

「あかり」アーカイブデータを用いた近赤外線面輝度スペクトルの成分分離

津村 耕司^{*1} 左近 樹^{*2} 松浦 周二^{*3} 松本 敏雄^{*4} ^{*3} 和田 武彦 ^{*3}
Pyo Jeonghyun^{*5} 田中 昌宏^{*6}

Component Separation of the Near-Infrared Diffuse Spectrum from the AKARI Archive Data

Kohji TSUMURA^{*1}, Itsuki SAKON^{*2}, Shuji MATSUURA^{*3}, Toshio MATSUMOTO^{*4,*3},
Takehiko WADA^{*3}, Jeonghyun PYO^{*5}, and Masahiro TANAKA^{*6}

E-mail: tsumura@astr.tohoku.ac.jp

概要

赤外線天文衛星「あかり」に搭載された近・中間赤外線カメラ InfraRed Camera (IRC) の分光データを用いて、波長範囲 1.8-5.3 μm ($\lambda/\Delta\lambda \sim 20$) における面輝度分光カタログを作成し公開した。赤外線面輝度の分光カタログは過去にほとんど例がなく、この規模の面輝度分光カタログは世界初である。このカタログは「あかり」のコールドミッション (液体ヘリウム枯渇前) 中に撮られた地球光コンタミを含まない全 278 点の面輝度スペクトルデータを含み、データ点は黄道座標・銀河座標によらず全天に広く分布している。面輝度に影響を及ぼす恐れのある点源 (K バンドで 19 等以下) は全て除外しているため、銀河系内の星の寄与は無視できる。また、本カタログを用いて赤外線面輝度を、黄道光 (ZL)、銀河系内拡散光 (DGL)、銀河系外背景光 (EBL) の 3 成分に分離する事に成功し、さらに各成分ごとの解析から新たな知見が得られた。本論文では、「あかり」による赤外線面輝度分光解析に特化したデータ解析手法と、赤外線面輝度の成分分離の手法について述べる。

Abstract

We constructed a spectral catalog of diffuse radiation of the sky obtained by the InfraRed Camera (IRC) onboard AKARI. There is no precedent for spectral catalogs of the infrared diffuse radiation, thus this is the first infrared spectral catalog of the diffuse radiation in the world. This catalog contains the 278 low-resolution ($\lambda/\Delta\lambda \sim 20$) near-infrared (1.8-5.3 μm) spectra of diffuse sky covering a wide range of galactic and ecliptic latitudes before the exhaustion of liquid-helium. Advanced reduction methods specialized for the slit spectroscopy of diffuse sky spectra have been developed for constructing the spectral catalog. Point sources brighter than m_K (Vega)=19 were detected on the slit and masked for deriving the diffuse spectrum, and the brightness due to unresolved Galactic stars under this detection limit is negligible. Using this

^{*1} 東北大学 学際科学フロンティア研究所 (Frontier Research Institute for Interdisciplinary Science, Tohoku University)

^{*2} 東京大学 大学院理学系研究科 (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

^{*3} 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系 (Department of Space Astronomy and Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science)

^{*4} 台湾中央院 天文及天文物理研究所 (Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica)

^{*5} 韓国天文宇宙科学研究院 (Korea Astronomy and Space Science Institute)

^{*6} 筑波大学 計算科学研究センター (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba)

catalog, the diffuse radiation was successfully separated into three components of the zodiacal light (ZL), the diffuse Galactic light (DGL), and the extragalactic background light (EBL). In this paper, the specialized reduction methods for AKARI infrared diffuse radiation, and the method of component separation of the near-infrared diffuse spectrum are described.

Key words: AKARI, Diffuse Galactic Light, Extragalactic Background Light, Infrared Astronomy, Spectral Catalog, Zodiacal Light

1. はじめに

「夜空はなぜ明るくないのか？」という問いは、オルバースのパラドックスとして有名である。この問いに対する回答は、宇宙は時間的・空間的に有限であるという現在の宇宙の理解の下に説明される。しかしそれでも尚、夜空は完全に暗い訳ではなく、淡く光っている。そのような宇宙からの面輝度として最も有名なものは、ビッグバン宇宙論の証拠ともなった宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) であるが、マイクロ波以外の波長帯でも宇宙は淡く光っている。近赤外線での空の明るさを観測した場合、その中には主に以下の3成分が含まれている。

- 黄道光 (Zodiacal Light, ZL) : 太陽系内のダスト (惑星間塵) による太陽光の散乱光 (波長 $<3.5 \mu\text{m}$) および惑星間塵からの熱放射 (波長 $>3.5 \mu\text{m}$)
- 銀河系内拡散光 (Diffuse Galactic Light, DGL) : 銀河系内のダストによる星間輻射の散乱光 (波長 $<2 \mu\text{m}$) および放射 (波長 $>2 \mu\text{m}$)
- 銀河系外背景光 (Extragalactic Background Light, EBL) : 太陽系内および銀河系内の既知の成分を観測値から差し引いても尚残る銀河系外成分の面輝度

これらの成分の観測値に占める割合は、観測された天域にもよるが、おおよそ ZL:DGL:EBL=7:1.5:1.5 程度であり、銀河面付近を除いて黄道光が観測値の大半を占める。黄道光強度は主に黄緯に依存、銀河光強度は主に銀緯に依存、背景光強度は全天ではほぼ一様に分布するという空間構造の違いを利用して、これらを観測値から成分分離する事を通して、近くの宇宙 (黄道光=太陽系) から遠くの宇宙 (背景光=銀河系外) までを、同一の観測データセットから研究する事が可能である。

近赤外線での面輝度観測は、黄道光のさらに10倍程明るい大気光の存在のため地上からの観測は非常に困難であり、大気圏外からの観測が必要である。そこで本論文では、赤外線天文衛星「あかり」(ASTRO-F)¹⁾ に搭載された近・中間赤外線カメラ (InfraRed Camera, IRC)²⁾ による赤外線面輝度分光観測について述べる。観測された赤外線面輝度を空間分布およびスペクトル構造の違いを用いて成分分離する為には、広い領域を多数観測する必要があるが、特定の領域を狙って観測する必要は無い。すなわち、別目的の科学観測データであっても、その観測が低分散分光で行われたのなら、そのデータ中に面輝度分光データも含まれているので、「あかり」のアーカイブデータの中から条件を満たすデータを選び出してまとめてデータ解析を進めることで、各データを取得した時にそれぞれ想定されていた科学目的とは異なる科学成果を引き出す事に成功した。また、この解析によって作成された広い天域にわたる面輝度分光をカタログ化し、一般公開した^a。赤外線面輝度分光には大気圏外からの観測が必須な事もあり、この規模の赤外線面輝度スペクトルカタログは世界初である。尚、本論文のより詳しい内容、特に得られた科学成果の詳細については先に出版された論文^{3, 4, 5)} も参照してもらう事とし、本論文では「あかり」アーカイブデータに特化したデータ解析により、面輝度スペクトルを成分分離する手法に焦点を絞って述べる。

^a http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/Archive/Catalogues/IRC_diffuse_spec/

