

論文の内容の要旨

論文題目

X-ray timing spectroscopy of narrow line Seyfert I galaxies with *NuSTAR*
(*NuSTAR* を用いた狭輝線 I 型セイファート銀河の X 線スペクトル変動)

三宅 克馬

1. 背景

活動銀河核 (AGN) は、銀河の中心にある大質量ブラックホール (BH) に降着する物質が、重力エネルギーを高効率で放射に転換することで、銀河全体に匹敵する明るさで輝く現象である。物質は降着円盤を形成し、可視光や紫外線を出しつつ落下し、最後は高温 ($> 10^5$ K) のプラズマ (コロナ) となって BH に吸い込まれると考えられ、このコロナ中の電子が円盤からの光子を逆コンプトン散乱することで、強い一次 X 線が発生する。この一次 X 線が周辺の物質によって光電吸収やコンプトン散乱を受ける際、反射成分やそれに付随する鉄輝線などの二次 X 線が生じる。観測される X 線はこれら異なる成分の混合だが、いずれのスペクトルも構造に乏しいため、これらの成分を観測的に切り分けることは難しかった。

Noda et al. (2011, 2013, 2014) は、時間変動を利用したモデル依存しない成分分解手法を開発し、AGN の X 線スペクトルを変動する成分としない成分に切り分けることに成功した。それまで一次放射は単一の光子指数 $\Gamma \sim 2$ のべき関数 (PL) で表されてきたが、この新しい成分分解手法によって、複数の一次放射成分が存在することが、数例の Seyfert I 型 AGN (Seyfert 1) で確認された。これらのうち 1–50 keV の X 線スペクトルに寄与するものは 2 つあり、一方は変動が速く $\Gamma \sim 2.2$ とソフトなもの、もう一方は変動が遅く $\Gamma \sim 1.5$ とハードなものである。ハードな PL は降着円盤からの可視光放射と相関することがわかっており、降着円盤の内縁から生じる radiatively inefficient accretion flow (RIAF) を起源とすると考えられている (Noda et al. 2014)。しかしながら、X 線変動の多くを担うソフト PL の放射源については、未だによくわかっていない。

2. 目的と天体選定

本論文では、Seyfert 1 よりもスペクトルがソフトで、より速く激しい時間変動を示すことで知られる狭輝線 I 型 Seyfert 銀河 (NLS1) の時間変動を利用したスペクトル分解を試みる。その目的は、(a) NLS1 という高降着率な系にも Noda らの描像があてはまるかを調べ、(b) 降着率の上昇とともに

にソフト PL が優勢になるという Noda らの予想を確認し、(c) ソフト PL の放射源について調べるとともに、(d) NLS1 の光学的な定義である「H β 輝線の幅広成分が通常の Seyfert 1 ほど広くない」ことの理由を X 線観測から探ることである。

上記の目的を達成するため、硬 X 線帯域での感度を誇る、NASA の *NuSTAR* 衛星を用いることとし、同衛星で取得された公開データ (3–79 keV) 9 天体の 25 観測のうち、十分な変動を示し明るい 4 天体の 11 観測を選定した。これらのうち、NGC 4051 は吸収体の変動が > 3 keV へ影響を与えることがわかったので、低エネルギーにも高い感度をもつ「すざく」の公開データ (0.5–45 keV) 3 観測も併せて解析した。

3. 低降着率の NLS1、Swift J2127.4+5654 と NGC 4051

4 天体のうちこれら 2 天体は、Eddington 限界光度で規格化した光度が $\eta < 0.01$ と、NLS1 の中では比較的、低降着率な例である。その一つである Swift J2127.4+5654 で、3–10 keV と 10–50 keV の強度の相関をとったところ、10–50 keV 帯域には、(i) 3–10 keV と相関して強度変動する成分、(ii) 3–10 keV とは独立に変動する成分、(iii) 変動しない成分、の 3 つが存在することがわかった。

まず、(i) の成分を抽出するために、3–10 keV の X 線が明るい時間帯と暗い時間帯のスペクトルを作成し、それらの間の差分を作成した (図 1 左)。この成分は $\Gamma = 2.2$ とソフトで、変動の大部分を担うことから、Noda らの同定したソフト PL と同じであると考えられる。次に、(ii) の成分を抽出するために、スペクトルがハードな時間帯とソフトな時間帯のスペクトルの差分を作成したところ (図 1 右)、ソフト PL とは形の異なるハードな成分 ($\Gamma = 1.5$) が得られた。この成分は、ソフト PL とは独立に変動していることから、ソフト PL の部分吸収や反射といった二次成分ではなく、Noda らの言うハードな一次成分であると考えられる。

