

The two-dimensional power spectrum analysis of far-infrared galaxies detected by AKARI

鈴木 智子 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

銀河の持つ多様な形態・性質は、銀河の存在している環境に大きく影響を受けている。そのため、銀河の存在している環境、つまり銀河がどのような空間分布をしているのかを知ることは、銀河進化を理解する上で非常に重要であると言える。銀河の空間分布の持つ性質を調べる際には、パワースペクトルという統計量がよく用いられる。本研究では、遠赤外線観測される銀河に注目し、その分布のパワースペクトルを求めている。この銀河は、ダストからの放射で明るく輝いており、宇宙における星形成活動性の良いトレーサーとなっている。そのため、遠赤外線観測される銀河の空間分布の性質を知ることは、星形成銀河が宇宙においてどう分布しているのかを理解することにもつながる。

本研究では、赤外線天文衛星 AKARI FIS の全天サーベイのカタログを用いて、その銀河分布の 2 次元のパワースペクトルを求めている。カタログから銀河のデータを選別し、それらを銀河座標で北と南それぞれ 4 つの領域に分けた。各領域について平面近似を用いてパワースペクトルを求め、最終的に北と南でそれぞれ平均をとった。得られたパワースペクトルはべき乗則でよく近似され、そのべきの値は北と南でほぼ同じような値となった。さらに、この結果を IRAS のカタログを用いた先行研究と比較すると、べきの値は先行研究のものと同値となることが分かった。

1 Introduction

現在の宇宙には、様々な種族の銀河が存在している。それらは実に多様な形態・性質を持っているが、それらは銀河の存在している環境に深く関係していることが知られている (e.g., Dressler, 1980)。銀河の形成・進化は、暗黒物質の集まりである暗黒ハローの中で起こるので、銀河をホストしている暗黒ハローの性質が銀河の性質に大きな影響を与えていると考えられている。例えば、質量の大きな暗黒ハローほど中心部により大質量の銀河をホストしており、それらの銀河は一般的に赤く、より中心部に集まっていることが知られている。よって、どのような性質を持つ銀河がどのような環境下に存在しているのか、つまりどのような空間分布をしているのかということを理解することは、銀河進化を理解する上で非常に重要となる。

そのような銀河の空間分布の性質を議論する際には、パワースペクトルという統計量がよく用いられる。銀河分布の個数密度ゆらぎを様々な波数 k を持

つ波の重ね合わせと見たときに、フーリエ係数 $F(k)$ はその振幅を表す。パワースペクトルは、 $F(k)$ の絶対値の 2 乗で表される量で、波数 k を持つ波が全体の密度ゆらぎに対してどの程度寄与しているのかを表す。つまり、パワースペクトルを求めることによって、銀河分布がどのような統計的性質を持っているのかを知ることができる。

本研究では、特に遠赤外線の波長帯で観測される銀河に注目し、その空間分布のパワースペクトルを求めている。銀河の星形成領域では、大質量星から放出された紫外線が星の進化の各段階で生成されるダスト粒子によって吸収され、中間・遠赤外線として再放射される。そのため、星形成領域は遠赤外線の波長帯で観測すると明るく見えるので、これらの銀河は宇宙における星形成活動性の良いトレーサーになっていると言える (e.g., Takeuchi et al., 2010)。つまり、遠赤外線銀河の空間分布の持つ性質を知ることは、星形成銀河が宇宙においてどのように分布しているのかということを理解することにもつながる。

2 Data

AKARI は 2006 年に JAXA によって打ち上げられた赤外線天文衛星である (Murakami et al., 2007)。*AKARI* の遠赤外線観測装置である FIS (Far-Infrared Surveyor) は、4 つの観測波長帯を持ち、それぞれの中心波長は、 $65 \mu\text{m}$ (*N60*), $90 \mu\text{m}$ (*WIDE-S*), $140 \mu\text{m}$ (*WIDE-L*), $160 \mu\text{m}$ (*N160*) となっている (Kawada et al., 2007)。*AKARI* FIS によって行われた遠赤外線波長帯における全天探査は、世界初の赤外線衛星 *IRAS* で行われて以降 2 度目の全天探査である。*AKARI* は、*IRAS* よりも高い感度と空間分解能を持っているので、天体の位置・フラックス値などは信頼性の高いものになっていると考えることができ、*AKARI* のカタログを用いることでより正確な結果を得ることができると期待される。

本研究では、全天探査のカタログである *AKARI* FIS bright source catalog (BSC) v. 1 (Yamamura et al., 2010) を用いて、銀河分布のパワースペクトルの解析を行った。カタログに含まれる全天体数は 427071 個である。カタログには銀河だけでなく赤外線で見える系内の星などが含まれているので、まずは全ての天体から銀河だけを取り出す作業を行った。方法は以下の通りである。

