

# 遠赤外線の Spectral Energy Distribution による銀河の活動の分類

公地 千尋 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

銀河の活動を調べる有効な手段の 1 つに、銀河の Spectral Energy Distribution (SED) を見る方法がある。SED に関する先行研究には IRAS の 4 バンドのデータを用いたものが多いが、銀河の活動は複雑なためこれだけでは情報量が不足していた。そこで我々は IRAS にくわえ「あかり」のデータを使用し、合わせて 9 バンドのデータを用い、銀河の活動を定量的に解析するために主成分分析を行った。

その結果、(i) 第 1 主成分は赤外フラックスの和と可視フラックスの比、(ii) 第 2 主成分は IRAS と「あかり」のフラックス比、(iii) 第 3 主成分は中間赤外のフラックス比であることが分かった。第 1 主成分は銀河の活動性、第 2 主成分は銀河の大きさを表すパラメータ、第 3 主成分は AGN の活動を表していると解釈できる。したがって、主成分分析は銀河の活動性とエネルギー源を調べる手段として有効である。

## 1 Introduction

銀河の活動には星形成と活動的銀河核 (AGN) とがあり、これらの活動はしばしば厚いダストに覆われた領域で行われている。したがって、このダストからの熱放射が銀河の支配的な放射となる。この放射を波長で分解したものが Spectral Energy Distribution (SED) である。この SED から、銀河の活動性及びそのエネルギー源について調べることを試みる。そのための有効な手段のひとつが、異なる波長のフラックス比の相関 (color-color diagram) を調べることである。ただし、従来の研究ではその多くが IRAS の 12, 25, 60, 100  $\mu\text{m}$  のフラックスデータを用いていた (G. Helou 1986)。しかし銀河の活動は複雑であり、そのため IRAS のデータのみでは SED 全体を十分にカバーできないことが問題であった。

そこで、本研究では IRAS の 4 バンドに加え、「あかり」の 9, 18, 65, 90, 140  $\mu\text{m}$  の 5 バンドのフラックスデータを用いて解析を行った。IRAS のデータカタログは IRAS Revised Bright Galaxy Sample (D. B. Sanders et al. 2003) を用い、これらと「あかり」IRC と FIS のデータとで座標マッチングを行い、さらに各銀河の可視光のフラックスを加えたデータセットを作成した。このデータセットから、各波長のフラックスと可視フラックスの比、赤外フラックス同士の比を計算し、解析のパラメータとして設定した。そしてこれらのパラメータを用いて主成分分析を

行い、主要な主成分の表している情報について議論する。

## 2 Methods

### 2.1 Outline

本研究の対象は、IRAS Revised Bright Galaxy Sample (RBGS) (D. B. Sanders et al. 2003) に掲載されている 629 個の近傍銀河とした。これらの銀河に対し、対応する「あかり」FIS, IRC のデータを探すために座標マッチングを行った。さらに各サンプルについて可視光 (V バンド) のフラックスを調べた。最後に、IRAS と「あかり」の両方で点源とみなせるサンプルのみを解析に使用するため、可視光における見かけの半径を指標としてふるいにかけた。これらの作業の後、主成分分析に使用したサンプルは 629 個中 264 個である。以下にその詳細を示す。

### 2.2 Sample Selection

まず、RBGS の全 629 個のサンプルと「あかり」FIS, IRC のサンプルと座標でマッチングを行った。FIS, IRC の位置精度はそれぞれ  $1\sigma = 6\text{arcsec}$  (I. Yamamura et al. 2010),  $3\text{arcsec}$  (H. Kataza et al. 2010) なので、 $\pm 3\sigma$  を基準としてマッチング半径は

FIS は 20arcsec、IRC は 10arcsec とした。マッチングの際に注意した点は次の 2 点である。

- マッチングで複数のサンプルが合致した場合は、より RGBS の座標に最も近いものを一つ選んだ。
- RGBS で 1 つの天体として扱われているが、IRC・FIS では 2 天体に分解されている天体では、あかりの 2 天体のフラックスの和を RGBS に対応するフラックスとして用いた。

629 個のサンプル中、9 バンドすべてのデータが揃っているのは 369 個であった。

さらに、これら 369 個のサンプルについて V バンドのフラックスを調べた。参照したカタログは、IRAS Bright Galaxy Sample(BGS)(B. T. Soifer et al. 1987), IRAS BGS Part II(D. B. Sanders et al. 1995), New General Catalogue(NGC), Index Catalogue(IC)(J. L. E. Dreyer 1888) である。ここで V バンドフラックス (V バンドの見かけの等級) のデータが見つかったのは 323 個であった。

