

「あかり」による北黄極 ディープサーベイと銀河進化

松原 英雄・高木 俊暢

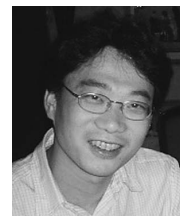
〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 赤外・サブミリ波天文学研究系
〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: maruma@ir.isas.jaxa.jp

e-mail: takagi@ir.isas.jaxa.jp



松原



高木

私たちは赤外線衛星「あかり」の中間赤外線カメラ IRC を用いて、2-24 マイクロメートルを九つの測光バンドで連続的にカバーする大規模なサーベイ観測を北黄極 (NEP) 領域で行いました。本稿では、連続的な波長バンド構成を活かした遠方赤外線銀河の研究を中心に報告します。また、多波長でのアプローチが基本になりつつある銀河進化研究の中で、赤外線観測が果たす役割について少し考えてみたいと思います。

1. はじめに

星は塵 (固体微粒子; ダスト) を含んだ雲の中で生まれます。したがって、塵によって吸収を受ける静止系可視光・紫外線光度を指標に求めた宇宙の星形成史は、当然のことながら過小評価になります。このように銀河の誕生と進化を研究していくうえで、星間塵に覆われた銀河種族は非常に重要で、塵による減光を受けにくい (あるいは、塵からの放射をとらえる) 赤外線～サブミリ波の観測が決め手となります。この状況は、ウィリアム・ハーシェルが、塵の存在に気づかずに銀河系の奥行きを過小評価してしまったことを連想させます。

「あかり」に搭載されている二つの焦点面観測装置の一つ、近中間赤外線カメラ IRC のチームが立ち上がったのは、もう 10 年以上も前のことになります。その頃は、まだ欧州が打ち上げた宇宙赤外線天文台 ISO の赤外線ディープサーベイの観測結果が出てきた頃であり、遠方宇宙の赤外線銀河の銀河カウントに予想しなかった進化が見られたことや赤外線背景放射の存在などが明らか

になったころでした。ISO は、しかし波長 7, 15, 90, 160 マイクロメートルというかなり離散的な波長でのサーベイしか行えませんでしたので、将来の発展の示唆を与えはしましたが科学的な深み、例えばこれまでに地上可視・近赤外線観測で知られている銀河や活動的銀河核との関係は全く謎のままでした。それを理解するには、単色ではなく多波長にわたるスペクトル分布を知る必要があります。そこで「近・中間赤外線を連続的にカバーするカメラ・分光器が欲しい」という動機で当時私たちは、IRC をデザインしたのでした。こうして波長 2.5-24 マイクロメートルを九つの撮像バンドおよび低分散分光機能でカバーするという、IRC の基本的特徴が確定しました。

しかし「あかり」の主目的は遠赤外線全天サーベイであり、太陽同期極軌道を周回するごとに、常に太陽方向と垂直で南北両極を含む天空を一周する姿勢制御が基本です。しかもこの基本的な姿勢からのオフセットは±1度 (実際には 0.6 度) に限られています。「あかり」は、各周回につき 3 回を限度として約 10 分間の指向観測モードも用意

していますが、 $z \sim 3$ の宇宙までを探査するディープサーベイを実現できるのは、南北両黄極方向に限られてしまいます。南黄極には大マゼラン星雲があり銀河サーベイには適しませんので、IRCの遠方宇宙レガシーフィールドは、北黄極 (NEP) 方向ということに自動的になります¹⁾。

さらに「あかり」が打ち上がる2年半前に、米国が、スピッツァー宇宙望遠鏡 (Spitzer) を打ち上げました。Spitzerは「あかり」と違い、いつでも望遠鏡を向けて観測できる天域が広く、しかも地球から徐々に離れたところを追いかける「人工惑星軌道」に置かれているので非常に長時間の観測が可能で、「あかり」よりも深くかつ広い赤外線ディープサーベイが可能です。実際、2009年5月にヘリウムが消失するまでに、GOODSのように究極に深い観測から、SWIREのように約50平方度をカバーする広い領域のサーベイまで、大量の銀河サンプルを構築しました。したがってSpitzerが行ったサーベイに対して「あかり」の北黄極サーベイがいかに特長を出すのか、を問われることとなります。幸い(?) Spitzerには、3.5, 4.6,

