

# MAXI を用いた超巨大ブラックホールによる星潮汐破壊現象のX線光度関数の見積もり



川室太希、上田佳宏、志達めぐみ、堀貴郁 (京大)、河合誠之 (東工大)、MAXIチーム

## Abstract

我々は、MAXIを用いて潮汐破壊現象 (Tidal Disruption Events; TDEs) の検出を行い、その発生頻度の光度依存性について調べた。MAXIの約3年間の観測により、相対論的なジェットが存在が報告されている2天体 (Swift J1644+57; [文献1], Swift J2058+05; [文献2]) とそうでない1天体 (NGC 4845; [文献3]) の検出を確認した。観測されたTDEsの光度依存性は、次の2つの条件を考慮することで説明することができた。条件の一つは、TDEsを起こすことのできるブラックホール質量には上限 ( $\sim 10^6 M_{\text{sun}}$ ) が存在すること、そして二つ目に、相対論的なジェットを伴うTDEsが発生する割合とそのジェットのビーミング効果である。また、我々の結果はROSAT All-Sky Surveyによる結果 [文献4] を十分に説明できる結果となっている。以上から、全TDEsの約0.2-1.1%程度がジェットを伴うことが示唆された。また、活動銀河核のX線光度関数や、超巨大ブラックホール (Supermassive Black Holes; SMBHs) 質量の赤方偏移進化 [文献5] に対するTDEsの影響を見積もると、その影響は極めて低いことが示唆された。

## Introduction

銀河中心に存在するとされている SMBH に質量降着がほとんど起きていない場合には、その SMBH の性質を観測的に研究することは難しい。しかし、SMBH に星が近づくとその潮汐力によって破壊され、UV/X線で急増光することが知られている。つまり、TDEsを研究することは活動性の低いSMBHの性質を調べる上で極めて重要である。TDEsは、いつでも起こるか予測できないため、MAXIを用いたX線サーベイが有効な手段の一つになる。そのTDEsの発生頻度は、理論的に  $10^{-5}-10^{-4} \text{ galaxy}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  と予測されている [文献6]。また、TDEsの発生頻度には SMBH の質量の依存性があると報告されており [文献7], Eddington光度を仮定するとその依存性が光度にも現れると考えられる。そこで、今回我々は、TDEsの発生頻度の光度依存性についてMAXIのデータを用いて調べた。

## Sample

TDEsの典型的な変動の時間スケールである数ヶ月に着目して、MAXIのデータを30/90日毎に分け、高銀緯 ( $|b| > 10^\circ$ ) で突発的な変動を起こしているイベントを13天体検出した [図1]。観測期間は、2012/09/23-2012/10/15で、使用帯域は4-10 keVである。その結果、上記の探査から2つのTDEs、Swift J1644+57 と Swift J2058+05を検出した。また、2nd MAXI catalog に載っている NGC 4845 のTDEの突発的な変動も検出した。天体情報については、表 [1] にまとめている。上記の3天体は、TDEsで予測されている幕乗 ( $L \propto t^{-5/3}$ ) の減光を示すことを確認した [図2]。そして、今回検出された残り10天体と2nd MAXI catalog の500天体 [文献8] から変動が大きく (5倍以上の光度変動) かつ5/3の幕乗の減光を示す天体を探したが、同様の特徴を示す天体は確認されなかった。

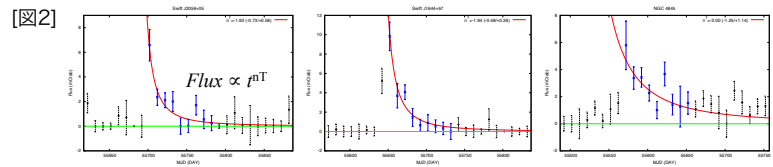
有意度マップ [図1]

約3年積算      30日積算

検出

Name	$z$	$\log L_{4-10\text{keV}}$	$\Gamma$	$\delta$
Swift J164449.3+573451	0.354	46.6	10	16
Swift J2058.4+0516	1.1853	47.5	$> 2 (10^\circ)$	$(16^\circ)$
NGC 4845	0.004110	42.3		

