

中間質量ブラックホール候補天体 M82 X-1 の X 線スペクトル解析

X-ray study of an intermediate mass black hole candidate M82 X-1

宇宙情報解析研究室 P07070 釣船 真司

指導教員：久保田 あや 准教授

1 背景と目的

ブラックホール (以後 BH と表記) は恒星質量 BH と大質量 BH の 2 種類が存在し、両者の間に関係があるかどうかは未だ不明である。近年、両者の中間の質量を持つ BH の候補と考えられる超光度 X 線天体が発見され、その正体の解明は BH 成長史にとって大きな意味をもつ。超光度 X 線天体 (ULX: Ultra Luminous compact X-Ray source) とは、大質量星の重力崩壊の結果として生じる BH の質量の理論的上限である $20M_{\odot}$ (M_{\odot} は太陽質量) のエディントン限界光度 L_{Edd} を超えて輝く、超光度天体コンパクト X 線源のことである。ここでエディントン限界光度とは、降着するガスにかかる重力と光の放射圧が釣り合う光度であり、質量降着で輝く BH の最大光度である。質量 M の BH の L_{Edd} は次式で表される。

$$L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{31} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ [J/s]}$$

本研究では、現在知られる ULX の中でも最も明るい天体、M82 X-1 のすぎく衛星による観測データを解析し、その放射機構を決定し、天体の正体に迫る。これにより、恒星質量 BH と超巨大質量 BH の関係を解明する手がかりを得ることを目指す。

2 すごく衛星による M82 X-1 の観測

M82 は距離 1200 万光年にある銀河で、星の形成が非常に活発であることからスターバースト銀河に分類されている。M82 X-1 は M82 の力学的中心から約 600 光年に位置する ULX で、あすか衛星による観測で X 線光度が 10^{36} J/s であり、少なくとも $700M_{\odot}$ の BH の可能性が示唆されている [1]。これは ULX の中で最も大質量であり、M82 X-1 は中質量 BH の可能性が最も高い天体と考えられている [2]。すぎく衛星は 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 [5] で、M82 を 2005 年 10 月 4, 19, 27 日、2007 年 9 月 24 日に観測した。すぎく衛星には 4 台の X 線 CCD カメラ (XIS0~3) と硬 X 線検出器 (HXD) が搭載されており、XIS0, 2, 3 は表面照射型 CCD、XIS1 は裏面照射型 CCD となっている。本研究では XIS のデータを解析した。

図 1 に 2007 年の観測で XIS によって得られた M82 の X 線イメージと可視光イメージを示す。図 1(a) 内の円はスペクトル解析に使う領域を示している。右にある円で囲まれた黒い空間が M82 であり、左にある円で囲まれた背景の一部は背景放射や検出器から発するバックグラウンドノイズ (以後 BGD と表記) を得るための領域である。この 2 カ所のデータを用いて解析を進めていく。

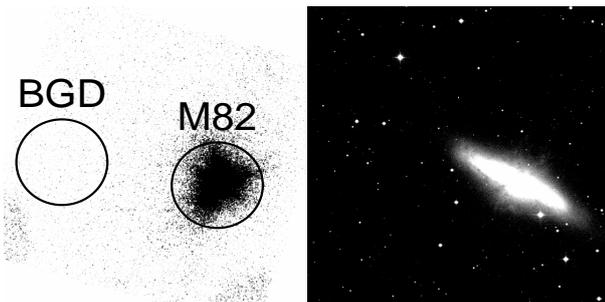


図 1: (a) X 線イメージ (b) 可視光イメージ

3 データリダクション

データからスペクトルを抽出するため heasoft¹ という X 線データ解析ソフトを使用する。前章で触れた M82 X-1 の領域と BGD の領域とで、別々にスペクトルを抽出する。この時、ライトカーブ (図 2) を観察して検出器の異常やその他観測に影響を与える事象が発生していないか確認したが、このライトカーブからは特に異常が発生している様子は見られなかった。次に検出器の応答関数を作成する。応答関数とはパルスハイトチャンネルとエネルギーの対応を記述する rsp ファイルとエネルギー毎の検出器の有効面積を記述する arf から成り、図 3 は作成した arf を示す。そして M82 X-1 のスペクトルから BGD のスペクトルを差し引き、M82 X-1 本来のスペクトルを得る (図 4)。