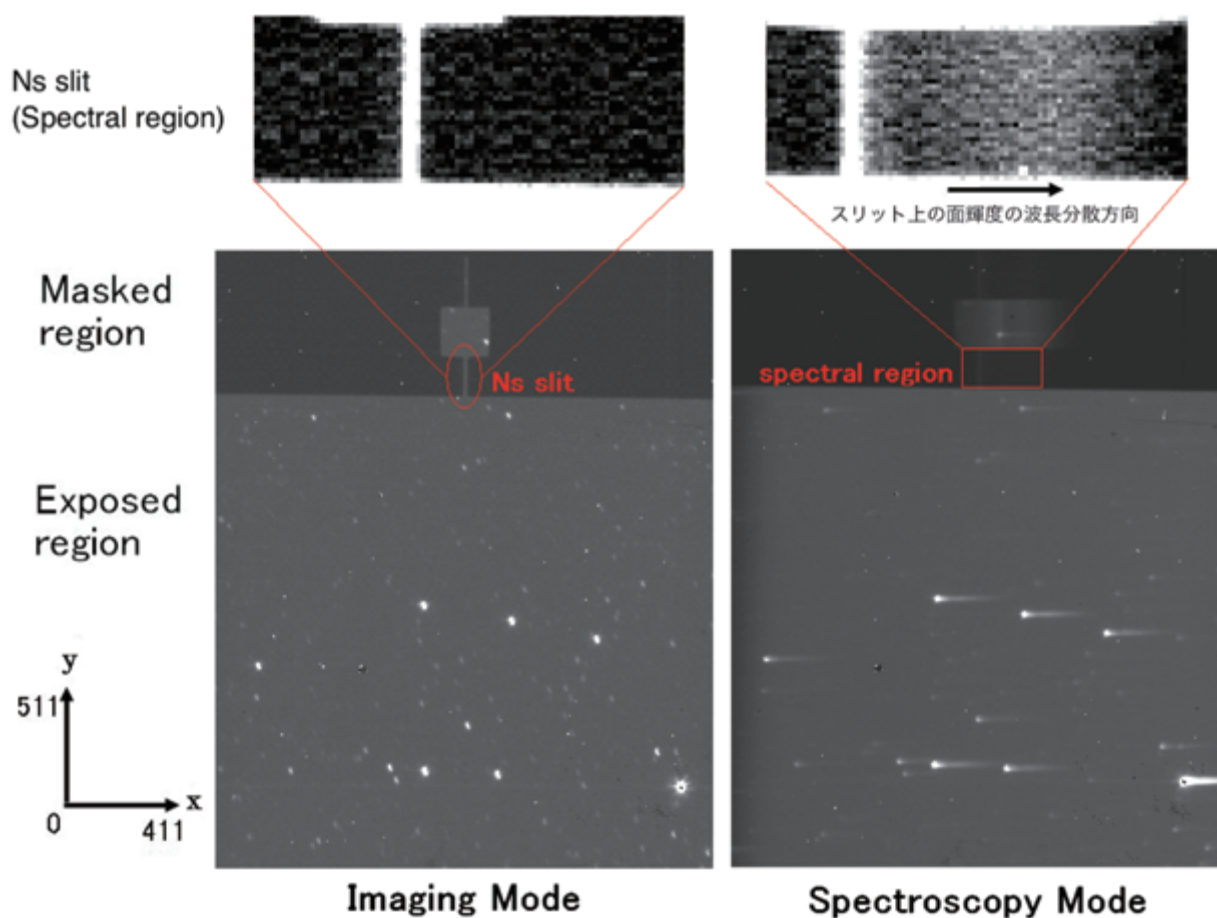


図 1: 「あかり」IRC の NIR チャンネルにおける撮像モード (左) および低分散分光モード (右) の画像の例. 分光モードでは多天体同時分光 (スリットレス分光) に加え, 画像上部に用意されたスリットを用いた拡散光の分光も可能であり, 本研究は Ns スリットでの拡散光分光データを用いた. 図の上部に Ns スリット部およびスペクトル領域の拡大図も載せた (シグナルが見やすいようにコントラストは調整してある).

2. データ処理

2.1 データセット

「あかり」は有効口径 68.5 cm の主鏡をもち, 2006 年 2 月に打ち上げられ 2011 年 11 月に運用を終了した. その内, 最初の 550 日間は液体ヘリウムにより極低温 (6 K) まで冷却されており⁶⁾, 最高性能の観測を実施した. IRC は「あかり」に搭載された近・中間赤外線観測装置であり, 撮像及び分光機能を有する. 図 1 に IRC による撮像および低分散分光画像を示す.

IRC のうち最短波長のチャンネル (NIR チャンネル) は波長 1.8-5.3 μm を 512 \times 412 ピクセルの InSb 検出器でカバーしている. IRC 内部のフィルターホイールに設置されたプリズムを挿入する事で, 撮像を低分散 ($\lambda/\Delta\lambda \sim 20$) 分光 (NP モード) に切り替える事が可能である⁷⁾. 点源の分光の場合は, 画像下部にて複数の天体をスリットレス分光, もしくは画像上部の小窓部分にターゲット天体を挿入しての分光, というのが普通である. 一方, 拡散光分光用のスリットも用意されており, 本研究では 5 秒角幅 \times 0.8 分角長 (2.8 \times 27.2 ピクセル)

の Ns スリットの部分のデータを用いた。Ns スリットを通過した光は低分散モードでは検出器上で横方向に 65 ピクセルにわたり分散される (図 1 において左側が短波長)。この 65×27 ピクセルの領域をスペクトル領域とよぶ。

「あかり」の観測データのほとんどは AKARI Catalogue Archive Server (CAS)⁸⁾ にて公開されている。本研究では、最初に以下の条件により解析に用いるデータを抽出した。

- NIR チャンネルの低分散分光データ
- 液体ヘリウム枯渇前に観測した、地球光コンタミ⁹⁾が無いデータ (2006 年 9 月から 2007 年 5 月の期間)

この条件の下、349 点のデータが抽出された。このうち、視野内の明るい点源からの迷光等で汚染されている等、科学データ解析に適さないデータを除外し、最終的に 278 点のデータを科学解析に用いる事とした。最終的に残ったデータ点の天球上の分布を示したのが図 2 である。完全にはランダムではないものの、黄道座標・銀河座標によらず広くデータ点が分布している事が分かる。

2.2 暗電流の差し引き

赤外線面輝度観測における、NASA の赤外線天文衛星 Spitzer¹¹⁾ に対する「あかり」の優位点は、コールドシャッターの存在である。面輝度の絶対値を導出する為には、観測値の零点を決めるために暗電流の差し引きが必須であり、その為にコールドシャッターを閉じての暗電流値測定が必要であるが、Spitzer はコールドシャッターが使えない¹²⁾ ため、面輝度の絶対値測定ができない。一方で「あかり」は上空でコールドシャッターを閉じての暗電流測定を毎観測ごとに行っただけではなく、検出器内の暗領域 (図 1) にて天文観測中も暗電流を常にモニターしている。暗領域とは IRC 検出器面上のマスクされた領域のことで、天文観測中においてもコールドシャッターが閉じている時と等しく暗電流を取得できる。これらのデータを用いて、新たな暗電流推定方法を開発¹³⁾ し、本研究に適用した。

ブラジル上空には南大西洋異常帯 (South Atlantic Anomaly, SAA) と呼ばれる放射線が非常に強くなる領域が存在する事が知られている。「あかり」がこの SAA を通過すると、放射線ヒット率の増加に伴い、暗電流が増加する。従来の暗電流推定法では、100 枚のダークフレームを足し合わせたスーパーダークフレームを事前に用意しておき、それを SAA 通過に伴う暗電流増加に応じた係数をかけて差し引いていたが、それでは検出器内の非一様な暗電流の増加に対応できておらず、不十分であった。

そこで、「あかり」IRC の NIR チャンネルにおける、液体ヘリウム枯渇前にコールドシャッターを閉じて得られた全プレダークフレーム^{c)} (約 4500 枚) を解析した。この約 4500 枚のダークフレームを用いて、暗領域内での暗電流の平均値 (C) と各ピクセル (i, j) の暗電流値 (D_{ij}) の関係を全ピクセルに対して調べた所、両者に強い相関があることを発見した (図 3)。

$$D_{ij} = A_{ij} \cdot C + B_{ij} \quad (1)$$

この相関を用いれば、暗領域内での暗電流の平均値から、全てのピクセルの暗電流値を推定できる。そして、暗領域内での暗電流は、コールドシャッターを閉じたダークフレームのみでなく、天文観測中でも常にモニターしている為、あらゆる天文データに対して、この相関関係から、コールドシャッターを閉じた場合に相当するダークフレームを推定する事ができる。しかもこの新手法による暗電流の推定には、約 4500 枚という大量の

^{b)} 北半球の夏において、地球光が「あかり」のバッフルに散乱されて光路中に迷光として入ってしまう季節がある。

^{c)} リセットアノマリーの影響を避ける為、各観測前後に取得されたダークフレームの内、観測前に取得されたダークフレーム (プレダークフレーム) のみを本解析で用いた。

