

超光度 X 線天体 M 3 3 X-8 のすざく衛星観測データによる解析

Suzaku observation of the Ultra-Luminous compact X-ray source M33 X-8

宇宙情報解析研究室 P07048-4 佐藤 宏 指導教員：久保田 あや 准教授

1 研究の背景と目的

ブラックホール(以降 BH)は、強い重力により光さえも抜け出せない宇宙の黒い穴である。宇宙に存在する BH には、大質量の星の一生の最後に残される恒星質量 BH(質量 $10M_{\odot}$ 程度: M_{\odot} は太陽質量)、銀河の中心に存在する $10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$ の質量の超巨大 BH という 2 種類が知られている。両者の間をつなぐ中質量の BH が確認されず、天文学におけるミッシングリンクとして残されてきた。しかし、近年の X 線観測により、近傍銀河に、X 線光度が非常に高い天体が発見され、超光度 X 線天体 (Ultra-Luminous X-ray Source: ULX) と呼ばれるようになった [5]。X 線光度は中心の BH 質量に相関すると考えられることから、中質量 BH 候補として注目を集めている。一方、最近の理論計算から、恒星質量 BH でも非常に大光度になる可能性も示唆されており、ULX の正体は明らかでない。

本研究では M33 X-8 という古くから知られる ULX のすざくによる X 線観測を行い、詳細なスペクトル解析からこの ULX が中質量 BH か否かを決定することを目的とする。

2 ブラックホールからの X 線放射

2.1 ブラックホールと降着円盤

BH を直接観測することはできない。しかし、図 1 のように BH と恒星が近接連星系を成していると、相手の星の外層大気が BH の強い重力に引かれ、BH のまわりをケプラー運動しながら落ち込み、BH のまわりに「降着円盤」というガス円盤が作られる。この降着円盤のガスは摩擦により数千万度の高温に熱せられ、強い X 線が放射される。したがって X 線スペクトルを解析することで質量や半径など、BH の性質を明らかにすることができる。

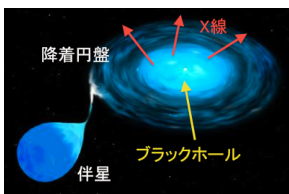


図 1: BH のようす

2.2 エディントン限界光度

BH に落ち込むガスに働く重力と、BH から放射される光子の輻射圧が釣り合って、これ以上の BH への落ち込みがなくなったときに輝く光度をエディントン限界光度 L_E といい、これが天体が輝ける限界の光度である。 L_E は BH 質量 M に対して

$$L_E = 1.25 \times 10^{31} \frac{M}{M_{\odot}} [\text{W}] \quad (1)$$

のように表せ、恒星質量 BH の典型的質量 $10M_{\odot}$ の L_E を大きく超えて明るい光度で輝く超光度コンパクト X 線源を超光度 X 線天体 (ULX) と呼ぶ。ULX は光度が高いものの BH 特有のスペクトルを示すために中質量 BH の候補として考えられている。

3 M33 X-8 のすざくによる観測

M33 X-8 は、地球から約 250 万光年の距離にある Sc 型の渦巻銀河 M33 に属する ULX である。X-8 は光度 $\sim 10^{32}$ W で輝いており銀河中心に位置するが、106 日周期の変動が観測されることから活動銀河核ではなく ULX であると考えられている [3]。すざく [1] は M33 X-8 を 2010 年 1 月 11 日から 13 日にかけて観測を行った。すざくには 0.2-12keV を観測する 4 台の X 線 CCD カメラ (XIS) と 10-300keV を観測する 1 台の硬 X 線検出器 (HXD) 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エネルギー領域での観測が可能である。残念なことに、本観測では HXD の検出器の雑音が増加しており、有効観測時間が 6ks しか取得できなかったため、本研究では XIS のみのデータを用いた。XIS は同帯域の感度を持つ過去の衛星と比較しても有効面積が比較的大きく、また特に低エネルギー側の精度がよいため、今回の観測データは ULX の降着円盤の特徴を検証する上で最適である。