これらを元に、4 回にわたり観測された Swift J2127.4+5654 の、4 個の時間平均スペクトルに同時フィットを行った結果、この NLS1 の X 線スペクトルも Seyfert 1 と同様、「ソフト一次成分 + ハード一次成分 + 反射成分」で説明できることがわかった。これは NGC 4051 でも同様に成り立ち、反射成分は遠方の中性物質により生成されているとわかった。

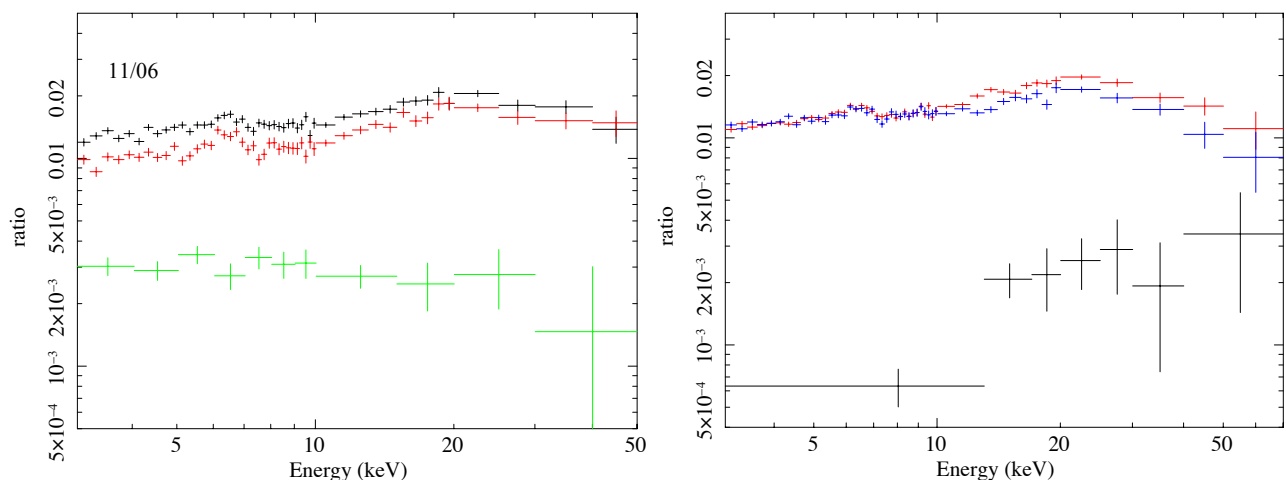


図 1: (左) 3–10 keV が明るい時 (黒)、暗い時 (赤) のスペクトルとその差分 (緑)。(右) ハードな時 (赤)、ソフトな時 (青) とその差分 (黒)。全て νF_{ν} 表示。

4. 高降着率の NLS1、Mrk 766 と Ark 564

これら2天体は、 $\eta \sim 0.4$ で、NLS1 の中でも降着率の高い系である。これらに対し、3. と同様の差分スペクトル法を適用したところ、どちらのスペクトルも (i) のソフト PL とその反射成分のみで記述でき、ハード PL は上限値のみ得られた (図 2)。さらに反射成分に含まれる鉄輝線が ~ 1 keV 程度の広がりを示すことから、それは内縁半径が $(30-100)r_g$ (r_g は重力半径) の降着円盤で生成されていると考えられ、実際に Mrk 766 では反射成分がソフト PL に追従して変動することもわかった。

これらの特徴は、「高降着率な系では円盤の内縁半径が小さくなり、RIAF が小さくなることでハード PL も見えなくなった」という描像で説明できる。

また、一次成分との強度比から求まる反射体の立体角は $\sim 2\pi$ と、低降着率の NLS1 に比べて大きいことがわかった。このことから、ソフト PL のコロナは円盤近傍に存在することがわかる。