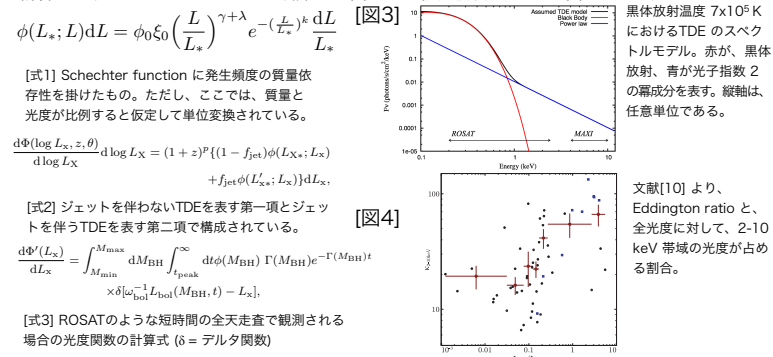
[1]天体名, [2]赤方偏移, [3]4-10 keVにおけるピーク光度, [4]Bulk Lorentz factor, [5] Doppler factor. (a)解析に用いた値。



## Analysis

光度依存性を調べるために、最尤法を用いた。光度関数には、Schechter function を元に、相対論的なジェットを出すTDEsの割合  $f_{\text{jet}}$  とビーミング効果を考慮した [式1,2]。また、ジェットに使われるエネルギーの割合  $\eta_{\text{jet}}$  についても考慮している。サンプル数が少ないため文献[9]を参考にして  $\gamma = -1.24, \lambda = -0.4, k = 0.8$  と固定した。赤方偏移の依存性として、 $(1+z)^p$  だけ進化するものと考えた。  $\log L_{x*}$  に関しては Eddington 光度の場合と、sub Eddington 光度の場合で二通りの場合 ( $\log L_{x*} = 44.1, 43.6$ ) を考えた。また、ROSAT全天サーベイの結果 [文献9]と一致するようにパラメータに制限を与えた。ROSATの結果は、0.2-2.4 keV における検出限界  $1 \times 10^{12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  で3天体のTDEsを検出している。ただし、我々のサンプルのうち水素中密度で  $N_{\text{H}} > 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  の吸収を受けたTDEsの割合 (2/3) を考慮して、9天体検出するパラメータを妥当な結果とした。検出数の計算には、ROSATの短時間サーベイでは、MAXIと異なりピーク光度を捉えられない。そこで、式[3]のように光度毎にPoisson確率で重み付けられた式で計算を行う。

上記の計算では、TDE のスペクトルモデルとして黒体放射と幕成分を考慮することで、ROSAT における光度を SMBH 質量毎に仮定した [図3]。まず、べき成分が全光度に占める割合は、AGN での結果 [文献10, 図4] を元にした。これより  $\log L_{x*}$  が Eddington 光度と sub Eddington 光度毎に求められる。そして、残りの光度を黒体放射が占めるとして黒体放射温度を計算した。ただし、このとき放射領域の半径は、潮汐破壊がおこる半径とした。



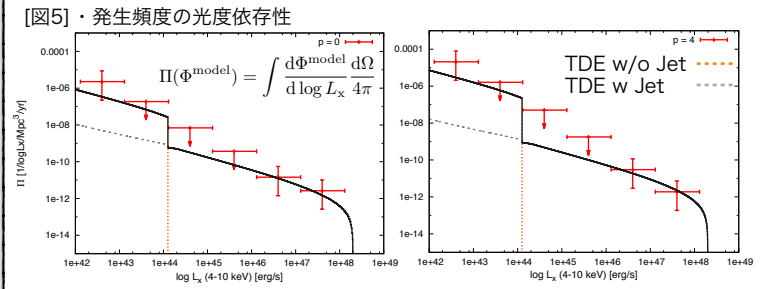
## Results

仮定するパラメータ  $\log L_{x*} (= 43.6, 44.1), p (= 0, 4)$  と  $\eta_{\text{jet}} (= 0.1)$  の全ての組み合わせについてフィッティングを行った。各々の場合において、ROSATで観測した場合に検出されるであろうTDEsの数  $N_{\text{TDE}}$  の計算を行った。その結果、赤方偏移進化の仮定によらず、Eddington 光度の場合においてROSATの結果を上手く説明できることがわかった。また、Kolmogorov Smirnov test (KS-test) より、以上のいずれの結果も90%の信頼度において棄却されなかった。最終的な発生頻度の光度依存性の結果については、表[3]、と図[5]にまとめられている。