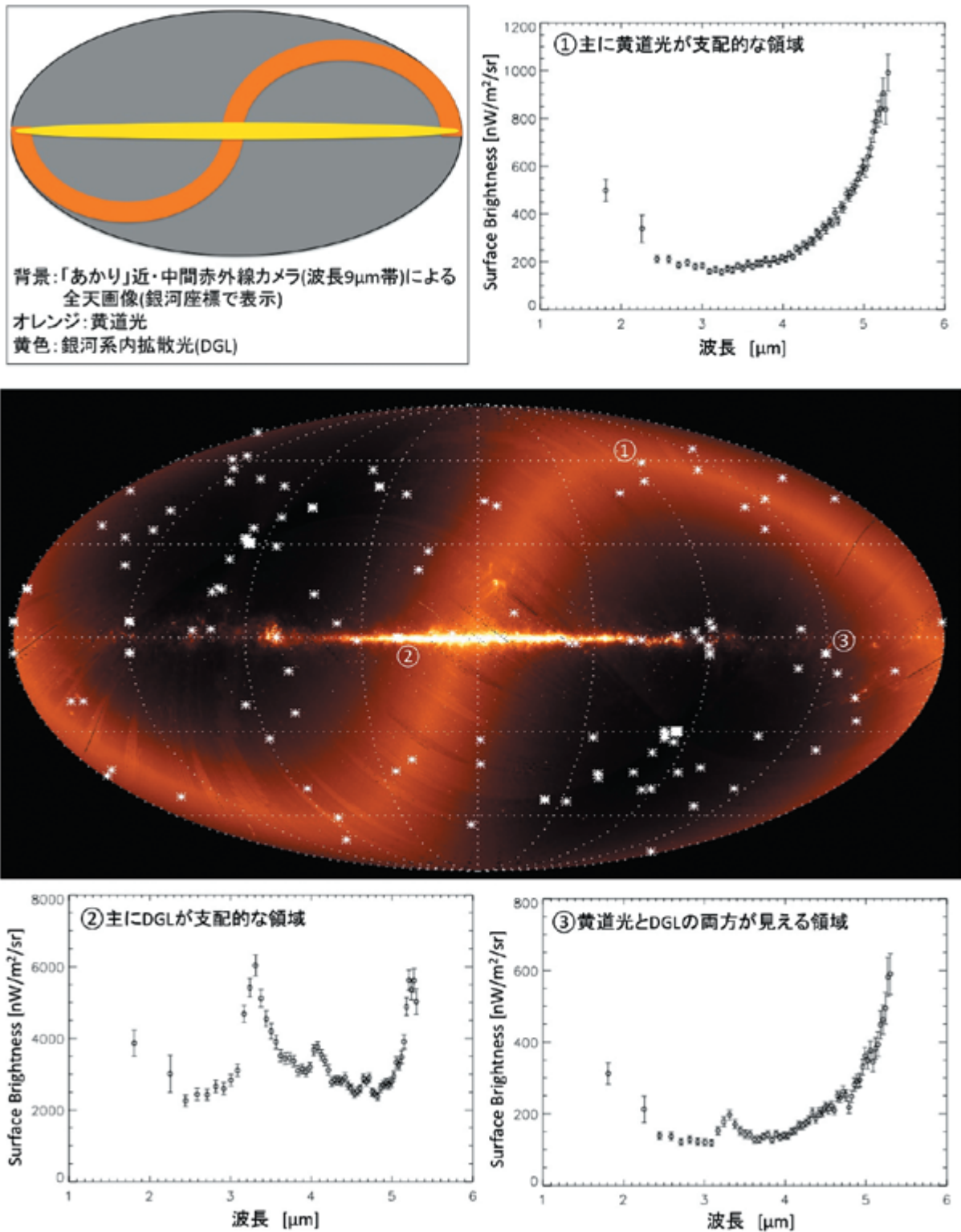


図 2: (中央) 「あかり」全天画像¹⁰⁾(波長 9 μm 帯)^d 上に、今回の解析に用いた 278 カ所の観測地点を示す。全天画像は、観測したままの空の明るさを反映している。図の中央に左右に広がるのが銀河面(天の川)で、それに対して大きくカーブして見える光の帯が黄道光である。(右上、左下、右下) 数字で示した地点の「あかり」近赤外線スペクトル。場所により、黄道光が主成分となっている領域、DGL が主成分となっている領域、両者の成分が見えている領域がある。

^d 「あかり」波長 9 μm 帯全天画像は、名古屋大学が中心となって作成を進めており、2016 年春までに公開の予定である。今回使用したのは、黄道光を含むデータ処理の中間過程の画像である。

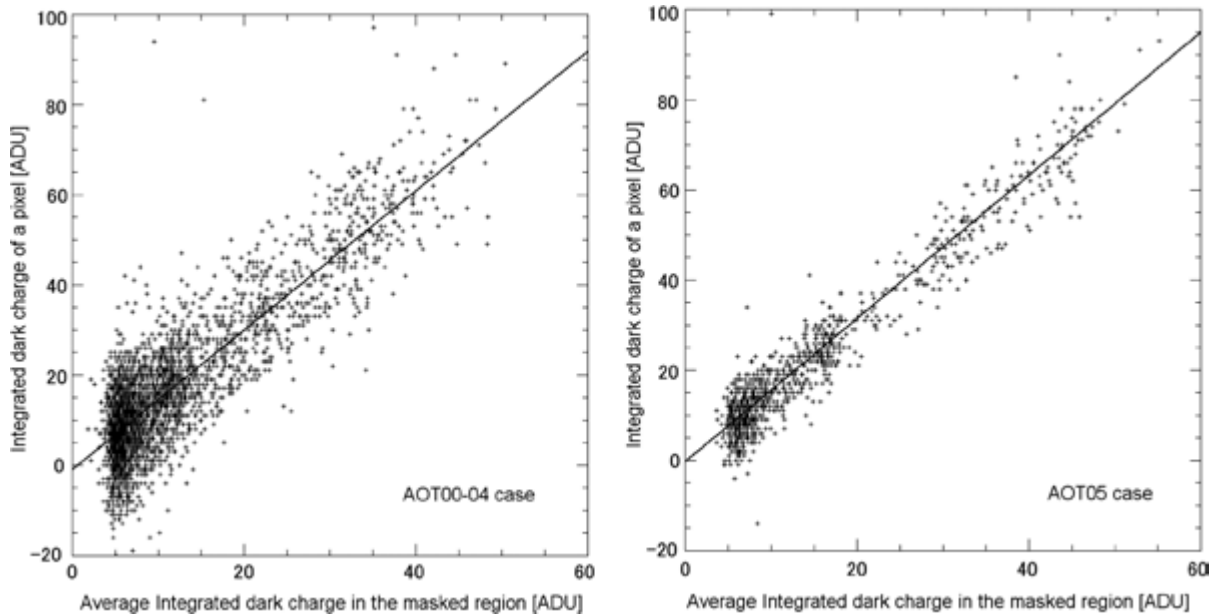


図 3: コールドシャッターを閉じて取得したダークフレーム 4500 枚における, 暗領域内の暗電流の平均値と, あるピクセル $(i,j)=(301,200)$ における暗電流値の相関の例¹³⁾. この相関の傾きが A_{ij} , y 切片が B_{ij} となる. 左右の図は異なる観測モード (Astronomical Observation Template, AOT²⁾) の結果を示している.

ダークフレームを用いていることから, この手法による暗電流差し引きの不定性は 1 ADU 程度 (IRC の N2 バンドで $3 \text{ nWm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ 相当) で, 従来の手法と比べ 5 倍以上良い¹³⁾.

この手法の肝は, 焦点面上に暗領域を用意した事で, 暗電流を常にモニターできる設計となっていた点である. この手法は焦点面上に暗領域さえあれば, 天文衛星に限らず, SAA を通過する軌道の地球観測衛星等にも応用可能である.

2.3 点源のマスク

データによってはスリット上に点源が存在する可能性があるが, 本研究では面輝度スペクトルに興味がある為, このような点源はマスクする. 「あかり」のデータセットには, 観測モード (Astronomical Observation Template, AOT²⁾) によって複数のスペクトル画像が格納されているが, 衛星の姿勢安定性の問題から, スリット上の点源の位置もこれらの画像間で微妙に異なる (図 4). そこで, 各画像上で点源の位置を検出しマスクした. 点源検出は最も高い S/N で点源検出できる波長 $2 \mu\text{m}$ 付近で行い, ベガ等級で $m_K = 19$ までの点源を検出し, その点源を全波長に対してマスクした (図 4). これより暗い銀河系内の星からの面輝度に対する寄与は TRILEGAL モデル¹⁴⁾ によって評価し, 無視できる事を確認した. また, これより暗い銀河からの面輝度に対する寄与は, ディープサーベイ¹⁵⁾ の結果から K バンドで $<4 \text{ nWm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ と推定される.

また, 星マスクと同時にホットピクセルもマスクした. まず, 最もシグナルが強い波長 $2 \mu\text{m}$ 付近のシグナルより 1.5 倍以上大きな値を持つピクセルを, 明らかなホットピクセルとしてマスクする. その後, 各波長ごとに対応するピクセルを 3σ クリッピングの後に平均した. この操作により, 弱いホットピクセルも取り除いた上で, スペクトル画像から 1 次元のスペクトルを導出した.