1. *AKARI* が $90 \mu\text{m}$ のバンドでスキャンした回数が少なくとも 3 回以上の天体のみを選択。位置・フラックス値を信頼できる天体のみにする。
2. 銀河系内のダストの放射による影響を強く受けていない領域にある天体のみを選択。*COBE* による観測を基にして作成された赤外線放射の全天の diffuse map である Schlegel map (Schlegel et al., 1998) において、 $I_{100} > 5 [\text{MJy sr}^{-1}]$ となる領域にある天体は、系内のダスト放射による影響を強く受けているとして除外した。
3. 縦軸・横軸にフラックス比をとった color-color 図 (図 1) を用いて銀河と星を分けた。Color-color 図上では、銀河と星は互いに異なる領域に分布する (Pollo et al., 2010)。図 1 において、直線よりも下に位置する天体を銀河とみなすことができる。

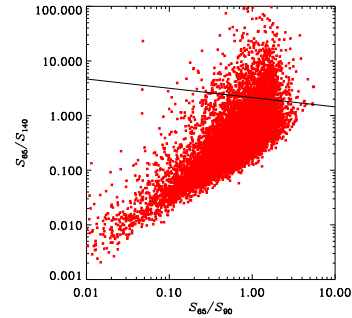


図 1: $S_{65}/S_{90} - S_{65}/S_{140}$ の color-color 図。各点が天体を表している。直線を引くことによって、銀河と星を分けることができる (Pollo et al., 2010)。

最終的に、18077 個の銀河候補天体が残った (図 2)。

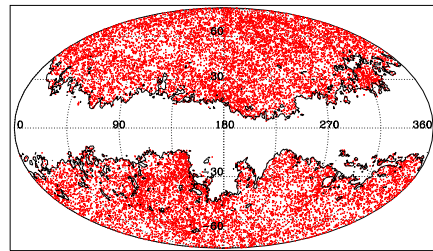


図 2: *AKARI*/FIS で観測された銀河の天球面上における分布。黒の等高線は、Schlegel map において閾値 $I_{100} = 5 [\text{MJy sr}^{-1}]$ となる場所を表している。

3 Methods

18077 個の銀河を銀河座標でまず北と南に分け、さらにそれぞれ銀経で区切って 4 つの領域に分けて、各領域でパワースペクトルの解析を行った。各領域の銀経の範囲は、 $(0^\circ, 90^\circ)$, $(90^\circ, 180^\circ)$, $(180^\circ, 270^\circ)$, $(270^\circ, 360^\circ)$ とした。まず、各領域について flat-sky 近似を用いて密度ゆらぎ $\delta(x, y)$ を計算した。密度ゆらぎは、

$$\delta(x, y) = \frac{n(x, y) - \bar{n}}{\bar{n}} \quad (1)$$

という式で書ける。ここで、 (x, y) は xy 平面上の位置、 $n(x, y)$ は (x, y) における個数密度、 \bar{n} は各領域の平均個数密度である。

そして、 $\delta(x, y)$ を 2 次元離散フーリエ変換し、フーリエ係数 $F(u, v)$ を求めた。2 次元離散フーリエ変換の式は、

$$f_{xy} = \sum_{u,v} F_{uv} \exp[2\pi i(ux + vy)] \quad (2)$$

$$F_{uv} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x,y} f_{xy} \exp[-2\pi i(ux + vy)] \quad (3)$$

で与えられる。

uv 平面上で $|F_{uv}|^2$ を方位角方向に平均をとることで、2 次元のパワースペクトル $P_2(K)$ を得た。

4 Results & Discussion

図 3 に、北と南の各領域で得られた 2 次元のパワースペクトル $P_2(K)$ を示す。

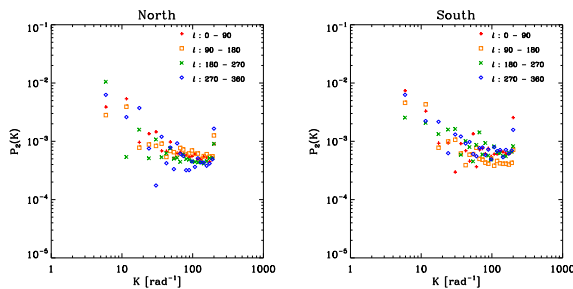


図 3: *AKARI* で観測された銀河の 2 次元パワースペクトル。左が北側、右が南側の結果。4 つの異なるシンボルは、それぞれ 4 つの領域の結果を表している。 ℓ は銀経を表す。

小スケール側 (波数 K の大きい側) では、銀河のデータの離散性から生じるショットノイズによる影響を見て取ることができる。このノイズを取り除くために、各領域について、銀河と同数の点をランダムに分布させたサンプルを 1000 個作成した。そして、それらのパワースペクトルを同様の方法で求め、1000 個のパワースペクトルの平均を求めた。さらに、波数 K で平均をとることによってショットノイズの見積りとした。このように見積もったサンプルの平均のパワースペクトルを得られた銀河のパワースペクトルから引くことで、ショットノイズの影響を取り

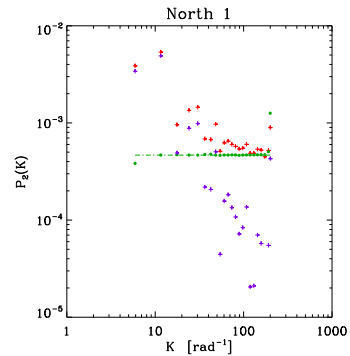


図 4: 北側の $\ell: 0^\circ - 90^\circ$ の領域におけるショットノイズ除去前後のパワースペクトル。赤: ノイズ除去前、紫: ノイズ除去後、緑: サンプル 1000 個の平均のパワースペクトルをそれぞれ表している。また、破線はサンプルのスペクトルをさらに波数 K で平均したものを表す。