この 323 個から、広がり大きい銀河を除いた。除く銀河の大きさの基準として、Third Reference Catalogue of Bright Galaxies(RC3)(H. G. Corwin Jr. et al. 1994) にある D25 を用いた。RC3 に D25 のデータがあったものは 323 個中 275 個であった。D25 は 1arcsec 四方の surface brightness が B 等級で 25 等となる半径を表したもので、単位は 0.1arcmin である。この D25 は、銀河のみかけの大きさの指標となる。今回、サンプルの選択には D25 の常用対数  $\log D25$  を用い、 $\log D25 \geq 2$  のものを広がり大きい銀河とした。この条件に当てはまるサンプルを除くと、残りは 264 個となった。

この 264 個のデータ・セットから計算されたパラメータを主成分分析に用いた。

### 2.3 Principle Component Analysis

主成分分析とは、多くの変数を持つデータについてその情報をなるべく損なわずに低次元化することで、データが持つ情報の解釈を容易にする手法である。線形解析である主成分分析では、データの各成分を線形結合した主成分ベクトル (principal component

vector) を新たな評価対象とする。例えば、K 個の変数  $n_1, n_2, \dots, n_K$  を持つデータであれば、これらの変数をそれぞれ固有ベクトル  $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \dots, \vec{n}_K$  とみなして次式のように K 個の主成分が定義できる。

$$\text{第 1 主成分} : \vec{M}_1 = a_1 \vec{n}_1 + a_2 \vec{n}_2 + \dots + a_K \vec{n}_K$$

$$\text{第 2 主成分} : \vec{M}_2 = b_1 \vec{n}_1 + b_2 \vec{n}_2 + \dots + b_K \vec{n}_K$$

⋮

$$\text{第 K 主成分} : \vec{M}_K = k_1 \vec{n}_1 + k_2 \vec{n}_2 + \dots + k_K \vec{n}_K$$

主成分は、データを射影した時の分散が最大となるような軸として求める。分散の大きさは情報量の多さであり、分散が大きいつきは各データの固体系差がよく表れているため、情報量が多いといえるからだ。K 次元空間には軸が K 本あるが、そのうち 1 つをデータの分散が最も大きい方向にとり、これを第 1 主成分とする。以下、軸方向の分散が大きい順に第 2, 3, ..., K 主成分とする。このようにすると、各主成分は直交するため独立であり、それぞれ独自の情報を持つようになる。

主成分分析で主成分の他に扱う量は 3 つある。1 つ目は、固有ベクトル (eigenvalue) で、これはその主成分が元データの情報をどれくらい保持しているかを示す量である。固有値は個々のデータについて主成分ベクトルの方向について情報量の総和であり、元の変数の分散が 1 の時、元データの変数いくつ分の情報量を有しているかを表す値である。2 つ目は寄与率 (contribution ratio) で、これは全情報中その主成分がどれだけの割合を占めるかをあらわす指標である。3 つ目は累積寄与率 (cumulative contribution ratio) で、これは寄与率を降順に足しあわせた量である。

今回の主成分分析では、次ページ表 1 の 15 種類の変数を用いた。 $F_V$  は V バンドのフラックスを表す。これらのうち、独立変数は  $F(9\mu) \sim F(140\mu)$  の 9 バンドと  $F_V$  の合わせて 10 個である。また、15 種類の変数のうち独立なものは表 1 左列の 9 つである。9 バンドのフラックスを  $F_V$  で割っているのは、フラックスの距離依存性をなくし示強変数として扱うためである。

表 1: 主成分分析に用いたパラメタ。

$F(9\mu)/F_V$	$F(60\mu)/F(65\mu)$
$F(18\mu)/F_V$	$F(100\mu)/F(90\mu)$
$F(65\mu)/F_V$	$F(18\mu)/F(9\mu)$
$F(90\mu)/F_V$	$F(140\mu)/F(90\mu)$
$F(140\mu)/F_V$	$F(25\mu)/F(12\mu)$
$F(12\mu)/F_V$	$F(100\mu)/F(60\mu)$
$F(25\mu)/F_V$	
$F(60\mu)/F_V$	
$F(100\mu)/F_V$	