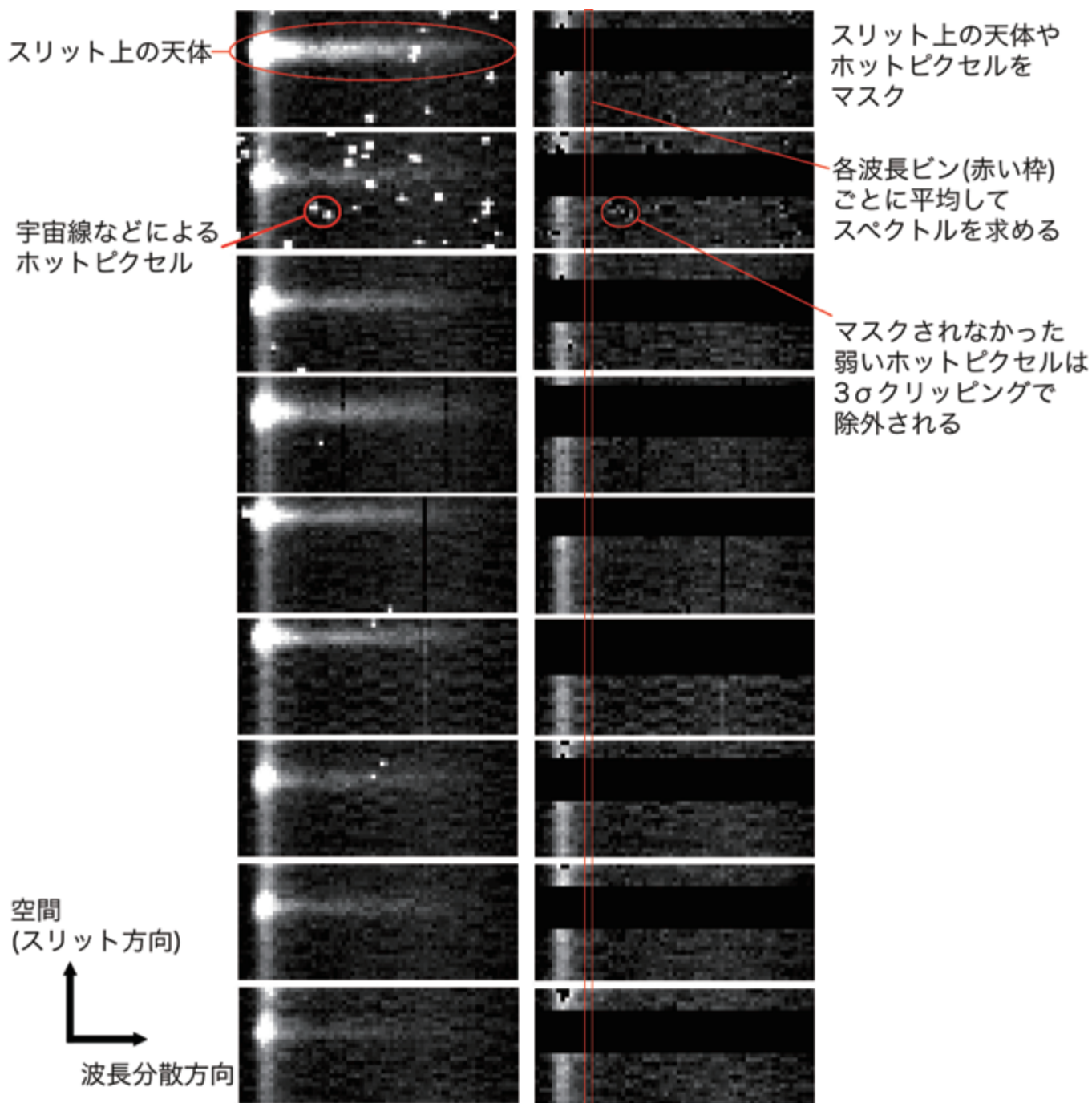


図 4: スペクトル領域におけるマスクングの例. これらの図は同一天域を連続してデータ取得したときの例であり、点源の位置がわずかにずれているのは衛星の姿勢安定性によるものである。左図の各生画像に存在する点源が、右図ではホットピクセルと共にマスクされている。この後、各波長ビンごとにピクセルを 3σ クリッピングの後に平均を求め、1次元スペクトルを得た。

2.4 フラックスキャリブレーション

この段階で得られた1次元スペクトルは、検出器の出力単位であるADUで出力されている。これをスペクトルが既知の標準天体と比較する事で、物理的な単位に焼き直す必要がある。本研究では標準天体として、KF09T1というK0III型星($m_H = 8.11$ mag)を用いた。この天体のスペクトルは3%の精度で与えられており、Spitzer/IRACの標準光源としても利用されている天体である¹⁶⁾。

フラックスキャリブレーションの精度を決めているのは標準天体の位置決定精度である。標準天体は撮像領域でのスリットレス分光によりスペクトルデータが得られているが、その位置をサブピクセル精度で決める事は不可能であり、その位置不定性起因の波長不定性が最終的なフラックスキャリブレーション精度を決める要因となり、特にその不定性はプリズムによる分散が小さい(1ピクセルあたりの $\Delta\lambda$ が大きい)最短波長(<2 μm)で顕著である。そこで、標準天体の位置決定精度を ± 0.5 ピクセルとして、それに起因するエラーをキャリブレーションエラーに加えた。さらに、最短波長では分散が小さいため星のエネルギーが密集しシグナルが強い為、PSFの裾野の影響も大きい。そこで、撮像における最短波長フィルターであるN2フィルター(波長2.4 μm 帯)での撮像データにおけるPSFを、分光データの最短波長に適応する解析手法を採用した。これらの処理を経た最終的なフラックスキャリブレーションによる系統誤差を図5に示す。

2.5 過去のデータとの比較

以上の処理を全データに対して適応し、各天域における面輝度スペクトルを導出し、カタログ化した。これらのカタログ化されたスペクトルの妥当性を確認する為、以下の2種類の独立した観測データと比較した。

最初は、日本初の宇宙赤外線望遠鏡 Infrared Telescope in Space (IRTS)¹⁷⁾による波長1.4-4.0 μm での面輝度分光データ¹⁸⁾との比較である。「あかり」とIRTSでほぼ同じ天域で面輝度分光観測を行ったデータが数点存在する。そこで、波長2.2 μm における黄道光の季節変化を後述の黄道光モデル¹⁹⁾で計算して補正した後と比較し、互いに誤差の範囲でスペクトルが一致している事を確認した(図6)。

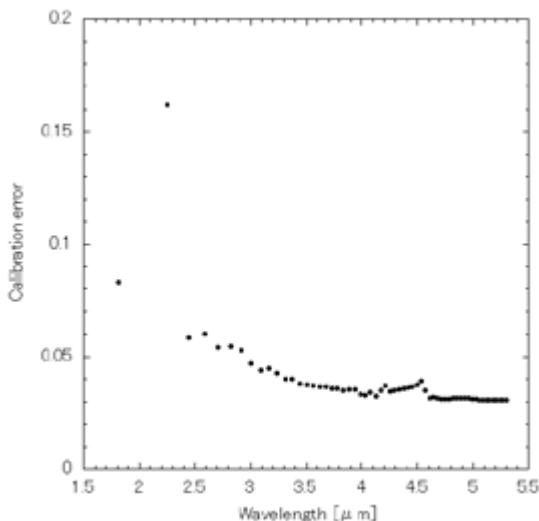


図5: フラックスキャリブレーションの最終的な系統誤差³⁾。波長2 μm 付近では波長分散が粗くなるため、位置決め誤差による波長決定誤差が、フラックス誤差に混入している。

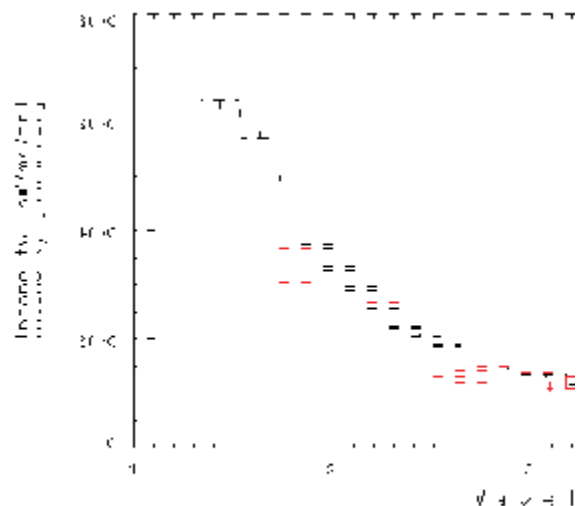


図6: 「あかり」(赤)とIRTS(黒)の面輝度スペクトルの比較の例³⁾。黄道座標で $(\lambda, \beta) = (130^\circ, 20^\circ)$ の天域を、1995年4月にIRTSが観測したデータ¹⁸⁾と、2006年12月に「あかり」が観測したデータを、黄道光の季節変化の補正をした後に比較している。

もう一つは、北黄極領域で同時期に同じ IRC で観測された撮像データ¹⁷⁾ との比較である。この撮像データは、N2 フィルター (波長 2.4 μm 帯), N3 フィルター (波長 3.2 μm 帯), N4 フィルター (波長 4.1 μm 帯) に限られるが、深い撮像観測のため前景のより暗い点源まで取り除いた上で面輝度を導出できている。この結果とも互いに誤差の範囲で輝度が一致している事を確認した。

3. 赤外線面輝度スペクトルの成分分離

3.1 黄道光 (ZL)

作成された面輝度スペクトルは、以下の 3 成分が含まれている。

$$SKY_i(\lambda) = ZL_i(\lambda) + DGL_i(\lambda) + EBL_i(\lambda) \quad (2)$$

ここで i は、作成した 278 点の面輝度スペクトルを区別するデータ番号である。まずは主成分である黄道光について解析し、黄道光を成分分離する手法を確立した³⁾。この解析においては、事前に後述の手法で DGL の差し引きをした上で解析を進めた。波長 3.3 μm の多環芳香族炭化水素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH) バンドは高銀緯・低黄緯の領域では検出されなかった為、黄道光スペクトル内に PAH バンドは無いといえる。