5.8, 8, 24マイクロメートルの撮像バンドしか搭載されていません(16マイクロメートルには視野約1分角の分光観測の天体導入用のカメラもあり、限定的な観測は可能ですが)。一方「あかり」には11,15,18マイクロメートルというSpitzerが大々的に観測できない撮像バンドがあります。4章ではこの特徴を活かした科学的成果を紹介したいと思います。

2. いざ、観測—衛星運用の顛末

「あかり」は2006年2月に打ち上げられ同年4月の観測開始から液体ヘリウム消失までの約一年半に、約5,000回の指向観測を行いました。そのうちの約14%に相当する700回の指向観測を、NEPサーベイに投入しました。図1(左)は、「あかり」がどのようにサーベイを行ったかを図示したものです。北黄極サーベイは、0.38平方度の「ディープ(深探査)」領域、5.8平方度の「ワイド(広域探査)」領域の二つからなっており、ほぼ毎日行った指向観測の方向を少しずつずらして最終的に図のような円形の領域を観測しました²⁾。こ

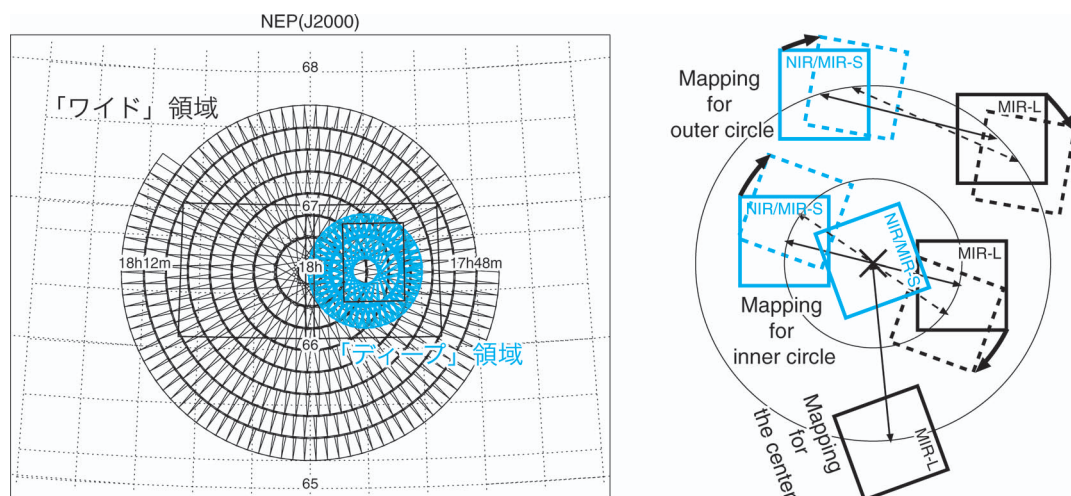


図1 (左)「あかり」北黄極サーベイ (黒:「ワイド」領域, 青:「ディープ」領域)。CFH望遠鏡および「すばる」望遠鏡による可視光撮像の行われた領域をそれぞれ大・小の四角で示している。(右)「ディープ」領域の観測運用の様子。IRCのNIR・MIR-Sチャンネルの視野(青)とMIR-Lチャンネルの視野(黒)は、約20分離れている。観測効率を上げるため、日々の視野の回転を利用し、すべてのチャンネルで同じ領域をできるだけ均一にサーベイした²⁾。