### 3 Results

前節で準備したサンプルを用い、表 1 に示したパラメタについて主成分分析を行った。その結果、主要な主成分は次表のようになった。

図 1: 第 1~第 3 主成分の主成分負荷量と寄与率。

principal component loadings	1 <sup>st</sup> principal comp.	2 <sup>nd</sup> principal comp.	3 <sup>rd</sup> principal comp.
$F(9\mu)/F_V$	-0.883148	0.2889086	-0.213853
$F(18\mu)/F_V$	-0.938089	0.0823257	0.0395696
$F(65\mu)/F_V$	-0.944443	0.1359611	0.0971596
$F(90\mu)/F_V$	-0.962228	0.2059386	-0.009513
$F(140\mu)/F_V$	-0.938649	0.2664793	-0.092534
$F(12\mu)/F_V$	-0.91412	0.2536818	-0.133178
$F(25\mu)/F_V$	-0.959318	0.0823036	0.0997035
$F(60\mu)/F_V$	-0.967832	0.1582244	0.0722795
$F(100\mu)/F_V$	-0.94771	0.2504699	-0.023789
$F(60\mu)/F(65\mu)$	0.312854612	0.60518	0.6276065
$F(100\mu)/F(90\mu)$	0.353131	0.7214333	0.546922
$F(18\mu)/F(9\mu)$	-0.381961	-0.513468	0.6568312
$F(140\mu)/F(90\mu)$	0.4627448	0.7130274	-0.006395
$F(25\mu)/F(12\mu)$	-0.50639	-0.60186	0.4639238
$F(100\mu)/F(60\mu)$	0.4400809	0.7623373	-0.080422
eigenvalue	8.9823485	2.9832118	1.4450343
contribution ratio	59.882324	19.888079	9.6335619
cumulative contribution ratio	59.882324	79.770402	89.403964

図 1 において、各主成分について寄与の大きい主成分負荷量をオレンジの枠で囲ってある。第 1 主成分は各波長のフラックスの和と可視光フラックスの比を表しており、全情報量のうち最も多くを担っている成分である。第 2 主成分は、赤外フラックスの比の主成分負荷量が多い。第 3 主成分は  $F(60\mu)/F(65\mu)$ ,  $F(100\mu)/F(90\mu)$ ,  $F(18\mu)/F(9\mu)$  が寄与の大きい成分となっている。

### 4 Discussion

第 1 主成分は銀河の可視光に対する赤外放射の強さをあらわしていると解釈できる。これらは星形成や AGN 活動で放射される可視・紫外光に由来する。この光を周囲のダストが吸収し、温められたダストは赤外線を放射する。つまり銀河からの赤外放射の多さは星形成や AGN の活動の激しさを表していると言える。

次に第 2 主成分について、 $F(60\mu)/F(65\mu)$  と  $F(100\mu)/F(90\mu)$  に注目する。これらはそれぞれ分母が「あかり」、分子が IRAS のバンドのフラックスであり、分母と分子で波長が近いものとなっている。IRAS のビーム径は 2 – 5arcmin, 「あかり」のビーム径は 0.5 – 0.9arcmin であり、IRASの方が大きい (W. Jeong et al. 2007)。そのため、コンパクトな銀河であれば IRAS・「あかり」の両方でその全体を捉えることができるが、大きな銀河は IRAS では全体を見ているにもかかわらず「あかり」では部分しか見ていない、といったことが起こる。このとき、「あかり」より IRAS の方が波長が近いにもかかわらず大きなフラックス値になる。図 2 は  $F(60\mu)/F(65\mu)$  を横軸、 $F(100\mu)/F(90\mu)$  を縦軸にとったサンプルの散布図である。図中で、NGC4260 や Mrk231 といったコンパクトな銀河は原点近くに、M108 や M58 といった大きな銀河は原点から離れたところに位置しているのが分かる。この図からも、第 2 主成分は銀河の大きさを表す成分であると解釈できる。