黄道光は季節および場所によって輝度に変化する。最初に季節変化を探る為に、北黄極領域を異なる季節で観測した面輝度スペクトルデータを比較した (図 7)。この図から、黄道光のスペクトルは、同じ天域での季節変化においては、スペクトルの形状は変化せず、全体的な輝度だけが変化する事が分かる。一方で、黄道面 (黄道光が最大) と北黄極領域 (黄道光が最小) での面輝度スペクトルデータを比較したのが図 8 である。図 8 (右) を見ると、両者のスペクトルの比は波長 3.5 μm を境に段差になっており、その両側では平坦となっている事が見て取れる。これは、黄道光の散乱光成分 (波長 < 3.5 μm) と熱放射成分 (波長 > 3.5 μm) それぞれのスペクトルの形状は場所によって変化しないが、天域によって両者の比は変化していると理解できる。従って、黄道光のスペクトルを成分分離する場合は、この 2 成分に分けて考える必要がある。

黄道光のスペクトル形状のみを抽出する為、まずは黄道面と北黄極領域の差分スペクトルを求めた。これにより両者に共通する背景放射のスペクトルはキャンセルされる。その差分スペクトルを、散乱光成分 (5800 K) と熱放射成分 (300 K) に分離した (図 9)。これらを黄道光のプレートスペクトルとして利用する。黄道光の輝度は、NASA の背景放射観測衛星 Cosmic Background Explorer (COBE) に搭載された Diffuse Infrared Background Experiment (DIRBE) の観測に基づく黄道光モデル¹⁹⁾ の値に準拠した。この DIRBE 黄道光モデルは、任意の日時と座標を入力すると、波長 1.25 μm から波長 240 μm までの 10 バンドの黄道光の値が出力される。手元の面輝度スペクトルカタログの全データに対しこの DIRBE 黄道光モデルの値を計算し、波長 2.2 μm のモデル値に対して散乱光成分を、波長 4.9 μm のモデル値に対して熱放射成分を以下の式で合わせる事で、各データに対する黄道光スペクトルを導出した。

$$ZL_i(\lambda) = ZL_i^{\text{scat}}(\lambda) + ZL_i^{\text{thermal}}(\lambda) \quad (3)$$

$$ZL_i^{\text{scat}}(\lambda) = \text{DIRBE}_i^{2.2\mu\text{m}} \cdot ZL_{\text{temp}}^{\text{scat}}(\lambda) \quad (4)$$

$$ZL_i^{\text{thermal}}(\lambda) = [\text{DIRBE}_i^{4.9\mu\text{m}} - ZL_i^{\text{scat}}(4.9\mu\text{m})] \cdot ZL_{\text{temp}}^{\text{thermal}}(\lambda) \quad (5)$$

得られた黄道光スペクトルの波長 3.5 μm での値は、波長 3.5 μm でのモデル値とよく一致している事も確認した。図 10 は、この手法によって得られた黄道光スペクトルを、過去に大気圏外から得られた黄道光スペクトル 18, 21, 22, 23, 24) と比較したもので、本手法による黄道光スペクトルは過去の観測結果とよく一致している事が確認された。これにより、DIRBE 黄道光モデル¹⁹⁾ を援用する事で、任意の時刻・天域において波長 1.8-5.3 μm での黄道光スペクトルを求められるようになった。

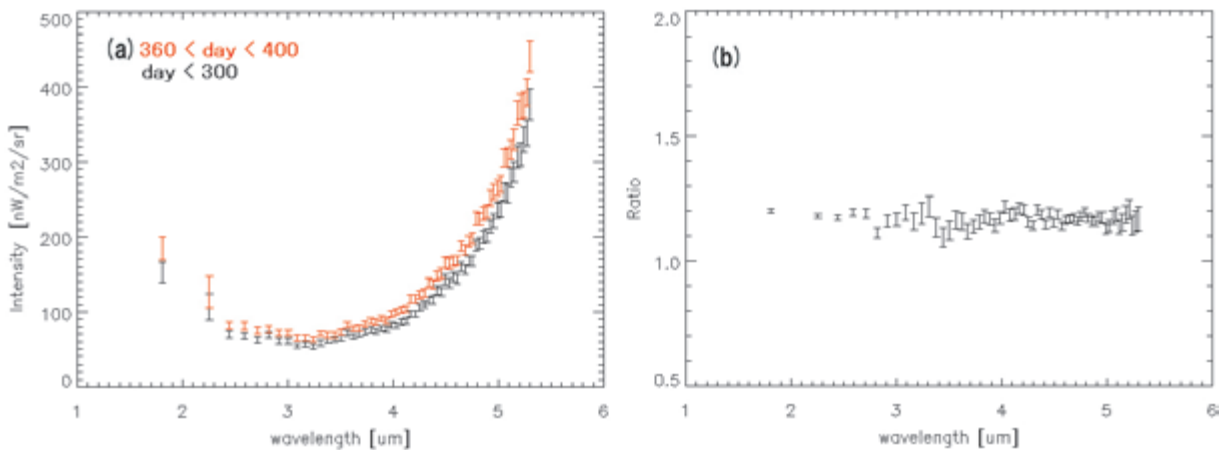


図 7: 北黄極領域での面輝度スペクトル (黄道光が支配的) の季節変化³⁾. (左) 2006 年 1 月 1 日から起算した場合の, 250-300 日目 (黒) と 360-400 日目 (赤) の面輝度スペクトル平均値の比較. エラーバーは統計誤差と系統誤差の両者を含んでいる. (右) 2つのスペクトルの比. 波長依存せず全体的に輝度が変化している事が分かる. キャリブレーション起因の系統誤差はキャンセルされる為, エラーバーは統計誤差のみ含んでいる.

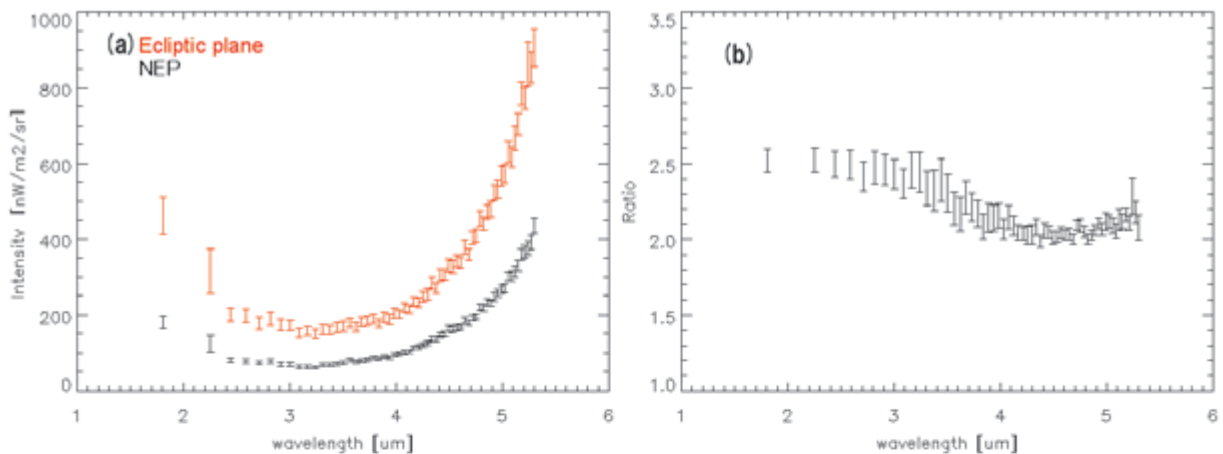


図 8: 面輝度スペクトル (黄道光が支配的) の黄緯依存性³⁾. (左) 黄道面 (赤) と北黄極領域 (黒) の面輝度スペクトルの比較. (右) 2つのスペクトルの比. 散乱光成分と熱放射成分の境界である波長 3.5 μm 付近に明らかな段差が見える. エラーバーについては図 7 と同様.

3.2 銀河系内拡散光 (DGL)

DGL と星間ダストからの熱放射との相関関係を用いて, 一般の星間空間における DGL の成分分離に世界で初めて成功した⁴⁾. まず, DGL が最大となる波長 3.3 μm 帯 PAH バンドの輝度 ($E_{3.3}$) を抽出し, 銀河系内の星間ダストからの波長 100 μm 帯での熱放射 (SFD マップ)²⁵⁾ および中性水素の柱密度²⁶⁾ との相関を調べた (図 11). この結果から, DGL は中性水素の柱密度よりも波長 100 μm 帯での熱放射との方が相関が強く, 波長 100 μm 帯での熱放射が極めて強い銀河面を除いて, 良い線形相関がある事が確認された. 波長 100 μm 帯での熱放射が中性水素の柱密度よりも相関が良い理由は, 中性水素のデータの方が空間分解能が悪い為である.

