

# すざく衛星による狭輝線セイファート 1 型銀河の解析

Analysis of Narrow-Line Seyfert 1 Galaxy with suzaku satellite

宇宙情報解析研究室：P08139 村田 旭

指導教員：久保田 あや 准教授

## 1 ブラックホールとセイファート銀河

ブラックホール（以降 BH）は、強い重力のため、光さえも抜け出せない天体である。BH には、恒星質量 BH（質量  $10M_{\odot}$  程度： $M_{\odot}$  は太陽質量）と、 $10^6 - 10^9 M_{\odot}$  の質量を持つ超巨大質量 BH がある。この超巨大 BH が周囲のガスを大量に吸い込み、大量の電磁波を放出している場合、活動銀河核（以降 AGN）と呼ばれる。AGN の 2 種類の代表的な例がセイファート銀河とクェーサーである。これらの区別は、中心核から放射される光度の違いによるものである。セイファート銀河は 1 型と 2 型に分類される [1]。可視光スペクトルに狭輝線と広輝線を両方含むものが 1 型で、狭輝線のみのもものが 2 型であるが、地球から観測した際の銀河に対する角度の違いとして両者は同じ AGN として統一的に理解されている。本研究では、セイファート 1 型銀河の中でも細い輝線の特徴とする狭輝線セイファート 1 型銀河（以降 NLS1）の X 線データを解析する。NLS1 に属する BH は比較的低質量でかつ高光度で輝いているものが多く、普通の AGN では見られない円盤由来と思われる軟 X 線放射の観測が報告されている。本研究は、複数の NLS1 の解析を行い、類似点や相違点を調べる、軟 X 線成分の正体に迫ることを目的とする。

## 2 すざく衛星による NLS1 の観測

すざく衛星によって約 13 個の NLS1 の観測が行われている [2][3][4]。本研究ではその中で 5 天体の解析を行った。各天体の基本的な情報を表 1 に示す。

天体名	観測日	距離 (光年)	質量 ( $M_{\odot}$ )	$3R_s$ [km]
			$\times 10^6$	$\times 10^{10}$
Ton S180	2006/12/9-12	約 8 億	13	10
PKS0558-504	2007/1/21-22	約 21 億	60	53
Mrk110	2007/11/2-4	約 5 億	18	15
Mrk359	2007/2/6-9	約 2 億	2	1.8
Mrk335	2006/6/21-24	約 3 億	(15-30)	20

表 1: 観測天体の情報

ここで  $R_s (= 2GM/c^2)$  はシュバルツシルト半径と言い、一般相対性理論により、非回転 BH の円盤内縁半径  $R_{in}$  は  $3R_s$  と予想されている。

すざく衛星 [5] は 2005 年 7 月に打ち上げられた日本で 5 番目の X 線天文衛星であり、0.3 - 10 [keV] に感度をもつ 4 台の X 線 CCD カメラ (XIS)[6] と 10 - 700 [keV] に感度をもつ 1 台の硬 X 線検出器 (HXD)[7] が搭載されており、これら 2 種類の検出器によって広帯域の観測が可能である [8]。今回の解析には XIS のデータを用いた。

## 3 スペクトル解析の準備

### 3.1 データリダクション

観測データには、衛星からの観測データ以外にも、地球を見ている時間帯や地球が発する磁気異常領域 (SAA) などの影響で観測に使えないデータも含まれている。NASA および ISAS/JAXA で提供される観測データには、SAA などの時間帯があらかじめ除去された cleaned event というデータがあり、解析にはこれを用いる。この cleaned event について、目的の天体の中心付近の領域のみ切り取るデータリダクションを行い、最終的にスペクトルを抽出する。データリダクションには、heasoft<sup>1</sup> という X 線データ解析用のソフトウェア XSELECT<sup>2</sup> を使用する。図 1 はすざく衛星の XIS 検出器によって得られた Mrk335 の画像である。この図の対象天体（ソース）の領域から X 線スペクトルを抽出するが、得られるスペクトルには、天体自身からの X 線の他に宇宙全体に広がった X 線背景放射および検出器固有の雑音によるバックグラウンド (BGD) が含まれており、スペクトル解析ではこれらを差し引く必要がある。

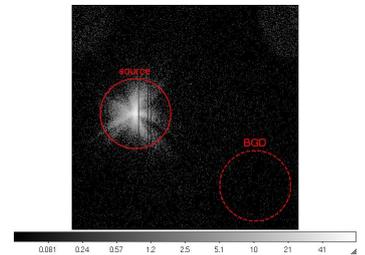


図 1: Mrk335 の XIS 画像

### 3.2 スペクトルの作成

図 1 の領域からソース、BGD それぞれのスペクトルを抽出し、ソースから BGD のスペクトルを差し引いた天体自体の X 線スペクトルを作成した。ソースと BGD を同時に表示した XIS0 のスペクトル (図 2) とソースから BGD を差し引いたスペクトル (図 3) を示す。