除いた最終的な銀河のパワースペクトルが得られた (図 4)。

最後に北と南それぞれについて、ショットノイズ除去後の 4 つの領域のパワースペクトルの平均をとった。得られたパワースペクトルは、波数 $K \sim 9 - 200$ [rad^{-1}] の範囲でべき乗則 $P_2(K) = AK^n$ でよく近似され、 n と A の値はそれぞれ

$$\text{北: } n = -1.59 \pm 0.016, A = -0.97 \pm 0.032$$

$$\text{南: } n = -1.31 \pm 0.015, A = -1.36 \pm 0.029$$

となった (図 5)。

北と南を比較すると、そのべきの値に大きな違いは無いことが分かる。これはつまり、北と南ではその空間分布の持つ性質は大きく変わらないということである。

さらにこの結果を、*IRAS* のデータを用いている先行研究 Hamilton & Tegmark (2002) と比較した。この先行研究では、*IRAS* Point Source Catalog Redshift Survey (PCSz) のデータを用いて、銀河分布のパワースペクトルを求めている。先行研究の結果では、小スケールの非線形領域におけるパワースペクトルをべき乗則で近似すると、そのべきの値は -1.37 であった。本研究の結果と比較すると、べきの値にはほとんど差が無いことが分かった。

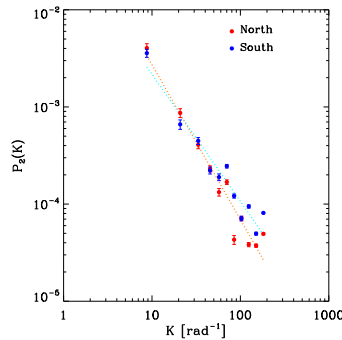


図 5: 平均した 2 次元パワースペクトル。赤：北側、青：南側の平均のパワースペクトルをそれぞれ表している。点線は、それぞれの結果をべき乗則でフィットしたもの。

本研究と先行研究との一番の大きな違いは、用いているデータがそれぞれ *AKARI* と *IRAS* のものであるという点である。*AKARI* は、*IRAS* と比較してより高い角分解能と感度を持ち、また、観測波長帯もより波長の長い側までカバーしている。このことから、*AKARI* のカタログには、より低光度な銀河やより低温のダストを持つ銀河が含まれていると考えることができる。そのような銀河まで含めたとしても、遠赤外線波長帯で観測される銀河の空間分布の性質は大きく変化はしないということが本研究により明らかになった。

5 Conclusion

本研究では、星形成活動性の良いトレーサーである遠赤外線の波長で観測される銀河の空間分布の持つ性質を調べるために、銀河分布の 2 次元パワースペクトルの解析を行った。本研究のまとめと結論を以下に記す。

- 赤外線衛星 *AKARI* の遠赤外線波長帯における全天サーベイのカタログを用いて解析を行った。
- 得られた 2 次元パワースペクトルはべき乗則でよく近似された。
- べきの値は、北で -1.59 ± 0.016 、南で -1.31 ± 0.015 となった。

- *IRAS* のカタログを用いている先行研究と今回の結果を比較すると、べきの値に大きな違いは無いことが分かった。
- *AKARI* の検出器の性能を考慮に入れると、より低光度の銀河やより低温のダストを持つ銀河が含まれていると考えられるが、そのような銀河まで含めても、遠赤外線で観測される銀河の空間分布の持つ性質は、先行研究と大きく変わらないことが明らかになった。

Reference

- [1] Dressler, A., 1980, *ApJ*, 236, 351
- [2] Hamilton, A. J. S., & Tegmark, M., 2002, *MNRAS*, 330, 506
- [3] Kawada, M., et al., 2007, *PASJ*, 59, 389
- [4] Murakami, H., et al., 2007, *PASJ*, 59, S369
- [5] Pollo, A., Rybka, P., & Takeuchi, T. T., 2010, *A&A*, 514, A3
- [6] Pollo, A., Takeuchi, T. T., Suzuki, T. L., & Oyabu, S., 2013, *Earth, Planets, & Space*, 65, 273
- [7] Ponthieu, N., Grain J., & Lagache, G., 2011, *A&A*, 535, A90
- [8] Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis M., 1998, *ApJ*, 500, 525
- [9] Takeuchi, T. T., Buat, V., Heinis, S., Giovannoli, E., Yuan, F.-T., Iglesias-Páramo, J., Murata, K. L., & Burgarella, D., 2010, *A&A*, 514, A4
- [10] Yamamura, I., Makiuti, S., Ikeda, N., Fukuda, Y., Oyabu, S., Koga, T., & White, G. J., 2010, *AKARI/FIS All-Sky Survey Bright Source Catalogue Version 1.0 Release Note*, ISAS/JAXA