次に, この DGL と波長 100 μm 帯での熱放射 ($\lambda I_i^{100\mu\text{m}}$) との良い線形相関関係を用いて, DGL のスペクトルを抽出した. 3.1 節で求めた黄道光を差し引くと, 空間相関するのは DGL だけとなる為, 以下のように書ける.

$$SKY_i(\lambda) - ZL_i(\lambda) = a(\lambda) \cdot \lambda I_i^{100\mu\text{m}} + EBL_i(\lambda) \quad (6)$$

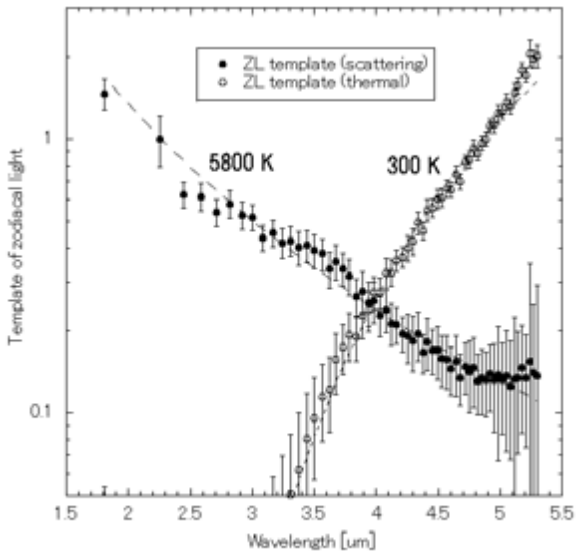


図 9: 黄道光の散乱光成分 (5800 K) と熱放射成分 (300 K) のテンプレートスペクトル³⁾. 波長 2.2 μm および 4.9 μm で規格化してある.

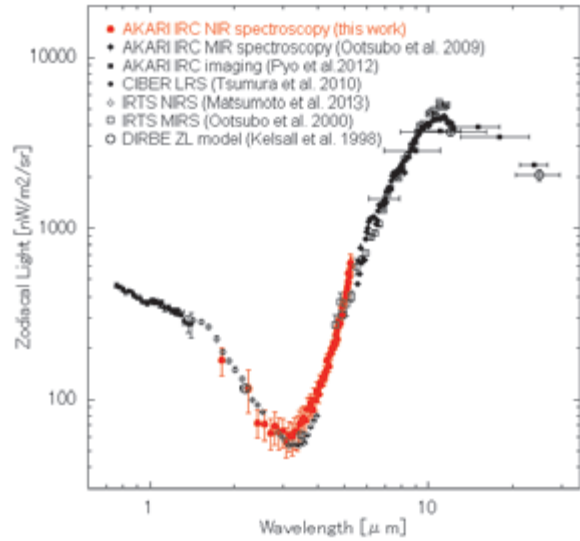


図 10: 高銀緯・高黄緯領域での、今までに大気圏外から取得された黄道光スペクトル³⁾. 全てのデータは DIRBE 黄道光モデル¹⁹⁾ に対して合わせている.

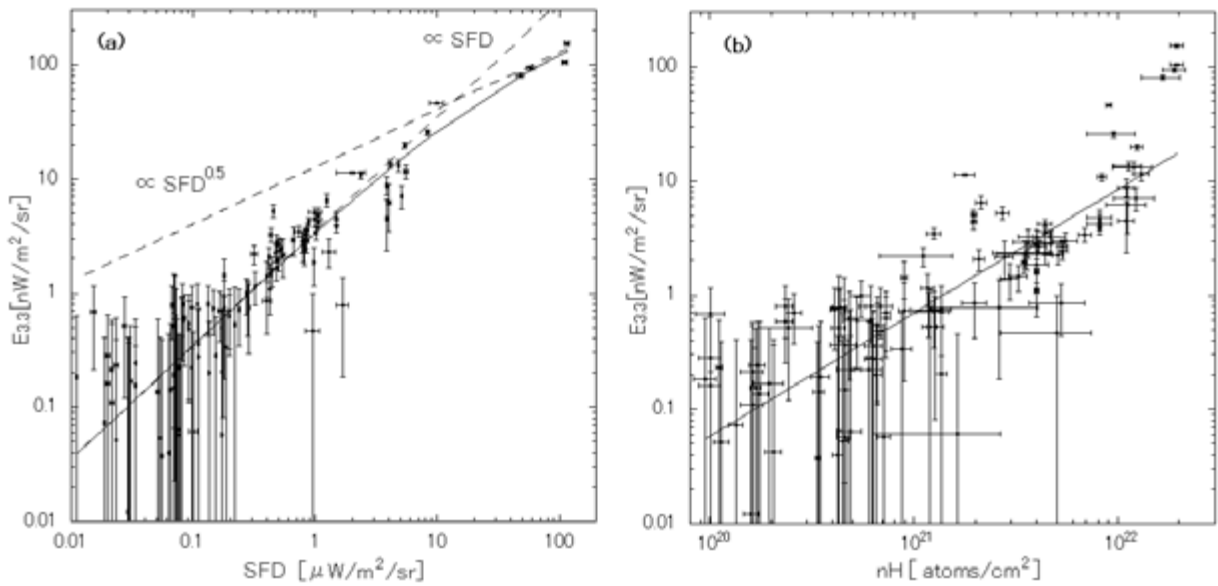


図 11: 面輝度スペクトル内の波長 3.3 μm 帯 PAH バンドの輝度 ($E_{3.3}$) と、星間ダストからの波長 100 μm 帯での熱放射 (左) および中性水素の柱密度 (右) との相関⁴⁾. 銀河面付近の高密度領域を除き、良い線形相関が見られる.

そこで、DGL と波長 $100 \mu\text{m}$ 帯での熱放射との線形相関を用いるため、 $\lambda I_{100\mu\text{m}} < 3 \mu\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ (銀緯で $|b| > 5^\circ$ に相当) のみのデータを用いて、各波長ごとにその相関を調べた。図 12 がその相関を示しており、各波長での傾き $a(\lambda)$ が、主に $5^\circ < |b| < 15^\circ$ での DGL のスペクトル形状となる。この相関解析による DGL 抽出の誤差は、波長 $< 3.8 \mu\text{m}$ で 5%、波長 $3.8 \mu\text{m}$ から $4.2 \mu\text{m}$ で 15%、波長 $> 4.2 \mu\text{m}$ で 20% であった。この DGL スペクトル形状 $a(\lambda)$ が天域によらず一定と仮定する事で、DGL のスペクトルは以下のように書ける。

$$DGL_i = a(\lambda) \cdot \lambda I_i^{100\mu\text{m}} \quad (7)$$

これにより、波長 $100 \mu\text{m}$ 帯での星間ダストからの放射マップ²⁵⁾を援用する事で、任意の天域において波長 $1.8\text{--}5.3 \mu\text{m}$ での DGL スペクトルを求められるようになった。得られた DGL スペクトルを図 13 に示す。本研究により得られた DGL スペクトルは、過去の DGL スペクトルの推定値^{27, 28)}より低い値になっているが、以下の理由により本研究の DGL 推定の方が正しい。過去の推定は波長 $100 \mu\text{m}$ 帯での熱放射よりも相関が悪い中性水素の柱密度を用いており、しかも数点の高密度領域 ($\text{HI} \sim 2 \times 10^{22} \text{ atoms/cm}^2$) に依存している。しかし、図 11 (右) から明らかなように、中性水素の高密度領域 ($\text{HI} > 10^{22} \text{ atoms/cm}^2$) においては系統的に DGL との相関からずれており、これが原因で過去の推定では DGL を大きく見積もっていた。