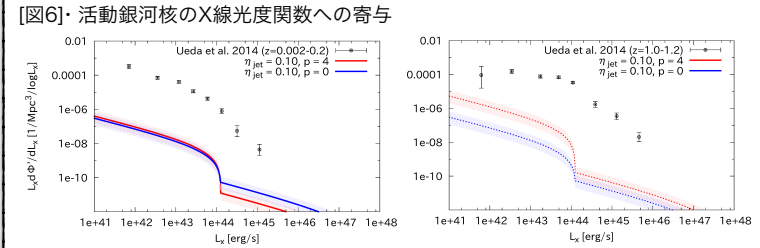
[表3]

$\eta_{\text{jet}}$	$f_{\text{jet}}$	$p = 0$		$p = 4$	
		$\phi_0 \xi_0$	p-value ( $L_{\text{dist}}/z\text{-dist}$ )	$\phi_0 \xi_0$	p-value ( $L_{\text{dist}}/z\text{-dist}$ )
0.10	0.011 ( $< 0.106$ )	$1.8^{+2.2}_{-1.2} \times 10^{-8}$	0.28/0.36	$0.002 (< 0.020)$	$1.7^{+2.1}_{-1.1} \times 10^{-8}$

[1] X線光度 (4-10 keV) に対してジェットに使われるエネルギーの割合, [2]全TDEsに対するジェットを伴うTDEsの割合, [3]式 [1] で定義されるパラメータ, [4]KS-test より  $p = 2$  でのフィット結果が起こりうる確率 (光度/赤方偏移の方向毎), [5]  $p = 4$  の場合の [2], [6]  $p = 4$  の場合の [3], [7]  $p = 4$  の場合の [4]。



上記の結果から光度関数を式[3]より計算し、X線光度関数 [文献5] と比較すると図[6]のようになった。結果より、近傍、遠方の両方において、TDE の影響は極めて小さいことがわかる。ただし、遠方の場合においては、 $\log L_x \sim 47$  のみ制限をつけているので、より低光度側では外挿にすぎないので注意する必要がある。



また、SMBH の質量密度の赤方偏移進化について下式[4]を元に計算した結果が、図 [7] になる。この結果は、AGN で供給される質量 ( $\sim 3 \times 10^5 M_{\text{sun}} \text{ Mpc}^{-3}$ ) と比較して小さい ( $< 5 \times 10^2 M_{\text{sun}} \text{ Mpc}^{-3}$ ) 。

$$\rho(z) = \int_{z_0}^z dz \frac{dt}{dz} \int_{L_{\text{min}}}^{L_{\text{max}}} d \log L \frac{d\Phi_X(L, z)}{d \log L} \times \frac{1-\epsilon}{c^2} \int_{t_{\text{peak}}}^{\infty} dt L_{\text{peak}} \left( \frac{t}{t_{\text{peak}}} \right)^{-5/3}$$

[式4]  $z$  から  $z$  までに供給される単位体積辺りの質量。放射効率  $\epsilon = 0.1$  を仮定し、 $t_{\text{peak}}$  は、TDE のピーク時刻を表す。

## Summary

- 今回我々が得た研究成果は以下のとおりである。
- MAXI のデータを用いて、TDEsの典型的な時間スケールである数ヶ月に着目して突発的な変動を示す天体を探査した。その結果12天体検出された。そのうちの2天体がTDEsであった。また、2nd MAXI catalog からは、TDEが1例報告されているため、全てで3例のTDEsを観測できた。
  - ROSATの結果をもとに、物理パラメータに制限を与えた。その結果、ジェットを伴うTDEsの割合として、 $f_{\text{jet}} = 0.2-1.1\%$ 、また、sub Eddington 光度と比較して、Eddington 光度の場合の方が ROSAT の結果と一致するという示唆を得た。
  - 既に研究されている活動銀河核のX線光度関数や、質量密度の赤方偏移進化 [文献5]と比較して、TDEsの影響は、極めて小さいということが示唆された。