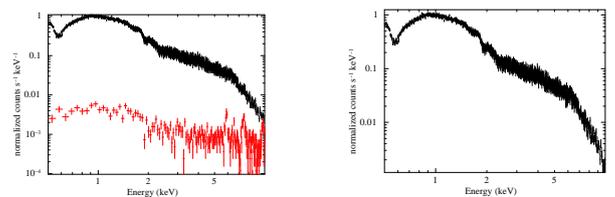


図 2: 上: ソース、下: BGD 図 3: スペクトル (-BGD)

## 4 スペクトル解析

### 4.1 モデルフィットと検証

作成したスペクトルを再現する放射モデルを  $\chi^2$  検定で検証する。今回の解析にはまず、通常のセイファート 1 型

<sup>1</sup><http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/lheasoft>

<sup>2</sup><http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/lheasoft/ftools/xselect/xselect>

銀河の X 線スペクトルである power-law モデルに星間吸収をかけたモデルで評価した。power-law はエネルギー  $E$  に対し  $E^{-\Gamma}$  ( $\Gamma$  は光子指数) の分布を持つべき関数である。しかし、単一の power-law (モデル 1) では低エネルギー側に余剰成分がみられる。この余剰成分を表すために 2 つ目の power-law (モデル 2)、diskbb モデル (モデル 3) を加えた解析を行った。diskbb モデル [9] は、光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤が黒体放射したときのスペクトルを表したモデルで、標準降着円盤 [10] を近似したモデルである。天体によっては鉄の輝線を考慮する gaussian モデルも合わせて解析を行った。 $\chi^2$  検定による  $\chi^2_{\nu}$  の値を表 2 に示す。

天体名	モデル 1 pl	モデル 2 pl+pl	モデル 3 pl+diskbb	モデル 4 pl+compTT
Ton S180	3669.78/1536	2163.90/1534	1881.63/1534	1882.95/1533
PKS0558-504	1647.81/998	1052.14/996	1033.49/996	1032.65/995
Mrk110	2846.73/2114	2185.47/2112	2245.66/2112	2183.87/2111
Mrk359	1528.24/1164	1298.41/1162	1301.61/1162	1295.35/1161
Mrk335	9686.89/2368	3323.72/2366	2841.55/2366	2850.22/2365

表 2: 各モデルフィットの  $\chi^2_{\nu}$  値

表 2 に示すように、モデル 2,3 ともデータをよく再現したが、Mrk110 以外の 4 天体はモデル 3 のほうがやや再現性がよい。よって軟 X 線余剰成分は熱的なボルツマン分布の形をしていると考えられる。モデルフィットした際のベストフィットパラメータを表 3 に示す。

天体名	モデル 3(diskbb+pl)			モデル 4(compTT+pl)		
	$R_{in}$ [km] $\times 10^4$	$T_{in}$ [keV]	$\Gamma$	$kT_e$ [keV]	$\tau$	$\Gamma$
Ton S180	55	$0.18^{+0.003}_{-0.003}$	$2.3^{+0.02}_{-0.02}$	$0.18^{+0.01}_{-0.01}$	$24.2^{+4}_{-4}$	$2.29^{+0.02}_{-0.02}$
PKS0558-504	150	$0.19^{+0.008}_{-0.008}$	$2.24^{+0.02}_{-0.02}$	$0.22^{+0.04}_{-0.04}$	$18.7^{+9}_{-9}$	$2.23^{+0.03}_{-0.03}$
Mrk110	17	$0.21^{+0.01}_{-0.01}$	$1.77^{+0.01}_{-0.01}$	$0.5^{+0.03}_{-0.03}$	$9.39^{+2}_{-2}$	$1.69^{+0.05}_{-0.05}$
Mrk359	2.7	$0.26^{+0.02}_{-0.02}$	$1.72^{+0.02}_{-0.02}$	$0.34^{+0.1}_{-0.1}$	$13.7^{+5}_{-5}$	$1.68^{+0.05}_{-0.05}$
Mrk335	43	$0.16^{+0.002}_{-0.002}$	$2.1^{+0.01}_{-0.01}$	$0.15^{+0.008}_{-0.008}$	$30.9^{+7}_{-7}$	$2.11^{+0.01}_{-0.01}$