尚、実際の解析においては、3.1 節での黄道光の成分分離と本節での DGL の成分分離を反復し、両者の収束解を求めている。

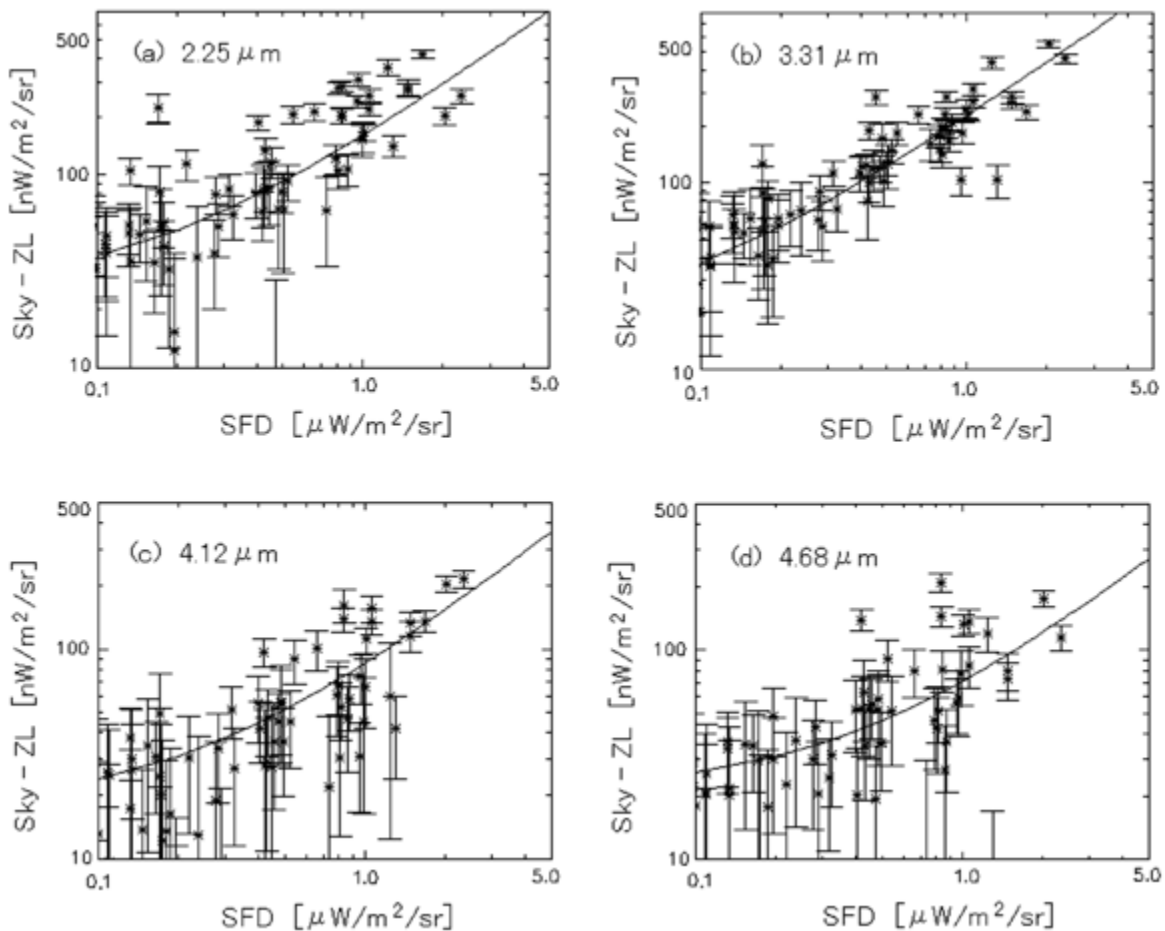


図 12: いくつかの波長における、 $SKY_i(\lambda) - ZL_i(\lambda)$ と波長 $100 \mu\text{m}$ での熱放射 ($\lambda I^{100\mu\text{m}}$) との相関。

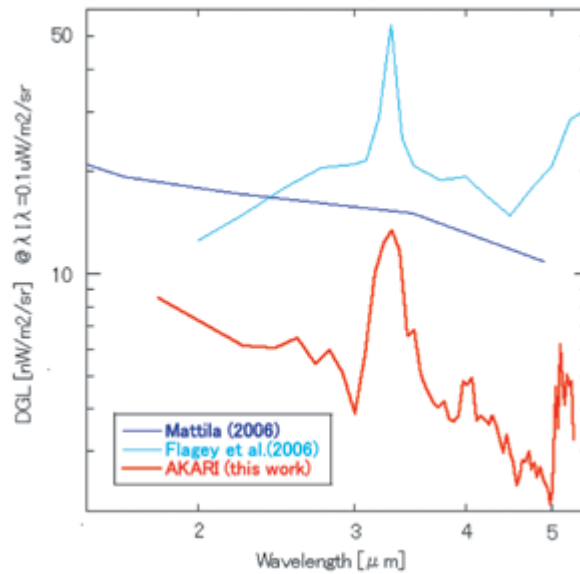


図 13: $\lambda I^{100\mu m} = 0.1 \mu W m^{-2} sr^{-1}$ ($HI = 5 \times 10^{20}$ atoms/cm² に相当) でスケーリングした DGL のスペクトル⁴⁾.

3.3 銀河系外背景光 (EBL)

前節までで成分分離された前景光 (ZL および DGL) を差し引く事で、一様な EBL を抽出した⁵⁾. 下記のように、各波長ごとに 3.2 節で求めた DGL の観測値を差し引き、これと 3.1 節で求めた黄道光との相関を取った.

$$SKY_i(\lambda) - DGL_i(\lambda) = C(\lambda) \cdot ZL_i(\lambda) + EBL(\lambda) \quad (8)$$

この相関関係を示したのが図 14 である. この図において、傾き $C(\lambda)$ が黄道光の補正項でほぼ 1 の値を取り (誤差約 5%), y 切片がここで求めたい背景放射 $EBL(\lambda)$ を表している. 誤差としては、黄道光や DGL の推定に伴う不定性と、キャリブレーションに起因する不定性とが支配的である. これらを考慮した最終的な EBL の決定精度は、波長にもよるが約 30% 程度である.

図 15 に、この手法で求められた EBL のスペクトルを、過去に求められた EBL^{18, 29, 30, 31)} および既知の銀河の積算値^{15, 32, 33, 34, 35)} とともに示す. 波長 $< 4 \mu m$ では有意な EBL を検出できており、過去の観測同様、既知の銀河の積算値からの超過も確認された. 得られた EBL は黄道座標・銀河座標ともに依存しておらず、空間的に一様だということも確認した. ただし注意しなければならない点として、本研究を含む過去の EBL の測定はほぼ全て、最大の前景光である黄道光の輝度はモデルに依存しているという点である. もし DIRBE 黄道光モデル¹⁹⁾ では表現されていないような黄道光の一様成分が存在した場合、そのような成分は本手法では一様な EBL に含まれてしまっているという点に注意が必要である.

このように観測的に EBL を求める事は、点源として検出できない遠方もしくは暗い天体からの寄与が宇宙進化にどのような影響を与えたかを探る上で重要である. 特に本研究で検出された EBL 超過を説明する為には、初期宇宙での大規模な初代星形成^{36, 37, 38, 39, 40, 41)} や、銀河周囲に広がった intrahalo light による寄与⁴²⁾ など未知の光源を考える必要がある、それらの宇宙進化に与える影響を定量的に見積もる為にも、本研究により EBL のスペクトルを観測的に決めた事には大きな意義がある.

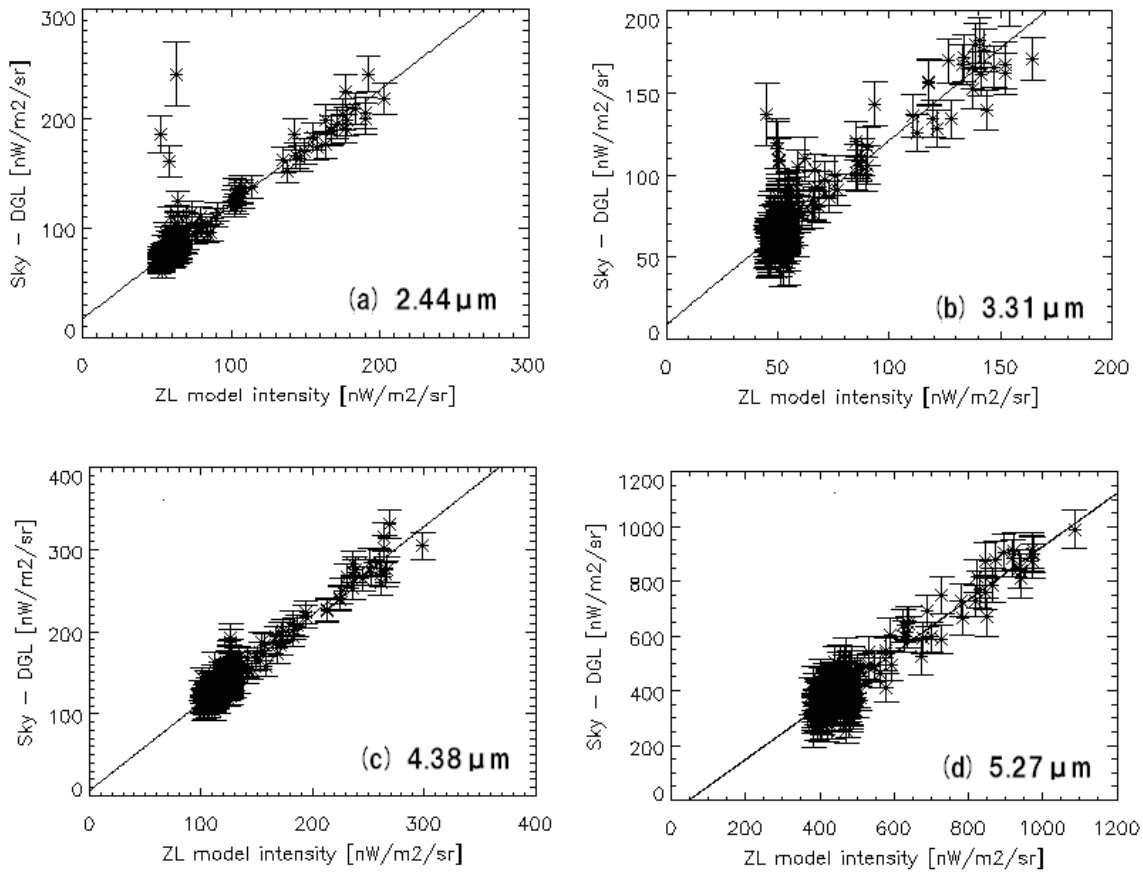


図 14: いくつかの波長における, $SKY_i(\lambda) - DGL_i(\lambda)$ と黄道光 ($ZL_i(\lambda)$) との相関⁵⁾. y 切片が一般的な背景放射 $EBL(\lambda)$ を表している.