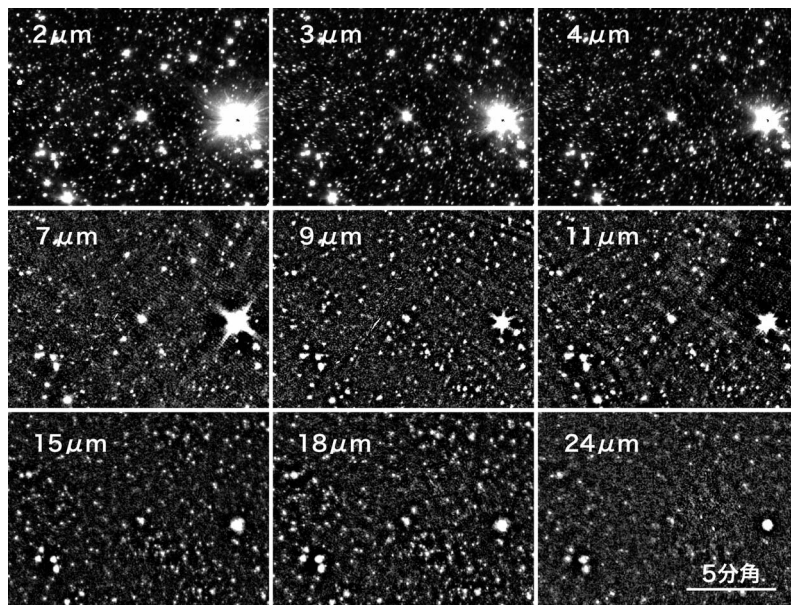


図2 「あかり」のIRCデータから作成した「ディープ」領域の各波長バンドでの画像の例。同じ領域を拡大表示している。

ここで問題となるのはIRCの視野が、NIRおよびMIR-Sチャンネル(2-11マイクロメートル)と、MIR-Lチャンネル(15-24マイクロメートル)とで約20分角離れた別々の方向を観測していることです。無駄な観測を行わないためには、うまく1年間ですべての波長でのサーベイ領域がほぼ重なるようにしたいのですが、ここで研究員の大藪進喜氏が、画期的な方法を編み出しました(図1(右))。これは「ディープ」領域の観測方法の具体例で、領域を中心から外側まで三つに分けて、それぞれでNIR/MIR-Sの視野とMIR-Lの視野が適当な時期に観測し、観測方向がちょうど入れ替わるようにする、というものでした。

このおかげで限られた観測時間を有効に使い目的を達成することができました。実際各撮像バンドでの「ディープ」領域にわたる積分時間は、1,000-1,500秒(中間赤外線)とあまり差がなく、地球光の望遠鏡バッフルへの入射をかぶった一部の領域を除いて、均質な性能の画像が得られています。

こうして「ディープ」「ワイド」それぞれの領域で「あかり」の近・中間赤外線カメラ(IRC)の全

撮像バンドでの画像を作成することができました。図2は、その「ディープ」領域の画像の一部です。近赤外線で約2万個の赤外線天体が検出されました。また中間赤外線(波長15-18マイクロメートル)においても、Spitzerの行った24マイクロメートルでのサーベイと同じ程度深い、100 μJy (5σ)という検出限界を達成し、4,000個以上の赤外線天体を「ディープ」領域で検出することができました。「ワイド」領域では、各点での積分時間が約200-300秒と短いのですが、領域が広く約12,000個の中間赤外線天体を検出することができました³⁾。

3. 多波長フォローアップ

私たちは遠方銀河の性質を調べるために赤外線観測を行い、赤外線銀河のカタログを作成しました。しかし、赤外線の明るさだけでは銀河の性質を調べるには不十分です。特に、遠方銀河の研究は、可視-近赤外線での地上観測による成果が先行しているので(歴史を考えると当然ですが)、可視光での色などを調べないことには、先行の研究

結果との比較もままなりません。また、銀河までの距離に相当する赤方偏移を決定することは、銀河研究の最初の一步ですが、個々の銀河を分光して赤方偏移を決めていくと、たいへんな労力と時間がかかります。そこで、近年では、時間のかかる分光観測をしないで、可視-近赤外線が多波長（つまり多くの波長帯での）測光観測から、赤方偏移を見積もる方法—測光赤方偏移決定法—が基本的なテクニックとして活用されています。この方法で得られた赤方偏移は、それなりの誤差がありますし、特に赤外線銀河という特殊な天体を対象にする場合には、分光観測での確認が必要です。多波長でのアプローチは、今回の研究に限ったことではなく、いわば現代天文学のトレンドです。あらゆる観測装置を使うことになるので、解析のたいへんさに（うれしいはずの）悲鳴を上げている人も多い状況です。

私たちもご多分に漏れず、NEP領域の多波長データを蓄積してきました。さまざまな望遠鏡にアクセスするためにも国際協力は欠かせません。使用した望遠鏡とチーム内の主担当の国籍を列举してみると、波長の短いほうから、紫外線衛星GALEX（アメリカ）、CFHTの紫外線（ u^* ）データ（イギリス）、すばる望遠鏡による深い可視撮像（日本）、CFHTによる広い可視撮像（韓国）、Kitt Peak 2.1 m 望遠鏡等による近赤外線撮像（日本）、「あかり」衛星による赤外線観測（日本）、電波観測（イギリス）となります。分光観測は、Keck望遠鏡（日本）やMMT（韓国）による深いものと、WIYN望遠鏡（韓国）による浅いけども多数の天体について行ったものがあります。また、広い「ワイド」領域を可視で撮像するために、ソウル大学のチームは、ウズベキスタンのマイダナク天文台に設置した専用カメラをフル活用しました。その意気込みは特筆に値します。