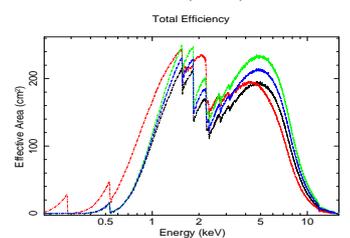
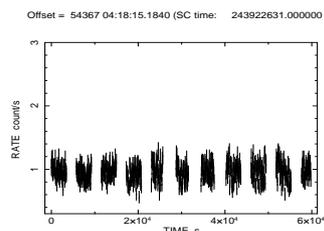


図 2: M82 X-1 のライトカーブ

図 3: 有効面積のエネルギー依存性を表すグラフ

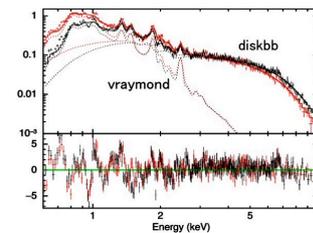


図 4: diskbb+vraymond の

ブ

4 2007 年のデータのスペクトル解析

4.1 XIS 全帯域スペクトル解析

2007 年の観測について、§3 で抽出したスペクトルを再現する放射モデルを決定する。図 4 に、得られた XIS スペクトルを光学的に薄い高温ガスによる放射を記述する vraymond モデルと M82 X-1 からの硬 X 線放射を表す diskbb モデルを足し合わせたモデルで評価した結果を示す。この結果から、M82 には 8.87×10^6 K の高温ガスが広がっており、放射されている X 線光度は 3.57×10^{33} J/s であると分かった。また、0.6~3keV はガス内の様々な成分からの放射が含まれているのに対し、3keV 以上は diskbb が優勢、すなわち M82 X-1 のみからの放射として取り扱えることが分かる。広がった放射とエネルギーの関係を確認するために、図 5 に 0.6~10keV と 3~10keV の帯域の比較画像を示した。全帯域の画像はやや広がった放射を示すのに対し、3keV 以上の硬 X 線は点源からの放射と理解できる。



図 5: 左は全帯域を、右はベストフィットモデル。黒は 3keV 以上を表示した画像 XIS0, 2, 3 を、赤は XIS1 を表す

す

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

4.2 標準的なスペクトル解析

§4.1 より、広がった X 線放射の寄与が少ない 3~10keV の領域についてスペクトルを評価する。ベキ関数モデル (power-law) および光学的に厚い標準降着円盤 [3] を近似した diskbb モデル [4] で評価した。 χ^2 値を比較すると、power-law モデルは 1189/1141、diskbb モデルは 1133/1141 で diskbb モデルの方がデータをより良く再現でき (図 6)、X-1 は熱的にカーブした放射スペクトルを示すことがわかった。

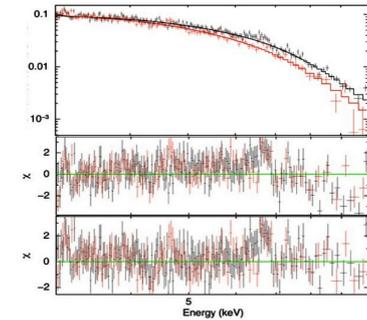


図 6: diskbb のスペクトル、power-law と diskbb の χ

diskbb のパラメータより、標準降着円盤の内縁温度 $T_{in} = 3.1 \times 10^7$ K、X 線光度は 3.25×10^{33} J/s と算出できた。X 線光度の値をエディントン限界光度と仮定すると、中心天体の質量は $M > 260M_{\odot}$ と推定できる。得られたパラメータの妥当性を評価するために、円盤の内縁半径が BH 周りの安定なケプラー軌道の最内縁である $3R_S$ ($R_S = 23.6 = 3M/M_{\odot}$ km はシュバルツシルト半径) と仮定して BH 質量を推定したところ $M = 8.3M_{\odot}$ となった。この値はエディントン限界による質量下限よりも小さく、標準降着円盤モデルは M82 X-1 の放射を再現する上で物理的に矛盾することがわかった。