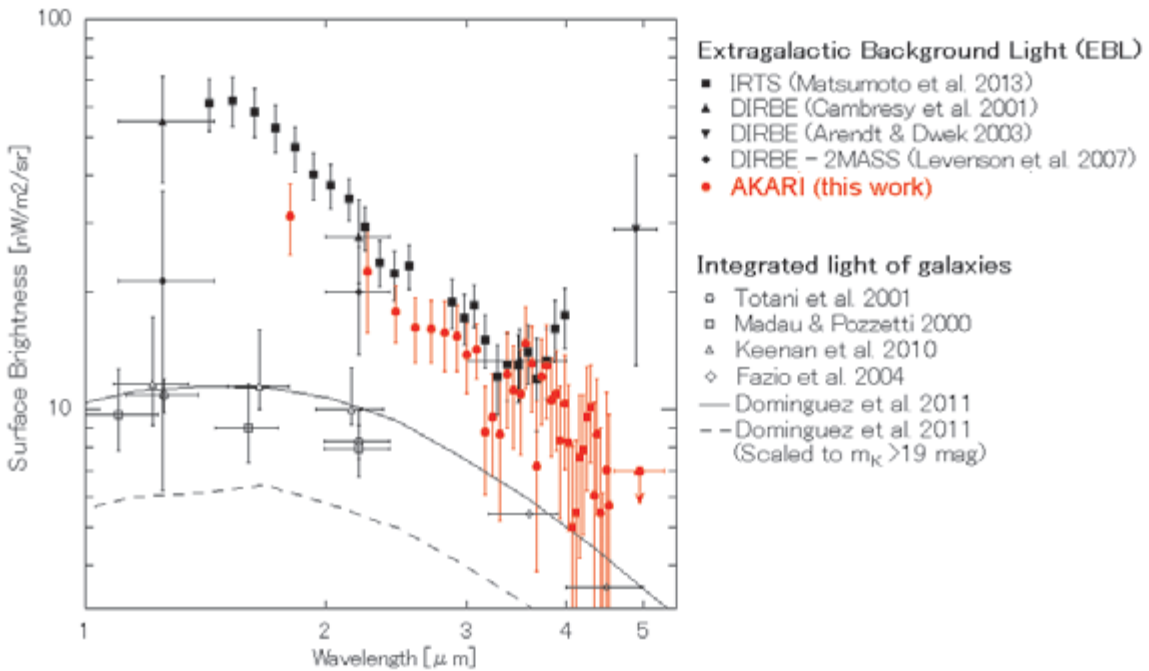


図 15: EBL および銀河の積算のスペクトル⁵⁾. 赤のデータ点が本研究で求められた EBL のスペクトル, 黒のデータ点が過去の IRTS および DIRBE による EBL で, 白抜きデータ点が既知の銀河の積算値を示している. 本研究により求めた EBL が, K バンドで 19 等より暗い銀河の積算値 (点線) から超過している事が確認できる.

4. まとめ

赤外線天文衛星「あかり」搭載の近・中間赤外線カメラ InfraRed Camera(IRC) によるアーカイブデータを用いて、波長 1.8-5.3 μm での面輝度スペクトルカタログを作成し公開した。このデータを用いて、任意の時刻・天域における黄道光および DGL のスペクトルを求める手法を開発した。この手法により、観測された空のスペクトルから前景の黄道光および DGL を成分分離する事に成功し、一様な EBL スペクトルを導出する事ができた。

謝辞

本研究は赤外線天文衛星「あかり」による観測データを用いた成果である。「あかり」は、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) が欧州宇宙機関 (European Space Agency, ESA) との協力の下に実現させたプロジェクトである。本研究の実現にあたり、「あかり」IRC チームの皆様からの協力を頂いた。また、白井文彦氏 (東京大学) および山村一誠氏 (ISAS/JAXA) にはデータ公開についてお世話になった。これらの皆様にお礼を申し上げます。本研究は文部科学省および日本学術振興会の科学研究費補助金 (21111004, 24111717, 26800112) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Murakami, M., et al. 2007, PASJ, 59, S369
- 2) Onaka, T., et al. 2007, PASJ, 59, S401
- 3) Tsumura, K., Matsumoto, T., Matsuura, S., Pyo, J., Sakon, I., & Wada, T. 2013, PASJ, 65, 119
- 4) Tsumura, K., Matsumoto, T., Matsuura, S., Sakon, I., Tanaka, M., & Wada, T. 2013, PASJ, 65, 120
- 5) Tsumura, K., Matsumoto, T., Matsuura, S., Sakon, I., & Wada, T. 2013, PASJ, 65, 121
- 6) Nakagawa, T., et al. 2007, PASJ, 59, S377
- 7) Ohyama, Y., et al. 2007, PASJ, 59, S411
- 8) Yamauchi, C., et al. 2011, PASP, 123, 852
- 9) Pyo, J., et al. 2010, A&A, 523, A53
- 10) 石原他, 2012, 宇宙科学情報解析論文誌, 2, 39
- 11) Werner, M. W., et al. 2004, ApJS, 154, 1
- 12) Fazio, G. G., et al. 2004a, ApJS, 154, 10
- 13) Tsumura, K. & Wada, T. 2011, PASJ, 63, 755

- 14) Girardi, L., Groenewegen, M. A. T., Hatziminaoglou, E., & da Costa, L. 2005, *A&A*, 436, 895
- 15) Keenen, R. C., Barger, A. J., Cowie, L. L., & Wang, W. -H. 2010, *ApJ*, 723, 40
- 16) Reach, W. T., et al. 2005, *PASP*, 117, 978
- 17) Murakami, M., et al. 1996, *PASJ*, 48, L41
- 18) Matsumoto T., et al. 2005, *ApJ*, 626, 31
- 19) Kelsall, J. L, et al. 1998, *ApJ*, 508, 44
- 20) Matsumoto, T., et al. 2011, *ApJ*, 742, 124
- 21) Ootsubo, T., et al. 2009, in *ASP Conf. Ser.*, 418, *AKARI, a Light to Illuminate the Misty Universe*, ed. T. Onaka, G. J. White, T. Nakagawa, & I. Yamamura (San Francisco, CA: ASP), 395
- 22) Pyo, J., Matsumoto, T., Jeong, W. S., & Matsuura, S., 2012, *ApJ*, 760, 102
- 23) Tsumura, K., et al. 2010, *ApJ*, 719, 394
- 24) Ootsubo, T., et al. 2000, *Adv. Space Res.*, 25, 2163
- 25) Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525
- 26) Kalberla, P. M. W., et al. 2005, *A&A*, 440, 775
- 27) Mattila, K. 2006, *MNRAS*, 372, 1253
- 28) Flagey, N., et al. 2006, *A&A*, 453, 969
- 29) Cambresy, L., Reach, W. T., Beichman, C. A., & Jarrett, T. H. 2001 *ApJ*, 555, 563
- 30) Arendt, R. G. & Dwek, E. 2003, *ApJ*, 585, 305
- 31) Levenson, L. R., & Wright, E. L. 2007, *ApJ*, 666, 34
- 32) Totani, T., Yoshii, Y., Iwamuro, F., Maihara, T., & Motohara, K. 2001, *ApJ*, 550, L137
- 33) Madau, P., & Pozzetti, L. 2000, *MNRAS*, 312, L9
- 34) Fazio, G. G., et al. 2004b, *ApJS*, 154, 39
- 35) Domínguez, A., et al. 2011, *MNRAS*, 410, 2556
- 36) Santos, M. R., Bromm, V., & Kamionkowski, M. 2002, *MNRAS*, 336, 1082
- 37) Salvaterra, R. & Ferrara, A. 2003, *MNRAS*, 339, 973
- 38) Cooray, A., & Yoshida, M. 2004, *MNRAS*, 351, L71
- 39) Dwek, E., Arendt, R. G. & Krennrich, F. 2005, *ApJ*, 635, 784
- 40) Madau, A., & Silk, J. 2005, *MNRAS*, 359, L37
- 41) Fernandez, E. R., & Komatsu, E. 2006, *ApJ*, 646, 703
- 42) Cooray, A., et al. 2012, *Nature*, 490, 514