一方、残念ながらまだX線の深い撮像データ

が得られていません。例えばNASAのChandra X線天文台による高角分解能のX線画像は、「ディープ」領域で検出された銀河に、塵に覆われた活動的銀河核があるかどうかを調べるうえでたいへん有効ですので、今後ぜひ取得したいと考えています。いろいろと苦労はありますが、まずは手持ちのデータで成果を上げていこうと考えています。

4. 何が得られたか？—初期科学的成果の概要

私たちの研究目標は、銀河の形成・進化について、赤外線観測からより詳しい検証をすることです。赤外線を放射しているのは、主に星間ダストです。星間ダストとは大きさが0.1マイクロメートル程度の黒鉛（グラファイト）やケイ酸塩（シリケート）です。大きさには幅があり、小さな物は大きな分子といったほうが良いような1ナノメートル程度の芳香族炭化水素（PAHs）も含まれます。PAHは中間赤外線での主要な放射源です。これらの星間ダストを観測して、なぜ銀河の進化を調べることができるのでしょうか？銀河の進化を理解するには、観測結果を理論モデルと比較する必要がありますが、残念ながら、ダストの成分の進化まで取り扱うような銀河進化モデルは、まだありません*1。今の所重要なのは、銀河の星質量や星生成率といった銀河全体の性質を表す量です。現時点で、赤外線観測の最大の利点は、銀河の全光度、もしくは星生成率を最も精度良く決定できる点です。これは、遠方の星生成銀河のようにガスも多く活発な銀河では、新しく生まれた星からの光のほとんどがダストによって吸収されて、赤外線で再放射されるためです。例えば、銀河進化問題でよく議論される、宇宙の平均的な星生成率の決定には、赤外線観測が最も適しています。

*1 数値シミュレーションや準解析的モデルの範囲で。

ただし、赤外線観測にも問題がないわけではありません。銀河の全赤外線光度を求めるには、放射ピークである 50–100 マイクロメートル付近の赤外線を検出する必要がありますが、残念ながらこの波長帯では、高赤方偏移銀河を検出する感度は出ません。赤外線では比較的感度が出るのは、「あかり」では IRC でカバーする中間赤外線です。ただし、この波長帯では、全赤外線光度の 10 分の 1 程度しか光が出ていないので、観測値から全赤外線光度を求めるには大きな補正が必要です。この赤外線光度の補正が当面の重要課題になります。

この補正作業を Spitzer の 24 マイクロメートル観測の場合を例に、具体的に説明します。観測はすべて 24 マイクロメートルで行われるため、異なった赤方偏移にある天体は、異なった静止波長で観測されます； $z=1$ なら 12 マイクロメートル、 $z=2$ なら 8 マイクロメートル帯の観測になります。全赤外線光度を出すには、例えば 8 マイクロメートル光度と全赤外線光度の相関関係を用いて光度を変換するので、観測した静止波長での赤外線光度を、適当なスペクトル分布 (SED) を仮定して、8 マイクロメートル光度を求めます（いわゆる K 補正）。その後で、赤外線光度の相関関係を使って全赤外線光度に変換するので、2 段階の補正を経て最終的な全赤外線光度が出ます。結果的に、大きな不定性が伴うのは想像に難くありません。不定性は、一つは仮定したスペクトル分布に、もう一つは赤外線光度関係に起因します。厄介なことに、両者とも赤方偏移によって変わっているという研究結果が出てきているのが現状です。

4.1 「あかり」の成果

「あかり」によるサーベイ観測の特徴は、何と言っても中間赤外線帯の連続的な波長カバーです。これによって、静止系のある波長の光度を赤方偏移によらずに求めることができるので、K 補正の際にスペクトル分布を仮定する必要がありま

