

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244040

研究課題名(和文) スペース多波長観測に基づく激動期宇宙における銀河の活動性の解明

研究課題名(英文) Multi-Wavelength Study of Active Galaxies in the Violent Epoch

## 研究代表者

松原 英雄 (MATSUHARA, HIDEO)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：30219464

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,400,000円

研究成果の概要(和文)：70～100億年前の宇宙では、現在よりもはるかに活発に星形成や超巨大ブラックホールの成長が行われ赤外線で輝いていた(激動期宇宙)。しかしこれまでは、赤外線放射源について活発な星形成と超巨大ブラックホールの両者の分離が正確にできていなかった。北黄極領域の赤外線銀河を対象とした本研究において、赤外線天文衛星「あかり」を中心とする可視～中間赤外多波長データに加え、新たにX線・サブミリ波データや可視・近赤外分光データを取得した。これにより、激動期宇宙の赤外線銀河の大半に、塵に埋もれた活動的銀河核による放射の寄与が含まれていることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：7-10 billion years ago, the Universe was rich in infrared bright galaxies, which exhibited much more active star-formation (starburst) and super-massive black-hole (SMBH) accretion than present (violent epoch). Regarding the energy source, however, separation between the starburst and SMBH accretion has not precisely done yet.

In this research based on the infrared galaxies in the North Ecliptic Pole deep field, we obtained new X-ray, submm, and optical spectroscopic data for numerous infrared galaxies observed with an infrared space telescope AKARI. As a result, it is revealed that significant fraction of infrared galaxies in the violent epoch harbor dust obscured active galactic nuclei.

研究分野：赤外線天文学

キーワード：光学赤外線天文学 X線 線天文学 電波天文学

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 70~100 億年前の宇宙では現在よりもはるかに活発に星形成が行われていたこと、またそれと並行して超巨大ブラックホールの成長も行われてきたことが明らかにされつつあった(「激動期宇宙」)。この研究の中で、「塵(サブミクロンサイズの固体微粒子)に覆われた銀河」、即ち塵のため可視光では見えない一方、塵からの赤外線熱放射で明るい銀河の観測が本質的に重要であることも認識されるようになった。

(2) 我々は、北黄極領域について赤外線天文衛星「あかり」を中心とした多波長観測研究(先行課題:基盤研究(A)(一般)「超極赤銀河の多波長探査による銀河探査の研究」、平成16-19年度)を行い、これまでの同様の研究に比べ精度の高い宇宙の星形成史を明らかにしてきた。しかし、この研究は直接的には「銀河の中間赤外線光度の進化史」を明らかにしたものであり、そこから「銀河の星形成率」に読みかえる際に様々な不定性があった。例えば塵からの熱放射のエネルギー源について、活動的銀河核(銀河中心領域に存在する超巨大ブラックホールへの周囲の物質の降着をエネルギー源とする天体)の寄与の分離が、正確にできていなかった。

### 2. 研究の目的

激動期宇宙の銀河の活動性を明らかにするため、前述した先行課題で整備した多波長観測データ(主に紫外~中間赤外線)に加えて、チャンドラ X 線天文台、2009 年に打ち上がった赤外線・サブミリ波宇宙天文台ハーシェル、そして地上大口径望遠鏡の多天体ファイバー分光器による新たな観測データを取得する。これにより、激動期宇宙において Compton Thick(後述)も含めた活動的銀河核がどれくらい存在するかを明確に分離し、激動期宇宙における正確な星形成率を求める。

### 3. 研究の方法

北黄極領域で見つかった激動期宇宙の赤外線銀河の多波長(紫外~中間赤外)カタログをベースに、以下の3つの研究項目を行い、激動期宇宙における正確な星形成率、及び Compton Thick も含む活動的銀河核の寄与の正確にもとめ、両者の関係の解明を目指す:

- (1) ハーシェル宇宙天文台の波長 55 - 500 mm における高空間解像・高感度観測、
- (2) チャンドラ X 線天文台の観測および「あかり」中間赤外多波長データによる活動的銀河核の分類、
- (3) 地上大口径望遠鏡の多天体分光器による可視光では暗すぎて分光できない天体のスペクトル線観測。

### 4. 研究成果

平成 23 - 24 年度にかけて、ハーシェル宇宙天文台による高空間解像度の遠赤外線撮像

観測データを取得した。また地上大口径望遠鏡による多天体分光観測を、ケック望遠鏡・すばる望遠鏡等で合計約 1000 天体について取得することができた。これにより平成 25 年度において以下の成果を発表した。

