

すざく衛星によるブラックホール天体 GX339-4 の X 線スペルトル解析

宇宙情報解析研究室：P05069-2 砂川真哉

指導教員：久保田 あや

2009 年 1 月 24 日

1 ブラックホールと X 線

ブラックホール (以降 BH) と呼ばれる天体は光さえも吸収する強い重力を持っている。故に可視光でその姿を捉えたり観測するのは難しい。そこで観測には X 線が用いられる。X 線とは電磁波の一種であり、波長が短くエネルギーが高いという特徴があり (図 1)、図 1 の様に BH が恒星と近接連星系を形成していると、BH からは強い X 線が放出されていることが観測から明らかになってきた。BH の周りには伴星から常にガスが引き寄せられている。このガスは角運動量を持っているため、BH の周りに降着円盤を形成する。本来このケプラー回転の遠心力と呼ばれる力と BH による重力が釣り合い降着円盤は衛星のように BH の周りでその回転を維持するのだが、落ち込むガス同士の摩擦によりその角運動量が失われ、結果ガスは BH に吸い込まれる。この摩擦によって、ガスは数千万にまで熱せられ、黒体放射で X 線を放射する。

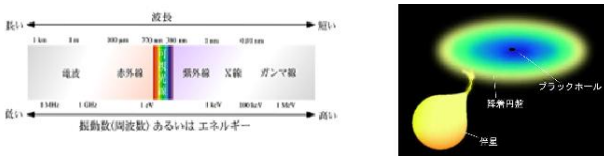


図 1: (左) 電磁波のスペクトル (右)BH イメージ

2 X 線天文衛星「すざく」

本研究では「すざく」衛星 [1] の観測データを用いる。現在いくつかの X 線天文衛星があるが、すざく衛星は 0.3-10keV を観測する X 線 CCD カメラ (XIS) と 10-300keV を観測する硬 X 線検出器 (HXD) によって、0.3-300keV という非常に広いエネルギー帯域で観測ができるという特徴を持つ [2]。BH からの X 線放射は降着円盤からの 10keV 以下の黒体放射と高温電子による数 100keV までの放射を特徴とすることが知られており、すざく衛星で実現された広帯域の観測は BH 研究にとって画期的である。

3 GX 339-4 のすざくによる観測

すざく衛星で観測された恒星質量 BH は 7 個あり、この中で本研究では GX 339-4 という天体を解析することにした。GX 339-4 は 1973 年に「OSO-7」衛星の MIT 検出器によって発見された BH 候補天体である [3]。図 2 に RXTE 衛星の全天観測装置 (ASM) によって得られたこの天体の 2 - 10keV の X 線カウントレートの変動を示す。

このように X 線光度が激しく変動しており、明るさに応じてさまざまなスペクトル状態をとることが知られている。2007 年 02 月 12 日 - 15 日、すざくによる観測が行われた。図 2 に黒丸で「すざく」観測を示した。非常にあかるい状態で観測が行われたことがわかる。

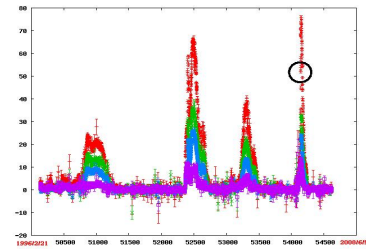


図 2: GX 339-4 の時間変動

4 スペクトル解析

スペクトル解析のためのフローチャートを図 3 に示す。

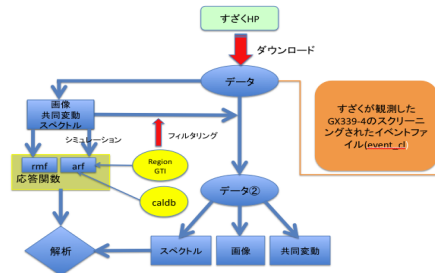


図 3: 解析フローチャート

4.1 スペクトルの抽出

次のページの図 5 に XIS0 で得られた画像 (左)、強度変動 (中) を示す。これに基づいて領域および適切な観測時間でフィルターをかけ、スペクトルを抽出する。そうしてフィルタリングしたスペクトルを横軸をエネルギーとして表示させたものが図 4 である。

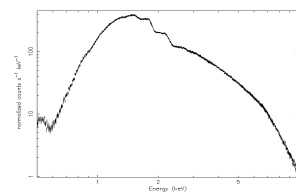


図 4: XIS0 のスペクトル

4.2 応答関数の作成

スペクトルを解析するには2種類の応答関数 (arf,rmf)が必要になる。rmfとは検出器のチャンネルとエネルギーの対応を与える行列であり、arfとは検出器の検出効率や望遠鏡の有効面積を与えるものである。rmfとarfはすざくのキャリブレーションデータベース、観測日時のスペクトル抽出領域にもとづいて xisrmfgen、xissimarfgen シミュレーションを行い作成する。また、図5(右)にそれらに作成した XIS0の有効面積のエネルギー依存性を示す。