5. NLS1 での 2 つの一次放射

我々は NLS1 も Seyfert 1 と同様の放射成分で説明できることを初めて確認した。また Noda らの予想通り、NLS1 でも降着率が高いほどソフト PL が卓越することが確認できた。これは、NLS1 が基本的には Seyfert 1 と同じ系であることを意味する。特に本論文では $\eta \sim 0.4$ と非常に高降着率な領域を探ることができた結果、その領域では、ハード PL の強度は飽和しており、ソフト PL が卓越することが確認できた (図 3)。

図 3 で降着率の上昇とともにソフト PL のフラックスが急に高まるのに対し、ハード PL の増加が緩やかであることから、ハード PL の方が降着率の変化に対して感度が低い、すなわち radiatively inefficient であることがわかり、これもハード PL 発生源が RIAF であることを支持する。

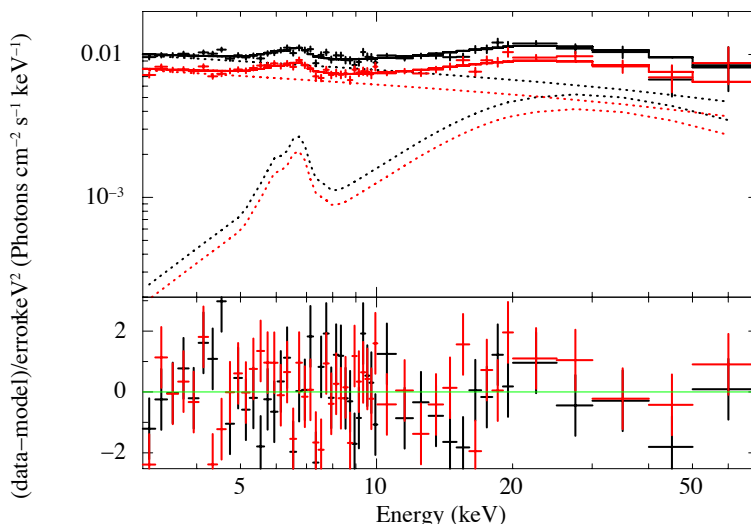


図 2: 3–10 keV が明るい時 (黒)、暗い時 (赤) のスペクトル。PL と反射成分でフィットされている。全て νF_ν 表示。

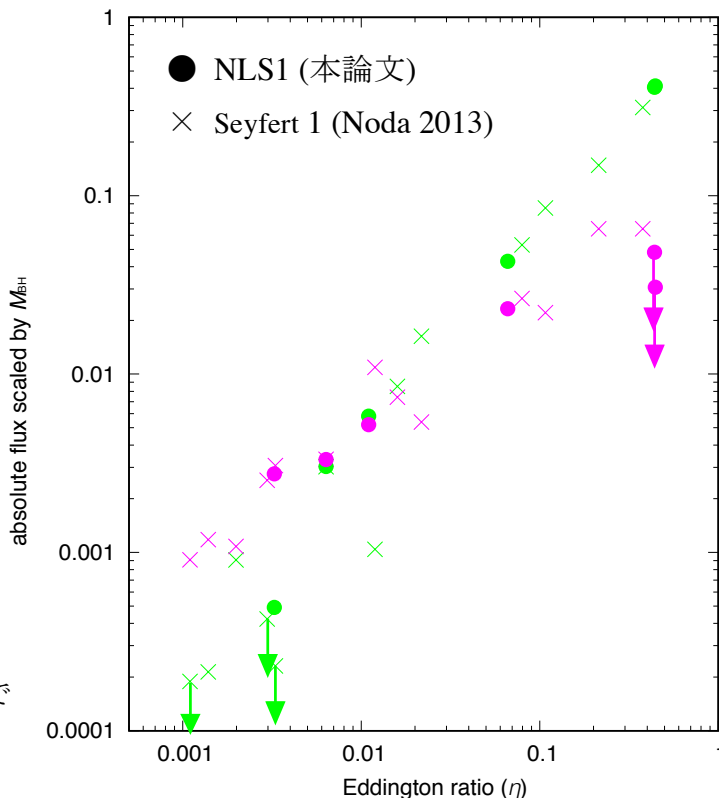


図 3: ソフト PL (緑) およびハード PL (マゼンタ) の強度。Eddington 限界光度でスケールしている。横軸は両者の和。

6. 放射描像

我々は Swift J2127.4+5654 の 3–10 keV と 10–50 keV の強度の相互相関関数から、スペクトルがソフトな時のみ 6 ± 1 ks のハードラグが存在することを確認した。これはソフト PL とハード PL の間の時間遅れと解釈でき、ソフト PL 発生源の方が降着流の上流に存在することを示唆する。また、降着流の速度は自由落下に近く、両者の間は光学的に薄い物質で接続されていると考えられる。