4 スペクトル解析

4.1 データリダクション

本研究では XIS 検出器による観測データの解析を行う。観測データには、衛星からの観測データ、地球を見ている時間帯、地球が発する磁気異常領域 (SAA) などの影響で観測に使用できないデータも含まれている。今回の研究では、較正情報をもとに、不要なデータ、質の悪いデータを取り除いた cleaned event というファイルを使用する。この cleaned event について、目的的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 X 線データ解析ソフト heasoft¹ のパッケージ XSELECT を使用する。図 2 はすざく衛星の XIS 検出器によって得られた M33 X-8 の画像である。対象天体 (以後ソース) の領域から X 線イベントを抽出することはもちろんであるが、このソースの領域には天体自身からの X 線の他

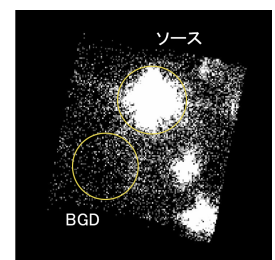


図 2: M33 X-8 の XIS 画像

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

に、宇宙全体からくる X 線背景放射および検出器雑音による X 線が混入している。この影響を差し引くため、特定の天体の存在しないバックグラウンド（以後 BGD）領域についてもデータを抽出する必要がある。

4.2 スペクトルの作成

図 2 の領域設定を元に XSELECT でソース、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き、天体自体の X 線スペクトルを作成した。天体やバックグラウンドなどの X 線源から実際に放射されているはずのスペクトルを観測されたデータから再現するためには、観測した望遠鏡や検出器によるスペクトルの変化を応答関数を用いて考慮する必要があるので、rmf(Redistribution Matrix File) と arf(Ancillary Region File) の 2 種類の応答関数を作成する。rmf は検出器のチャンネルを X 線光子のエネルギーに変換する行列であり、arf はエネルギーごとの望遠鏡の有効面積を記述するファイルである。

図 3 にソースと BGD を同時に表示した XIS3 のスペクトル、また、図 4 にソースから BGD を差し引いたスペクトルを示す。図中の黒いグラフがソースのスペクトルで、赤いグラフが BGD のスペクトルである。高エネルギー側のスペクトルに BGD の影響があったことがわかる。

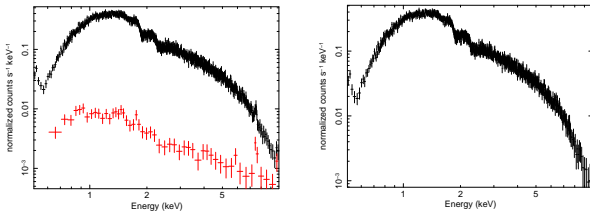


図 3: ソースと BGD の XIS3 スペクトル

図 4: BGD をひいたスペクトル (XIS3)

4.3 モデルフィット

作成したスペクトルを再現する放射モデルを χ^2 検定で検証する。まず、典型的な X 線放射モデルであるベキ関数 (power-law) モデル、標準降着円盤 [4] を近似した diskbb モデル [2]、およびこれらの足し合わせのモデルで評価した。power-law モデル、diskbb モデルでは自由度 1950 のもとで χ^2_{ν} (reduced χ^2) がそれぞれ 1.22、1.52 となり棄却した。diskbb+power-law モデルでは自由度 1948 に対し、 $\chi^2_{\nu} = 0.927$ でありデータを良く再現した。図 5 にスペクトルフィットの結果を示す。このモデルに基づき、放射光度は $L_x = 1.51 \times 10^{32}$ W と測定できた。ここで、エディントン限界光度を仮定すると (1) 式から、X-8 の BH 質量は $12M_{\odot}$ 以上と制限づけられる。一方、best-fit 値からは、降着円盤の内縁温度が $T_{in} = 1.6 \times 10^7$ K、内縁半径が $r_{in} = 34.5$ km と決まった。非回転 BH では、一般相対性理論により、 r_{in} はシュバルツシルト半径 $R_s (= 2GM/c^2)$ の 3 倍と予測されているため、X-8 の BH 質量は $3.8 M_{\odot}$ と計算できるが、これはエディントン限界を仮定した質量の下限の 1/3 程度である。すなわち、光度と半径から求めた質量に矛盾があり、diskbb+power-law モデルはスペクトルは再現するが、物理的に正しくないモデルとわかった。