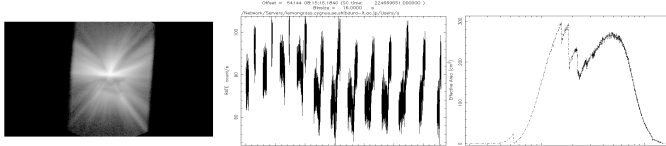


図 5: 天体イメージ、強度変動、エネルギー依存性

4.3 モデルフィット

作成したスペクトルがどのような X 線放射モデルで再現できるかを xspec というスペクトル解析ツールを用いて検証し、降着円盤の物理状態に迫る。モデルの妥当性は χ^2 検定で検証する。まず、最も単純なモデルとして power-law モデルおよび diskbb(MCD) モデルを試みた。power-law は BH に落ちる物質が少ないときのモデルでスペクトルは $A(E)=KE^{-\Gamma}$ で表される。K は単位時間・面積・エネルギーあたりの放射光子量で χ^2 は無次元量である。diskbb モデルは標準降着円盤モデル [4] を近似したモデルで、最内縁で摩擦 0 の境界条件を無視し温度分布を持つ黒体放射として扱うモデルである。図6(左)および(中)は二つのモデルのフィット結果で、このようにモデルとデータのずれ(図の下段)は全エネルギー領域に渡って顕著であり、実際 χ^2/dof の値は power-law モデルで 8.52、diskbb モデルで 65.02 であり、データを再現できていない。そこで diskbb+power-law モデルを試すと、結果 χ^2 値が 2.13 と 1 に近い値をとり再現出来たと言える。星間吸収の水素密度は $N_H=6.69 \times 10^{21}(\text{cm}^{-2})$ 、このモデルに基づき 0.5-10keV の X 線強度は $12.13 \times 10^{-8}(\text{erg/s/cm}^2)$ 、diskbb の最内縁の温度は $T_{in}=0.79\text{keV}$ 、power-law の光子指数は 2.22 と決定出来た。

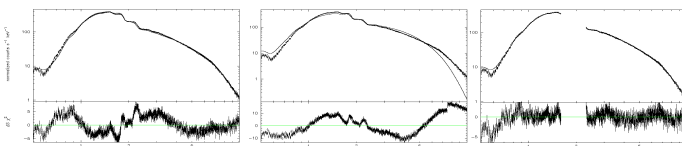


図 6: power-law , diskbb , power-law+diskbb

4.4 状態

diskbb+power-law モデルに基づいて検出器の応答関数の影響をとりおいた天体自体のスペクトルをモデルとともに示す(図7)。この図のように GX339-4 の今回の観測は、卓越した power-law 放射と、それにうもれた diskbb

で再現されている。これは、文献 [5] に照らすと BH にガスが非常に多く落ち込み 0.79keV 程度の標準降着円盤の周りを数 10keV の高温のガスが分厚くとりまく very high state という状態にある事が分かった。GX339-4 で 2keV 以下から数 10keV に渡って very high state のデータが得られたのは、今回が初めてであり、また GX339-4 で very high state は「すざく」による BH 観測の主要なテーマでもある。

4.5 考察

GX339-4 の距離を $D=4\text{kpc}$ として [6]、X 線光度 L_x を $L_x=4 \pi D^2 F$ から見積ると $2.32 \times 10^{38}(\text{erg/s})$ と求まる。GX339-4 の BH 質量は測定されていないが平均的な $7M_{\text{Solar}}$ (M_{Solar} は太陽質量) を採用すると、降着ガスの重力と放射圧が釣り合うエディントン限界光度は $L_{\text{Edd}}=8.75 \times 10^{38}(\text{erg/s})$ となる。観測で得られた L_x は L_{Edd} の 25% 程度であり、very high state としては暗めである。今回の解析ではスペクトルファイルを作成するにあたってフィルタリングした範囲リージョンをとったとき、対象天体(GX-339)の X 線放射以外の領域も観測対象としているためと考えられる。今後はより正確な補正を行い、正しい L_x を求めていきたい。これにより、降着円盤の温度と形状だけでなくその大きさにも迫る事が出来る。

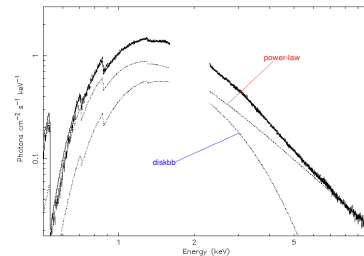


図 7: XIS0 モデルフィット

5 まとめと今後の課題

衛星「すざく」による GX339-4 の解析を行いこの天体が very high state であることがわかった。温度は 0.79keV、光子指数は 2.22 と決定出来た。観測時の GX339-4 の明るさはエディントン限界光度の 1/4 となったが今後は観測領域の arf をより正確に作成し、X 線光度を正確に推定していくことが必要である。また、今回は解析できなかった HXD のデータも解析を行いたい。これにより、power-law 放射を統括する高エネルギープラズマと降着円盤の配置も決定できるだろう。

参考文献

- [1] Mitsuda, K. et al. 2007, PASJ, 59, 1
- [2] すざくヘルプ編「すざく解析マニュアル」
- [3] Markert, T. H., 1973, ApJL, 184, L67
- [4] Shakura, N. I., Sunyaev, R. A. 1973, A&A, 24, 337
- [5] 久保田 D 論 (2000)
- [6] Jeffrey E. McClintock 「Black Hole Binaries」