results suggest that starburst galaxies have compact star-forming regions with intense radiation that destroys PAHs, and/or have dusty HII regions resulting in lack of UV photons.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

銀河の進化を研究する上で、「赤外線銀河」の役割が重要であることが、赤外線天文衛星「あかり」やハーシェル宇宙天文台の観測から明らかになってきた。「赤外線銀河」とは、塵（固体微粒子）に覆われているため可視光では暗いものの、塵からの熱放射が見られる赤外線では非常に明るい銀河のことである。本研究は、「あかり」で行った北黄極（North Ecliptic Pole; NEP）サーベイ観測のデータを主に用いて、赤方偏移0.3~1.4（約50~80億年前の宇宙）において、赤外線銀河の性質とその進化について、以下に述べるような新たな知見をもたらしたものである。

本博士論文は4章からなる。第1章（序章）では、銀河進化史研究の現状と、その中での赤外線銀河の重要性について紹介すると共に、本研究の主題である多環式芳香族炭化水素（Polycyclic Aromatic Hydrocarbons; PAH）について述べている。PAHとは、赤外線銀河の中間赤外線帯に特徴的なスペクトル輝線放射（波長7.7 μm のそれが最も強い）をすることで知られている炭素原子数10個~数百個の有機物である。PAHからの放射は大変に強く、銀河からの全赤外線光度の約10%に達する。しかしこれまでの赤外線宇宙望遠鏡の観測では、装置の制約から赤方偏移1付近の赤外線銀河のPAH放射は統計的に調べられてこなかった。そこで、「あかり」搭載近中間赤外線カメラ（Infrared Camera; IRC）によるNEPの特徴について本論文では論じている。「あかり」IRCによるNEPサーベイでは、波長2~24 μm を9バンドで連続的にカバーする数千個の赤外線銀河サンプルが得られており、遠方銀河からのPAH放射量を統計的に調べることができる。

続く第2章では、「あかり」IRCによるNEPディープサーベイ（0.5平方度）で得られた9バンドの画像を再解析し、新しい天体カタログを構築する研究成果について論じている。従来のNEPサーベイデータから作成した天体カタログには、画像処理において、幾つか問題点が残ったままであった（地球からの迷光や明るい天体周辺のゴースト、画像の特定領域の光応答の時間変動の影響等）。出願者は、全ての画像を詳細に調べ様々な方法を用いて画像解析を改善し、結果として検出限界を約20%向上させると共に検出の信頼性も99.7%にまで向上させることに成功した。これにより2013年に出願者が世界に公開した新カタログでは、掲載された天体数が従来カタログよりも30%近く増加した。

第3章では、前章で出願者が構築した新天体カタログから、IRCの全9バンドそれぞれについて銀河カウント（赤外線銀河からのフラックスに対する単位立体角あたりの銀河数）を作成する研究について論じている。このために検出の完全性をシミュレーションで評価し、銀河系内の星の寄与をモデルからの予想値で差し引いた。得られた銀河カウントは、個別の波長毎には、従来の観測で得られた銀河カウントと良く一致する。出願者は、9バンドの銀河カウントを説明できる新しいモデルの作成も試みている。これはハーシェル宇宙天文台の観測から見積もられた赤外線銀河の光度関数の進化を前提とするが、近中間赤外線スペクトルエネルギー分布（Spectral Energy Distribution; SED）の形状をいくつかのパラメータで記述したもので、この結果、遠方の高光度赤外線銀河が、近傍宇宙の比較的

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

低光度赤外線銀河のSEDを持つことが示唆された。

第4章では、第2, 3章の成果をもとに、赤方偏移0.3~1.4における星形成が活発な赤外線銀河のPAH放射について論じている。出願者はまずNEPの地上可視・近赤外撮像・分光データを用いて赤外線銀河の赤方偏移を求めた。さらに銀河SEDモデルを用いて、活動的銀河核の寄与が大きい銀河をできる限り除外し、純粋な星形成銀河のみを取り出し、波長8 μm 付近のPAH放射強度を測定した。また同時に静止系の可視光近赤外SEDより星質量を求めた。さらにハーシェル宇宙天文台等の遠赤外・サブミリ波データを用いて、全赤外線光度を測定することで星形成の活発度を見積もった。以上により、星形成の活発度とPAH放射強度の関係を調べたところ、星形成活動が比較的低い銀河では、星形成が活発になるに従いPAH放射強度も強くなるものの、星形成活発度がある程度より上の銀河では、PAH放射強度は一定値となることが示された。これは調査した赤方偏移0.3-1.4に共通の現象である。このことは激しい星形成を行うコンパクトな赤外線銀河においてはPAH分子が光解離等で減少していることを示唆する。また、遠方の高光度赤外線銀河の星形成活発度は、近傍宇宙の比較的low光度の赤外線銀河のそれと同程度であることがわかった。これは前章で得られた示唆を裏付けるものである。

出願者が得た赤方偏移1付近の知見は、近い将来、NEPのワイドサーベイ(5.4平方度)を用いてより近傍宇宙(赤方偏移0.3付近)での大統計データを用いてより高い精度で検証され得る。高光度赤外線銀河の星形成の性質の違いがいつ発現するかの解明が期待される。また次期赤外線天文衛星SPICAによる中間赤外線サーベイ観測により、PAHの個々のスペクトル線放射が、赤方偏移4の初期宇宙まで検出でき、この分野の大きな発展が期待され、博士論文としてふさわしい内容である。

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。