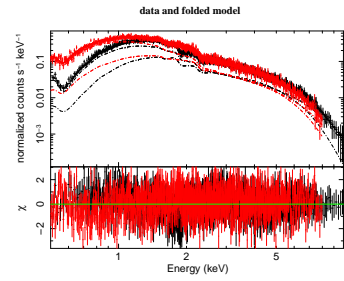


図 5: XIS1 および XIS0+3 の power-law+diskbb モデルによるスペクトルフィット結果。データとモデル (上)、およびデータとモデルの差 (下) を示す。

4.4 臨界降着状態の検証

ULX の解釈として、標準降着円盤が破れていて、高い質量降着率を持ってエディントン限界に近い光度で輝くスリム円盤状態にあるという理論がある [6]。標準降着円盤では、半径方向の温度勾配が $T \propto r^{-3/4}$ (r は中心の BH からの距離) であると仮定しているが、スリム円盤ではより緩やかな温度勾配 (極端な場合 $T \propto r^{-1/2}$) になることが理論から予測されている。これを検証するために温度勾配をフリーパラメータ p とした p-free disk というモデルで再現を試みた。図 6 に p-free disk モデルのスペクトルフィット結果を示す。 χ^2_{ν} は自由度 1920 に対し 0.932 となり、モデルがデータを再現することがわかった。図 7 に天体本来のスペクトルを示す。このフィットの結果 X-8 は $T \propto r^{-0.535}$ の温度勾配をもつことがわかった。これはスリム円盤の予測と一致し X-8 は臨界降着状態にあると結論できる。したがって X 線光度はエディントン限界かそれ以上である。§4.3 で求めた X 線光度と総合して考えると、M33 X-8 の正体は中質量 BH ではなく、 $10 M_{\odot}$ 程度以下の恒星質量 BH であることがわかった。

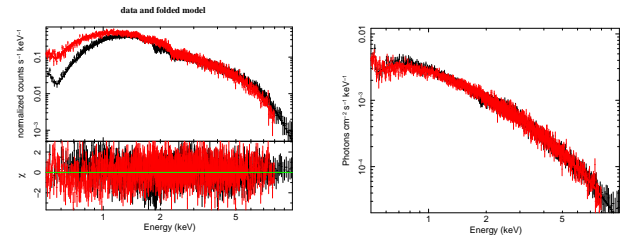


図 6: p-free モデル

図 7: 天体本来のスペクトル

5 まとめと結論

今回の解析の結果、M33 X-8 はエディントン限界に近い光度で輝く臨界降着状態にある恒星質量 BH であることがわかった。すざく衛星による詳細なスペクトル解析により、代表的な ULX の一つである M33 X-8 の正体が中質量 BH ではなく、臨界光度で輝く $10 M_{\odot}$ 程度の恒星質量 BH であることを明らかにした。

参考文献

- [1] Mitsuda, K. et al. 2007, PASJ, 59, 1
- [2] Mitsuda, K. et al. 1984, PASJ, 36, 741
- [3] Dubus, et al. 1997, ApJ, 490, 47
- [4] Shakura&Sunyaev,1973,A&A,24,337
- [5] Makishima, et al. 2000,ApJ,535,632
- [6] Watarai,K.,Fukue,J.,Takeuchi,M.,&Mineshige,S.2000, PASJ, 52, 133