せん。つまり、全赤外線光度を求める際の不定性の一つを除くことができます。この利点を活かした中間赤外線 (8, 12 マイクロメートル) での精度の高い光度関数、および、宇宙の星生成史の紹介は後藤さんによる次稿に譲ります⁴⁾。また、天球上での銀河の個数密度の観測 (銀河カウント) では、ISO の結果を更新する 15 マイクロメートルでのカウント^{5), 6)}や、これまでになかった波長 (18 マイクロメートル) での新しい結果がでてきます⁶⁾。ここでは、赤外線による銀河進化研究のキモである赤外線銀河のスペクトル分布と赤外線光度関係の赤方偏移依存性に関連した研究結果を紹介します⁷⁾。

この研究には、「あかり」の中間赤外線カメラ IRC の連続的な波長バンド特性を活かして作ったユニークな銀河サンプルを用います。通常の星生成銀河では、中間赤外線の波長帯は最も小さいダストである PAH からの輝線バンド放射^{*2}が卓越しています。図 3 に、「あかり」で観測した赤外線銀河のスペクトル分布を示しました。観測データとそれに対する最適なスペクトル分布モデル⁸⁾です。このように、「あかり」によるスペクトル分布は PAH の放射特性をとらえることに成功しています。PAH 放射の強い銀河は、静止系 6 マイクロメートル付近で急激にフラックス密度が増加するため、「あかり」の撮像観測では、ある波長帯で異常に赤くなります。図 4 には、銀河の中間赤外線でのフラックス比を赤方偏移 z の関数としてプロットしました。このように、11 と 7 マイクロメートルでの比を使うと、 $z \sim 0.5$ で PAH 放射が強い銀河をフラックス比が 8 以上という条件で同定することができます。少し長い波長の 15 と 9 マイクロメートルの比を使うと $z \sim 1$ にある同様の銀河を同定できます。以下では、これらの銀河を PAH 銀河と呼ぶことにします。このように、撮像観測だけで PAH 放射が強い銀河を同定でき

*2 主な中心波長は 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3, 12.7 マイクロメートル。