4.3 降着円盤の詳細スペクトル解析

§4.2 より通常の降着円盤ではないと分かった。そこで、まず超高光度で実現すると考えられるスリム円盤の描像を検討した。標準降着円盤モデルは、降着するガスが運動エネルギーの半量を黒体放射として宇宙空間に解放すると仮定した理論モデルであり、エネルギー解放を解くことにより、BH から距離 r における円盤の局所温度 $T(r)$ が $T(r) \propto r^{-4/3}$ と得られる。一方、最近の降着円盤の理論モデルでは、質量降着率が高くなると放射によるエネルギー解放の効率が悪くなり、中心付近での温度上昇が標準円盤と比べて緩やかになることでスリム円盤に移行することが予測されている [7]。これを評価するために diskbb モデルを使用した。このモデルは、円盤の温度勾配 p を自由パラメータとして $T(r) \propto T^{-p}$ に従って黒体放射するというモデルである。フィッティングの結果 (表 1)、円盤の温度勾配 p が 0.75 より小さくなるというスリム円盤の理論的予測に沿った結果を得られた。スリム円盤と仮定して norm から質量を見積もると $M = 31M_{\odot}$ となるが、算出された X 線光度 $L = 3.75 \times 10^{33}$ J/s をエディントン限界光度と仮定したときの条件 $M > 288M_{\odot}$ を満たせない。よって、スリム円盤モデルによる評価は物理的に妥当ではない。

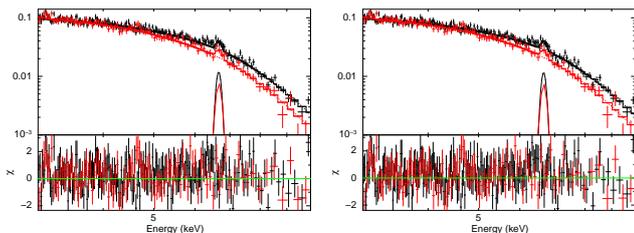


図 7: スリム円盤のベストフィットモデル
図 8: 逆コンプトン散乱のベストフィットモデル

次に標準降着円盤をおおった高温コロナによる逆コンプトン散乱の描像を考え、nthcomp モデル [6] を用いてスペクトルを再現した。表 1 に示したように、電子温度 2.6×10^7 K、光学的厚み $\tau = 17$ という比較的低温の分厚いコロナが円盤の上空に存在するという結果を得た。この描像ではコロナ下部の円盤は低温と仮定しているため、円盤のパラメータからそのサイズを見積もることはできないが、仮に円盤の温度が $T_{disk} < 4.6 \times 10^6$ K 以下であれば円

盤半径は 2500 km 以上となり、エディントン限界光度による質量下限 $> 287M_{\odot}$ は満たされる。

表 1: 詳細スペクトル解析の結果

パラメータ	2007/9/27		2005/10/19	
	スリム円盤	コロナ	スリム円盤	コロナ
円盤温度 [$\times 10^7$ K]	$3.58 \pm_{-0.35}^{+0.37}$	0.464(固定)	$4.13 \pm_{-0.4}^{+0.47}$	0.464(固定)
円盤の温度勾配 p	$0.66 \pm_{-0.04}^{+0.05}$	0.75(固定)	$0.64 \pm_{-0.02}^{+0.03}$	0.75(固定)
電子温度 [$\times 10^7$ K]		$2.62 \pm_{-0.19}^{+0.25}$	$2.85 \pm_{-0.18}^{+0.23}$	$15.7 \pm_{-0.64}^{+0.56}$
τ		$16.6 \pm_{-0.81}^{+0.7}$		
χ^2/dof	1085/1141	1082/1141	1709/1710	1703/1710
flux [$\times 10^{-18}$ J/s/cm ²]	2.80	2.79	4.08	3.93
L [$\times 10^{33}$ J/s]	3.75	3.74	5.46	5.26