表 3: ベストフィットパラメータ

## 4.2 他モデルでの検証

§4.1 のようにモデル 3 はデータをよく再現するが、表 1、表 3 の  $3R_s$  と  $R_{in}$  を比べると、どの天体も得られた半径がシュバルツシルト半径の 3 倍よりも小さくなっていることがわかる。そのため、モデル 3 はスペクトルは再現するが、物理的に正しくないモデルであるとわかった。そこで、power-law+compTT (モデル 4) での解析を行った。compTT モデルとは、円盤の周囲にあるコロナで低エネルギー光子が逆コンプトン散乱されたスペクトルを表したモデルである。表 2 に得られた  $\chi^2_{\nu}$  の値を表 3 にパラメータを示す。モデル 3 の値と同じ、もしくはより再現性が高くなる結果が得られた。power-law+compTT モデルで再現されるということは、NLS1 で見られる軟 X 線成分は、光学的に厚い降着円盤から放射された光子が、周りの高温プラズマ内で逆コンプトン散乱を繰り返し出てきたものだと考えられる。このモデルに基づいて、天体の最大光度であるエディントン限界光度  $L_{edd}$  に対する 0.5–10keV の光度  $L$  の割合を横軸にとり、縦軸に (a)pl 成分の光子指数  $\Gamma$ 、(b) 軟 X 線成分の割合  $L_{soft}/L_{edd}$ 、(c) コロナの光学的厚み  $\tau$ 、(d) コロナの電子温度  $kT_e$  を表示したものを図 4 に示す。図 4(a) に示したように、Mrk110 と Mrk359 は  $\Gamma \sim 1.7$  と他

の NLS1 に比べて小さい光子指数をもつ。通常の NLS1 の  $\Gamma$  の値は  $\sim 2.2$ 、セイファート 1 型では 1.7 とされていることから、Mrk110 と Mrk359 は NLS1 でありながらも  $\Gamma$  の値は通常のセイファート 1 型の値となり、セイファート 1 型に近い NLS1 であることがわかった。

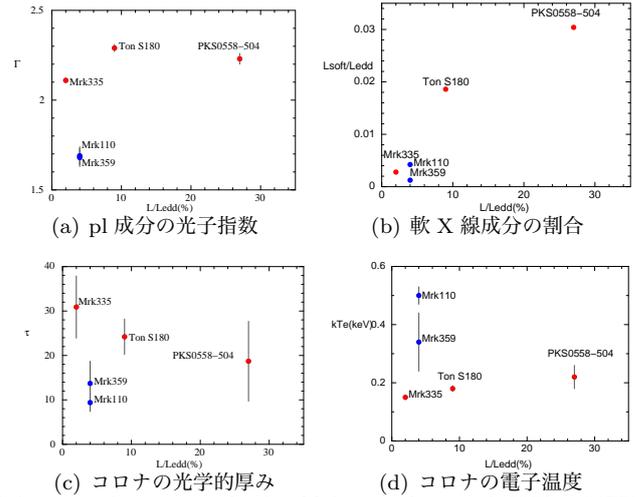


図 4: エディントン光度に対する割合と各物質量の相関図

図 4 から、セイファート 1 型に近い 2 天体を除くとエディントン限界光度比が高いほど、軟 X 線成分も高くなる (図 4b)。これにともない、コロナの電子温度が高くなり (図 4d)、光学的厚み  $\tau$  は小さくなる関係が見られた (図 4c)。 $\tau$  と  $T_e$  から逆コンプトン散乱能力の指標である  $y$  パラメータ ( $= (4kT/m_e c^2) \times \text{Max}(\tau, \tau^2)$ ;  $m_e$  は電子の質量) を計算すると、エディントン限界光度比が低い順番に  $y = 1.12^{+0.57}_{-0.45}$ 、 $0.83^{+0.3}_{-0.25}$ 、 $0.60^{+0.7}_{-0.44}$  となり、エディントン限界光度比が高いほど、逆コンプトン散乱する能力が小さい傾向にあることがわかった。すなわち、エディントン比が高くなると逆コンプトン散乱する能力が小さい一方で軟 X 線強度が高くなる (図 4b) という結果であり、これは光度が高くなると逆コンプトン散乱の種光子である円盤 (コロナの内側に存在) からの放射自体が高くなることを示している。つまり、エディントン光度比が高いほど、コロナの下部に存在する円盤が発達している可能性が高い。

## 5 まとめ

今回の解析の結果、5 天体の内 Mrk110 と Mrk359 はセイファート 1 型に近い NLS1 であり、NLS1 に見られる軟 X 線成分は光学的に厚い降着円盤から放射された光子が、周りのコロナで逆コンプトン散乱を繰り返し出てきたものとして矛盾がないことがわかった。このとき、光度と pl 成分の光子指数、軟 X 線成分の割合、コロナの光学的厚み、コロナの電子温度には相関があり、NLS1 ではエディントン光度比が高いほど、内部の円盤が発達している可能性を示した。

## 参考文献

- [1] Filippenko, A. et al. 1993, ApJ, 410, L75
- [2] Leighly. 1999, ApJS, 125, 297
- [3] Miyazawa et al. 2009, PASJ, 61, 1331
- [4] Veron-Cetty, M. P., Veron, P. 2010, A&A, 518A, 10
- [5] Mitsuda, K. et al. 2007, PASJ, 59, 1
- [6] Koyama, K. et al. 2007, PASJ, 59, 23
- [7] Takahashi, T. et al. 2007, PASJ, 59, 35
- [8] すざくヘルプ編「『すざく』ファーストステップガイド」
- [9] Mitsuda, K., et al. 1984, PASJ, 36, 741
- [10] Shakura & Sunyaev, 1973, A&A, 24, 337