以上の結果を総合することで、我々は AGN の放射領域について、図 4 の描像を得た。すなわちソフト PL は円盤上の patchy なコロナにより円盤光子がコンプトン散乱されることで発生すると考えられる。このソフトコロナは降着率の変動とは無関係に自発的に盛衰することで (BH 連星 Cyg X-1 に対する描像; Makishima et al. 2008)、ソフト PL の激しい変動を作り出す。スペクトルが軟化する際は、ソフトコロナが広がってハードコロナとつながり (図 4a)、ソフト PL に対しハード PL が遅れて変動すると考えられる。他方、低降着率の NLS1 や Seyfert 1 ではむしろハード成分がトーラスなどの遠方で反射されていると考え、それらの反射成分の変動が遅いという観測事実を矛盾なく説明できる。

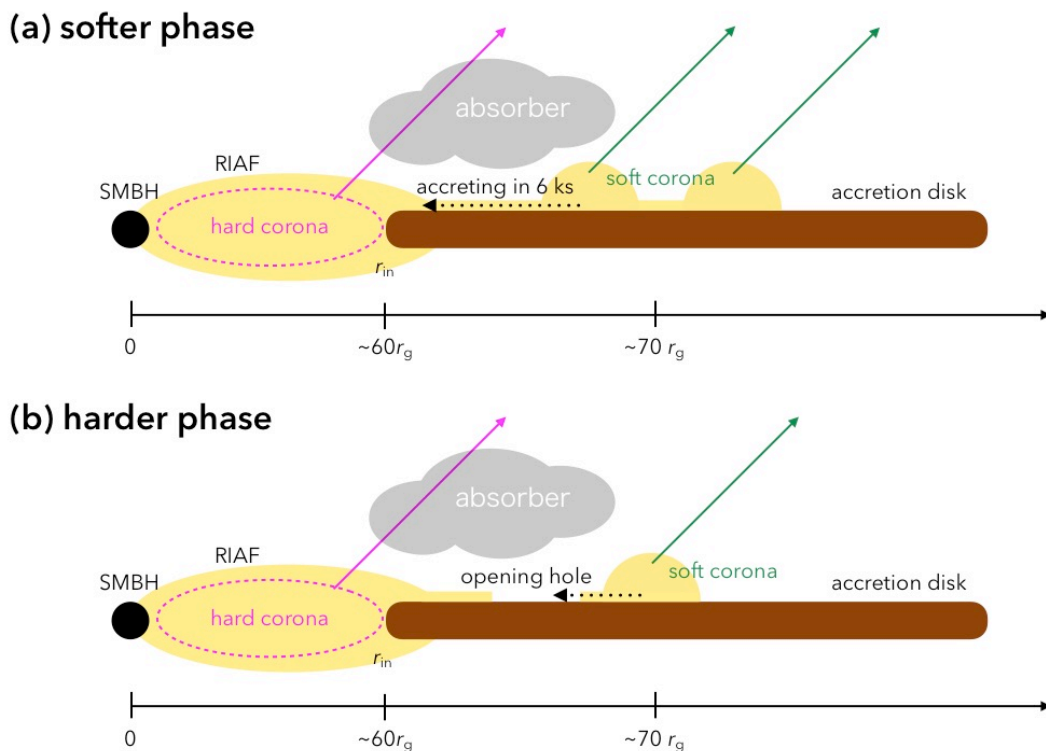


図 4: 考えられるジオメトリ。降着円盤 (茶)、ソフトコロナ (黄; 円盤上)、およびハードコロナ (黄; RIAF) から成る。

7. NLS1 の理解の深化

NLS1 の広輝線領域 (BLR) からの輝線は、Seyfert 1 からのものに比べて細い。今回の我々の結果から、NLS1 という一般に降着率の高い系で、放射効率の低いハード PL は弱く、高効率なソフト PL が特に卓越することがわかった (図 3)。BLR の物質もやがて BH に降着するならば、同じ質量からより多くの光子を得られる分、BLR は遠方に位置することになると考えられる。遠方ほど Kepler 速度は遅いので、NLS1 の BLR からの輝線は細くなると考えられる。