※ flux と L は 0.01~100keV の範囲で求めた

5 パラメータの時間変化

これまでと同様の手法で、全 4 回 (§2 参照) の観測データを解析した。図 9 に X 線光度の時間変動を示す。各放射モデルの再現性と物理的な妥当性は全てのデータで大差なく、逆コンプトン散乱の描像で矛盾なかった。図 10, 11 に、観測された光度に対する電子温度 T_e およびコロナの光学的厚み τ の変化を示した。図 11 より、最も明るい状態を除いて、光度が高いほど電子温度が低くなり光学的厚みが大きくなる様子が見られる。恒星質量 BH では、光度が高くなるとコロナが卓越する very high state (VHS) という状態に移行することが知られており、この状態が M82 X-1 でも実現していると考えて矛盾ない。面白いことに、最も光度が高い 2005 年 10 月 19 日の観測データでは、その他のデータと異なり、最も明るいにも関わらず τ が突然小さくなった様子が見られた。このことから、光度が 2.3×10^{33} J/s あたりで標準降着円盤を高温コロナがおおうという描像から、理論的に予測されるエディントン限界を超えて輝く臨界降着状態に移行するという可能性が考えられる。

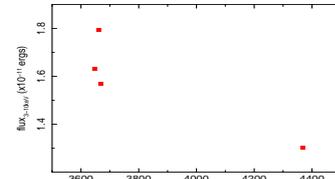


図 9: M82 X-1 の強度変動

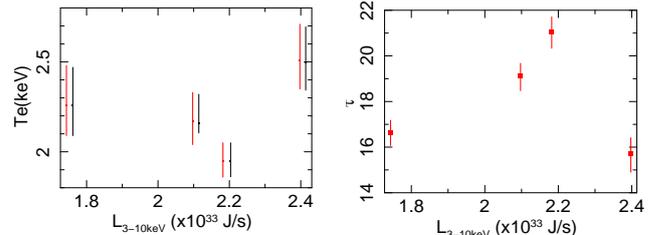


図 10: 横軸 L 、縦軸 T_e グラフ
図 11: 横軸 L 、縦軸 τ グラフ
フ。 $T_{bb} = 0.1$ (赤), 0.4 (緑)

6 まとめと考察

M82 X-1 のすざくによる観測データを全て解析し、観測された大光度に対して標準降着円盤モデルによって推定される BH 質量は非常に小さくなってしまふことを示した。より詳細に解析した結果、低温の円盤の上空に光学的厚み $\tau = 17$ 程度の分厚いコロナが存在すると考えれば BH 質量とスペクトルを矛盾なく説明できることがわかった。本研究から M82 X-1 は $340 M_{\odot}$ 以上の中間質量 BH と考えて矛盾ない。また、スペクトル状態が BH の高光度状態に対応すること、 2.3×10^{33} J/s 付近をしきい値に臨界降着流が実現している可能性が示唆されることから、 $340 M_{\odot}$ を大きく超えるような BH は考えにくい。今後は、XMM-Newton など他の衛星の観測データも援用し、光度に対するスペクトル変化を詳細に研究し、臨界降着流が実現するしきい値を決定することが課題と考える。

参考文献

- [1] Miyawaki, R. et al. 2009, PASJ, 61, 263
- [2] Matsumoto, H. et al. 1999, PASJ, 51, 321
- [3] Shakura & Sunyaev, 1973, A&A, 24, 337
- [4] Mitsuda, K. et al. 1984, PASJ, 36, 741
- [5] すざくヘルプ編『すざく』ファーストステップガイド
http://cosmic.riken.jp/suzaku/help/guide/fstep_web/fstep.html
- [6] Zdziarski, Johnson & Magdziarz 1996, MNRAS, 283, 193
- [7] Watarai, K. et al. S.2000, PASJ, 52, 133
- [8] Kubota, A. et al. 2004, ApJ, 601, 428-438