(1) ハーシェル宇宙天文台による遠赤外・サブミリ波における高空間解像・高感度観測データを取り込んで多波長カタログを生成した。

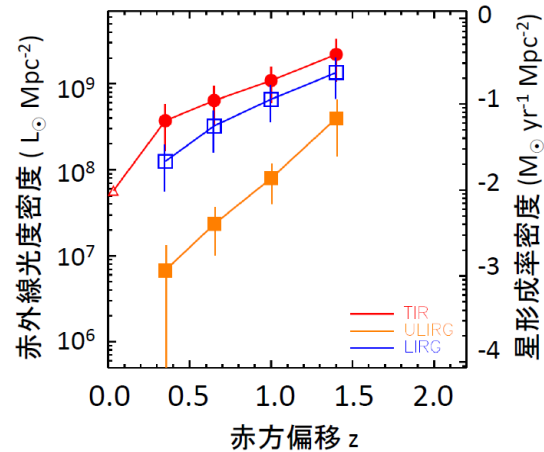


図1. 赤外線天文衛星「あかり」を中心とする北黄極多波長サーベイによって明らかになった宇宙の星形成率密度の進化(Goto et al. 2010 & 2015)。LIRG (赤外線光度が  $10^{11} L_{\odot}$  台) クラスの銀河が支配的ですが、ULIRG ( $10^{12} L_{\odot}$  台) が急激に過去に向かって増大している。

(2) 可視・近赤外多波長データ(CFHT 可視(megacam)・近赤外(WIRCAM)撮像データおよび、すばる FMOS による多天体分光データ)の解析を行い、深い可視・近赤外撮像データが従来よりも面積が倍になったことを活かして、中間赤外線光度関数の赤方偏移依存性を再解析し、図1のような精度の高い星形成率密度の進化を明らかにした(Goto et al. 2015)。また図2に示すように、中間赤外線(波長  $8 \mu\text{m}$ )と遠赤外線光度を注意深く比較したところ、この比は一定ではなく、星形成活動の強さ(主系列銀河と呼ばれる普通の星形成銀河を基準としている)に応じて変化することが新たにわかった。これは将来の天文衛星で超遠方の赤外線銀河を中間赤外線で観測し星形成率を求める際に、重要な知見をもたらしたと言える。

(3) 「あかり」の近中間赤外線カメラ(2.4-24  $\mu\text{m}$ ) 9バンドでの北黄極領域撮像の再解析画像をベースとした新たな銀河カタログの性能評価を予定通り実施した(Murata et al. 2013)。

これらを総合し「あかり」を中心とする多波長画像およびカタログの整備を実施した。これらの成果の学術論文として投稿すると共に、平成 25 年 7 月に東京大学で行われた次世代赤外線天文衛星に関する国際会議や 8 月にベトナムで行われた国際科学会議・11 月に

台湾でおこなれたワークショップにて発表した。

平成 26 年度（最終年度）は、これまでの成果を論文として出版することを精力的に行った。具体的には可視・近赤外線撮像データ・カタログ (Oi et al.) 「あかり」近中間赤外線波長における銀河計数論文 (Murata et al. 2015b)、チャンドラ X 線天文台データ・カタログ (Krumpe et al.) 電波放射の強い活動的銀河核についての研究 (Karouzos et al.) 等である。

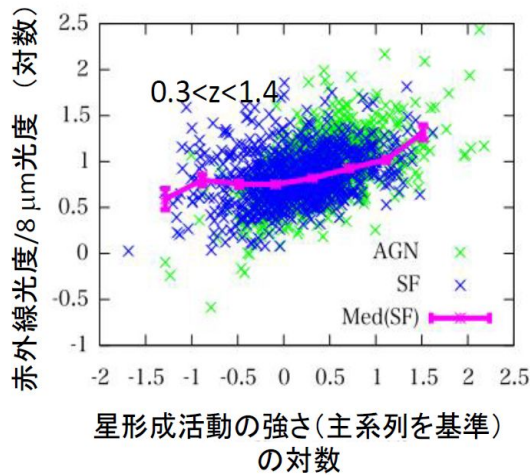


図 2. 純粋なスターバーストに見られる 8  $\mu\text{m}$  光度の低下 (8  $\mu\text{m}$  には、有機物からのバンド輝線が存在する)。活動的銀河核 (AGN) の寄与のきわめて少ない天体 (SF) について、星形成活動が非常に強いところで 8  $\mu\text{m}$  光度が相対的に下がることを発見した。