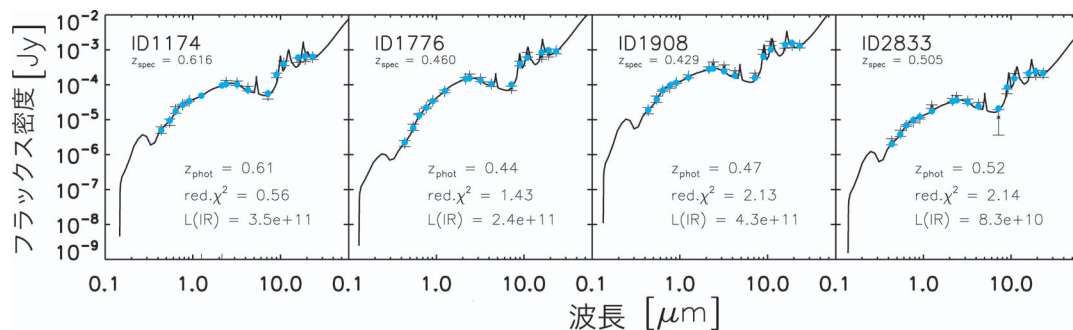


図3 「あかり」で検出した赤外線銀河の可視-中間赤外線のスペクトル分布の例。青丸はモデルにフィルターの効果을考慮したときのフラックス密度。

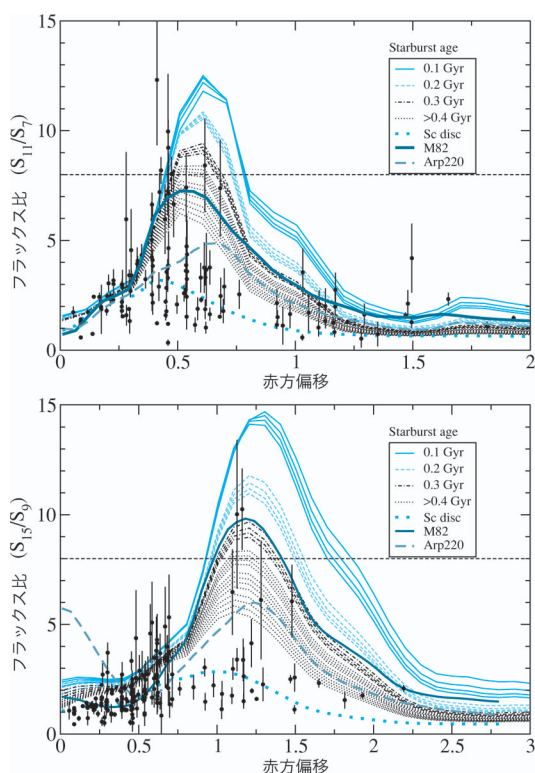


図4 中間赤外線フラックス比の赤方偏移依存性。銀河年齢で示している線は銀河 SED モデルから計算した。黒点は分光で赤方偏移の決まった天体。

るのは「あかり」衛星の画期的な能力の一つです。

近傍では、PAH放射が卓越している銀河は、主に爆発的に星生成している低光度銀河です。全赤外線光度*3が 10^{12} 太陽光度以上の超光度赤外線銀河 (ULIRGs) と呼ばれる近傍で最も明るい銀河では、全赤外線光度が高い割に、PAH放射は強くありません。図5にPAH放射の強さを表す7.7マイクロメートル光度と全赤外線光度の関係を示しました。 $z < 0.2$ の近傍サンプルは、Spitzerの赤外線分光器IRSの結果をもとにしています。近傍銀河では、低光度銀河 (10^{11} 太陽光度以下) で成り立つPAH光度と全赤外線光度の関係があります。ただし、この光度関係は超光度赤外線銀河には使えません。おそらく、近傍の超光度赤外線銀河では、全赤外線光度が活動銀河核 (AGN) からの寄与で底上げされているか、PAH放射が吸収を受けるくらい光学的厚みが大いことが考えられます。このプロットを見ると、中間赤外線光度から全赤外線光度に変換する際の問題点が理解できると思います*4。

一方、「あかり」で見つかったPAH銀河はどうでしょうか？ PAH銀河は同じ図5に青丸で示しました。PAH銀河の7.7マイクロメートル光度

*3 8-1,000マイクロメートルの光度

*4 このプロットでは、7.7マイクロメートル輝線バンドのピーク光度を使っているのでいくらか問題点が誇張されています。

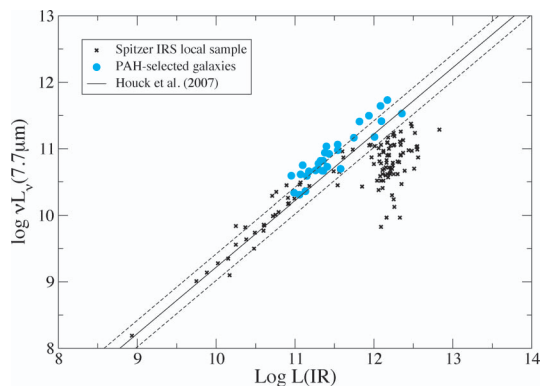


図5 7.7マイクロメートル光度と全赤外線光度の関係。黒は $z < 0.2$ の近傍銀河。実線と点線は近傍の低光度銀河について成り立つ光度関係とその誤差⁹⁾。青丸がPAH銀河を表す。

は、観測された静止系8マイクロメートルフラックス密度から求め^{*5}、全赤外線光度は可視-中間赤外線のスpekトル分布をモデルでフィットすることで求めました^{*6}。PAH銀河は、spekトル分布は低光度の星生成銀河のようですが、超光度赤外線銀河に匹敵する光度をもつ天体もあります。このように明るいPAH銀河はすべて $z \sim 1$ の銀河です。より遠方の $z \sim 2$ 付近では、Spitzerによるサブミリ銀河^{*7}の中間赤外線分光で、期待を裏切る強いPAH放射が観測されています¹⁰⁾。若くて多くの星間ガスをもつ遠方銀河では、近傍には見られない規模での星生成活動が存在し、純粋な星生成活動だけで到達できる赤外線光度が近傍に比べて高くなっているようです。「あかり」による観測では、そのような銀河が $z \sim 1$ でも存在することを明らかにしました。このような銀河は $z \sim 1$ ではまだ少数派かもしれません。次の課題として、「あかり」の特徴を活かして、このような銀河

の個数密度を出すことが挙げられます。

4.2 赤外線による銀河進化研究の可能性

ここで少し、銀河形成問題で果たすダストの役割について考えてみたいと思います。赤外線による銀河進化研究で、現時点での重要な課題は、「全赤外線光度をできるだけ正確に見積もり、星生成率を出すこと」です。ただ、これではダスト放射に含まれている情報を十分に活用しているとは思えません。これ以外の情報は、銀河形成問題を論じるうえでは必要のない枝葉末節なのでしょう