Correlation between  $\log F(60u)/F(65u)$  and  $\log F(100u)/F(90u)$

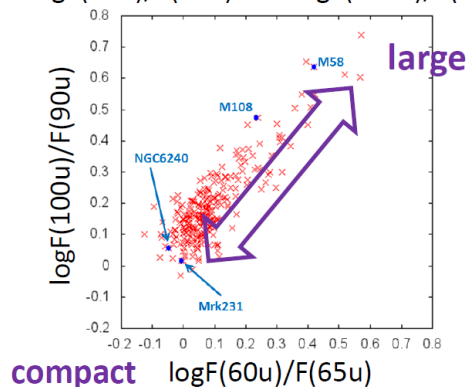


図 2:  $F(60u)/F(65u)$  と  $F(100u)/F(90u)$  の散布図。

最後に第 1 主成分と第 3 主成分について考察する。図 3 は、第 1 主成分と第 3 主成分それぞれの中で最も寄与の大きいパラメタを軸にとった散布図である。第 1 主成分は  $F(90\mu)/F_V$ 、第 3 主成分は  $F(18\mu)/F(9\mu)$  が最も寄与が大きい (図 1 参照)。横軸を見ると、星形成活動の盛んな Arp293 は右側に、NGC4579 などの比較的活動性の低い銀河は左側に位置している。このことから、第 1 主成分は銀河の活動性を表していると考えられる。縦軸を見ると、Arp293 は下部に、AGN の活動が盛んな Mrk231 や NGC6240 は上部に位置している。したがって、第 3 主成分は AGN の活動性を表していると解釈できる。

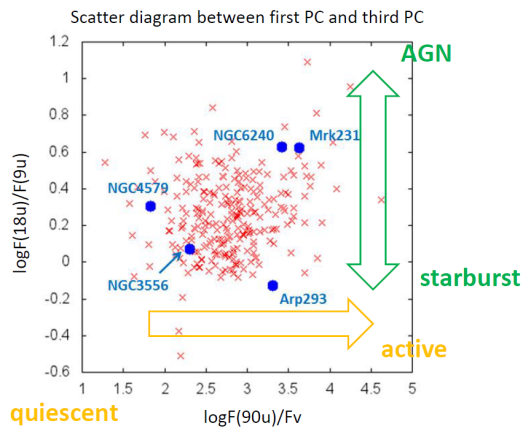


図 3:  $F(90\mu)/F_V$  (～第 1 主成分) と  $F(18\mu)/F(9\mu)$  (～第 3 主成分) の散布図。

このように、主成分中のパラメタの相関図や主成分同士の散布図を描くことでそれらの主成分がどのような情報を持っているかを探ることができる。

## 5 Summary

銀河の SED を調べることは、その活動を知るための良い方法の 1 つである。これらの研究では IRAS の 4 バンドを用いたものが多かったが、銀河の活動を解明するには情報量が不足していた。そこで本研究では、IRAS にあかりのデータを加え主成分分析を行った。

解析に用いるデータの選択には、(i)IRAS のカタログとあかり IRC・FIS のデータとの座標マッチング、

(ii)D25 を用いた広がり大きい銀河の除去の 2 段階を経た。また、それぞれの銀河について V バンドのフラックスも調べた。これらのうち IRAS のデータ・あかりのデータ・V バンドフラックス・D25 のすべてがそろっており、(ii) で除かれなかったサンプルから 15 種のパラメタを計算し、これを主成分分析に用いた。その数は 264 個であった。

解析の結果、(i) 第 1 主成分は赤外フラックスの和と可視フラックスの比、(ii) 第 2 主成分は IRAS とあかりのフラックスの比、(iii) 第 3 主成分は中間赤外のフラックスの比を表していることがわかった。これらはそれぞれ、(i) 銀河の活動性、(ii) 銀河の大きさ、(iii) 銀河の活動への AGN の寄与を表していると解釈できる。このようなことが結果から導けるので、主成分分析は銀河の活動性やエネルギー源を調べるのに有効な手段であると言える。

## Reference

- G. Helou. 1986. ApJ 311:L33-L36
- D. B. Sanders et al. 2003. AJ 126:1607-1664
- AKARI/FIS All-Sky Survey Bright Source Catalogue Version 1.0 Release Note (I. Yamamura et al. 2010)
- AKARI/IRC All-Sky Survey Point Source Catalogue Version 1.0 -Release Note (Rev.1)- (H. Kataza et al. 2010)
- B. T. Soifer et al. 1987. ApJ 320:238-257
- D. B. Sanders et al. 1987. AJ 110, no.5:1993-2008
- Public Access NGC/IC Database, The NGC/IC Project. <http://www.ngcicproject.org/> (accessed 2014-07-25)
- H. G. Corwin Jr. et al. 1994. AJ 108, no.6:2128-2144
- W. Jeong et al. 2007. PASJ 59:S429-S435