(4) さらに研究の総括として、活動的銀河核の成分を除去し「あかり」中間赤外選択銀河すべてについての遠赤外・サブミリ波データの利用による精密な星形成率評価 (Murata et al. 2015a) (2) 地上大口径望遠鏡の多天体分光器による天体の近赤外スペクトル線データによる金属量・星形成率の評価と、赤外線データから見積もられる星形成率の比較検討 (Oi et al. 論文執筆中) を行った。特に (1) の実施のため、海外研究協力者 (英国及びフランス) を日本に一月ほど招聘し、集中的に解析を行った。図 3 に具体例としてモデルフィットによる活動的銀河核の成分抽出の様子を示す。チャンドラ X 線天文台のデータを詳しく解析することにより、活動的銀河核を持つと考えられる赤外銀河の一部は X 線が出てこれないくらい厚くガス/ダストで覆われている、Compton Thick と呼ばれる活動的銀河核であることが示唆された。なお共同研究者の一人に不幸があったため、担当されていた論文の執筆及び関連する研究打合せのための費用を平成 27 年度に繰り越した。

今後の研究の動向：以上のように激動期宇宙の赤外線銀河には塵に埋もれた活動的銀河

核による放射の寄与がかなりの割合で含まれていることが明確になった。現在の宇宙では活動的銀河核は星形成の終了した大質量銀河に良く見られ、むしろ星形成を抑制していると考えられるのに対し、激動期宇宙は異なる様相を呈していると考えられる。次なる課題はこのような激動期宇宙における活動的銀河核と星形成の関係を調べ、活動性の原因を調べることでありと結論する。

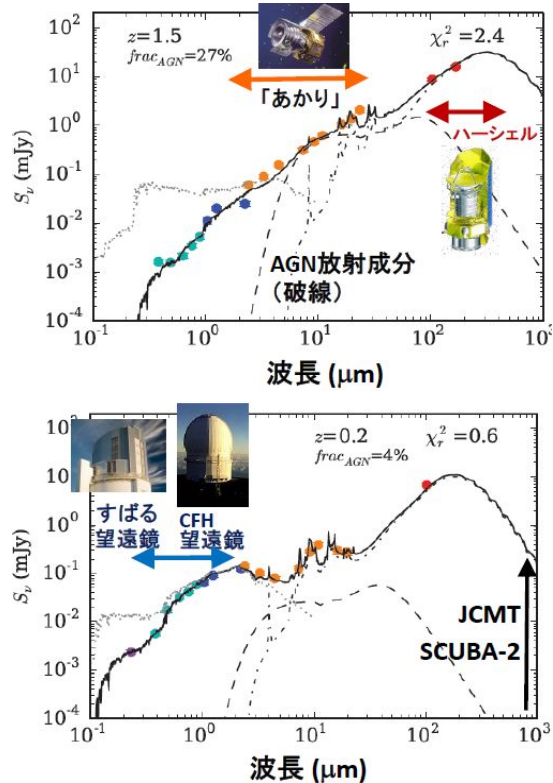


図 3. 北黄極領域の赤外線銀河サンプルの多波長スペクトルの例 (赤方偏移 1.5 および 0.2) とスペクトルへのモデルフィットの様子。上は活動的銀河核からの放射の寄与が 30%、下はほとんど寄与していない場合である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 13 件)

Krumpe, M.; Miyaji, T.; Matsuhara, H. (10番目); and 10 coauthors, "Chandra survey in the AKARI North Ecliptic Pole Deep Field - I. X-ray data, point-like source catalogue, sensitivity maps, and number counts", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 446, 2015, 911-931, DOI: 10.1093/mnras/stu2010

Goto, T.; Oi, N.; Ohya, Y.; Malkan, M.A.; Matsuhara, H.; and 20 coauthors, "Evolution of mid-infrared galaxy luminosity functions from the entire

AKARI NEP deep field with new CFHT photometry”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 452,2015,1684-1693, DOI: 10.1093 / mnras / stv1411

Murata, K.; Pearson, C. P.; Goto, T.; Kim, S. J.; Matsuhara, H.; Wada, T., ” The 2- 24  $\mu$ m source counts from the AKARI North Ecliptic Pole survey”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 444, Issue 3, p.2346- 2354, 査読有, 444, 2014, 2346-2354, DOI: 10.1093/ mnras / stu1617

Pearson, Chris P.; Serjeant, S.; Oyabu, S.; Matsuhara, H.; and 8 coauthors, “ The first source counts at 18  $\mu$ m from the AKARI NEP Survey”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 査読有, 444, 2014, 846-859, DOI: 10.1093/ mnras / stu1472

Murata, K.; Matsuhara, H.; Inami, H.; and 6 coauthors, “ Polycyclic aromatic hydrocarbon feature deficit of starburst galaxies in the AKARI North Ecliptic Pole Deep field”, Astronomy & Astrophysics, 査読有, 566, 2014, 1-6, DOI: 10.1051/ 0004- 6361/ 201423744