か？
今後、観測技術の向上によって、個々の銀河、または銀河内の領域ごとに、ダストの成分や物理的性質、またサイズ分布などに制限がつけられるようになるかもしれません。現時点では、低金属量の銀河ではPAHが少ないという観測例があります¹¹⁾。ダストの組成やサイズ分布から、星間ガスの履歴についての貴重な情報が得られる可能性があります^{*8}。

ただ、ここまでの情報を赤外線観測で引き出すのは至難の業です。遠方銀河まで対象にすると、とてもこの10年では無理でしょう。また、銀河形成シミュレーションにダストの生成、破壊過程を入れられるほど、ダストについての理解も進んでいません。理論的にも観測的にも、銀河形成問題にダストの物理状態を使う目処は全く立っていないと言ってよいでしょう。もちろん、先読みのしすぎは危険ですし、当てにならないものです。近い将来、赤外線観測が銀河形成問題にとって重要なブレイクスルーをもたらす可能性はありますし、筆者らはそう願っています。

*5 中間赤外線フラックスはPAH放射の寄与が卓越していると仮定して、フィルターでなまされる効果を補正しました。

*6 電波で検出された、いくつかの銀河について、最適なspekトル分布モデルによる電波フラックス密度と観測を比べた結果から、全赤外線光度の見積もり誤差は50%程度と考えています。

*7 高赤方偏移の超光度赤外線銀河の代表格。

*8 例えば、銀河風にあるダストが結晶質だった、とか。

5. 今後の展望

いろいろ苦しみながらも、私たちは *Spitzer* の赤外線サーベイとは一味違った、銀河サーベイを行うことに成功しました。しかしながら NEP サーベイの結果が真に価値が出るのは、処理済み画像や天体カタログ、また検出天体の他波長（紫外～電波まで）での測光・分光データ等を全世界に公開することではないか、と思い、2010年度の公開を目指してがんばっていきます。特に、2009年5月に打ち上がった遠赤外線～サブミリ波宇宙天文台 *Herschel* や、*JCMT/SCUBA-2*、また X 線天文衛星の観測データもぜひ取得し、「あかり」のレガシーフィールドとしていっそうその名を広めていきたいと考えています。

謝 辞

最後に「あかり」NEP サーベイプロジェクトの中心的メンバーには、本稿および次稿を執筆した松原・高木・後藤以外に（敬称略）、和田武彦・大藪進喜・中川貴雄（*ISAS*, *JAXA*）、大山陽一（*ASIAA*）、花見仁史（岩手大）、石垣 剛（旭川工業高専）、*H. M. Lee*・*M. G. Lee*・*M. Im*・*S. J. Kim*（ソウル大学）、*N. Hwang*（国立天文台）、*M. Malkan*（*UCLA*）、*C. P. Pearson*（*RAL*）、*G. J. White*, *S. Serjeant*（*Open Univ.*）らがいます。彼らの貢献に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Matsuhara H., Wada T., Matsuura S., et al., 2006, *PASJ* 58, 673
- 2) Wada T., Matsuhara H., Oyabu S., et al., 2008, *PASJ* 60 (SP2), S517
- 3) Lee H.-M., et al., 2009, *PASJ* 61, 375
- 4) 後藤友嗣ほか, 2010, 天文月報 103, 97
- 5) Wada T., et al., 2007, *PASJ* 59(SP2), S515
- 6) Pearson C.P., et al., 2010, *A&A*, submitted
- 7) Takagi T., et al. 2010, *A&A*, submitted
- 8) Takagi T., Arimoto N., Hanami H., 2003, *MNRAS* 340, 813
- 9) Houck J. R., et al., 2007, *ApJ* 671, 323
- 10) Pope A., et al., 2008, *ApJ* 675, 1171
- 11) Engelbracht C. W., et al., 2008, *ApJ* 678, 804

Study of Galaxy Evolution with the AKARI Deep Survey towards the North Ecliptic Pole

Hideo MATSUHARA and Toshinobu TAKAGI

*Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1
Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510,
Japan*

Abstract: Using AKARI, we conducted a large area extragalactic survey near the north ecliptic pole (NEP). In this NEP survey, the wavelength range of 2–24 micron is continuously covered with nine photometric bands of InfraRed Camera (IRC). In this article, we present main scientific results on distant infrared galaxies, using its unprecedented wavelength coverage at mid infrared. We also discuss the role of infrared observations in the multi-wavelength study of galaxy formation and evolution.