Oi, Nagisa; Matsuhara, Hideo; Murata, Kazumi; and 9 coauthors, “ Optical - near- infrared catalog for the AKARI north ecliptic pole Deep field”, Astronomy & Astrophysics, 査読有, 566, 2014, 1-13, DOI: 10.1051/ 0004- 6361/ 201322561

Karouzos, Marios; Im, Myungshin;; Matsuhara, Hideo(12番目); and 19 coauthors, “ A Tale of Two Feedbacks: Star Formation in the Host Galaxies of Radio AGNs”, The Astrophysical Journal, 査読有, 784, 2014, 1-23

Murata, K.; Matsuhara, H.; Wada, T.; and 10 coauthors, ” AKARI North Ecliptic Pole Deep Survey. Revision of the catalogue via a new image analysis”, Astronomy & Astrophysics, 査読有, Volume 559,2013, id.A132, 14 pp, DOI: 10.1051/0004-6361/201321505

Riechers, Dominik A.; Bradford, C. M.; Matsuhara, H.(45番目); and 53 coauthors, “ A dust-obscured massive maximum-starburst galaxy at a redshift of 6.34”, 査読

有, Nature, Volume 496, 2013, Issue 7445, pp. 329-333, DOI: 10.1038/nature12050

Kim, S. J.; Lee, H. M.; Matsuhara, H.; Wada, T.; and 18 coauthors, “ The North Ecliptic Pole Wide survey of AKARI: a near- and mid-infrared source catalog”, Astronomy & Astrophysics, 査読有, Volume 548, 2012, id.A29, 20 pp., DOI: 10.1051/0004-6361/201219105

Matsuhara, H.; Wada, T.; Takagi, T.; and 19 coauthors, “ Overview of the North Ecliptic Pole Deep Multi-Wavelength Survey NEP-DEEP”, Publications of The Korean Astronomical Society, 査読有, vol. 27, 2012, issue 4, pp. 123-128, DOI: 10.5303/PKAS.2012.27.4.123

Solarz, A.; Pollo, A.; Takeuchi, T. T.; Peřiak, A.; Matsuhara, H.; and 8 coauthors, “ Star-galaxy separation in the AKARI NEP deep field”, Astronomy & Astrophysics, 査読有, Volume 541, 2012, id.A50, 8 pp. DOI: 10.1051/0004-6361/201118108

Takagi, T.; Matsuhara, H.; Goto, T.; and 13 coauthors, “ The AKARI NEP-Deep survey: a mid-infrared source catalogue”, Astronomy & Astrophysics, 査読有, Volume 537, 2012, id.A24, 11 pp., DOI: 10.1051/0004-6361/201117759

[学会発表](計 7件)

松原英雄, “ Synergy with Space IR Observations”, JCMTワークショップ, 2014年09月02日, 東京都三鷹市

松原英雄, ” The next-generation infrared astronomy mission SPICA”, Windows on the Universe 2013, 2013年8月14日, ICISE, Vietnam

大藪進喜, “ Extra-galactic studies with the SCI: AGNs and nuclear starburst galaxies”, SPICA Science Conference 2013, 2013年6月19日, 東京都区文京区 東京大学

松原英雄, “ 北黄極多波長ディープサーベイ領域で見つかったDust Obscured Galaxiesの星形成 ” 日本天文学会2012年秋季年会、2012年9月19日～9月21日、大分県大分市

大井渚、松原英雄、他、“「あかり」北  
黄極深撮像観測が迫る激動期時代の銀河  
進化、第13回宇宙科学シンポジウム、2013  
年1月8日～1月9日、神奈川県相模原市

松原英雄、“SPICA:overview and its  
extragalactic science potential”,  
UNVEILING THE FAR-IR AND SUB-MM  
EXTRAGALACTIC UNIVERSE: HERSCHEL, ALMA,  
CCAT, SPICA, AND BEYOND,2011年5月12日  
～5月14日, Irvine, USA

松原英雄, “北黄極多波長ディープサー  
ベイ:カタログ公開及び今後の展望”日本  
天文学会2011年秋季年会、2011年9月19日  
～9月22日、鹿児島県鹿児島市

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/akari/>

<http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Observation/MP/NEP/DATA/>

<http://akari.open.ac.uk/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松原 英雄 (MATSUHARA, Hideo)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
教授

研究者番号：30219464

### (2) 研究分担者

大藪 進喜 (OYABU, Shinki)

名古屋大学・大学院理学研究科・  
助教

研究者番号：10396806

### (3) 連携研究者

和田 武彦 (WADA, Takehiko)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・  
助教

研究者番号：50312202