

ISS搭載NICERによるatollタイプの中性子星X線連星4U1608-52の研究

X-ray study of 4U1608-52 observed with NICER

X線天文学研究室 BP19061 伊藤 和樹

指導教員：久保田 あや 教授

1 背景と目的

恒星は進化の過程の最終段階で超新星爆発を起こす。この時もとの恒星の質量が太陽質量の8倍以上であれば中心に中性子星が、30倍以上だとブラックホールが残る[1]。中性子星は半径が約10km、質量が太陽の1.4倍程度の高密度星であり、その密度は1立方センチメートルあたり10億トンにもなる。また、多くの恒星は単独ではなく連星で、お互いに接近した連星系を近接連星系といい、その中でも磁場の弱い中性子星もしくはブラックホールと低質量星との近接連星系のことを低質量X線連星系(Low Mass X-ray Binary、以降LMXB)という[2]。本研究では国際宇宙ステーション(ISS)に搭載されたNICER(Neutron star Interior Composition Explorer)検出器で観測された中性子星LMXBの4U1608-52のデータを用いて、この天体のスペクトルと時間変動を解析し、この天体へのガス降着の仕方をさぐる。

2 低質量X線連星系4U1608-52

4U1608-52は質量が太陽質量の 1.74 ± 0.14 倍、半径が 9.3 ± 1.0 kmの中性子星を伴星としたLMXB(NS-LMXB)であり、地球からの距離は $5.8^{+2.2}_{-1.9}$ kpc(1.7897×10^{17} km)である[3]。この半径の値は文献[3]より、この天体のタイプI型X線バーストの時間分解X線スペクトル解析から求められている。NS-LMXBはカラーカラーダイアグラム(CCD)とカラーインテンシティーダイアグラム(CID)上での振る舞いから、光度の高いZ天体と比較的穏やかな明るさのatoll天体に別れるが、4U1608-52はatoll天体に分類される[5]。

3 NICERによる4U1608-52の観測

NICERはNASAのX線望遠鏡で、ファルコン9フル・スラストにて2017年6月3日に打ち上げられISSに設置された。また、NICERの主要科学観測機器はXTI(X-ray Timing Instrument)と呼ばれ、56組のX線集光光学系(XRC)とシリコンドリフト検出器(SDD)で構成されており、時間分解能は100nsec、エネルギー分解能は2%である[4]。NICERによる4U1608-52の観測は2017年6月24日から2020年9月14日まで合計193回の観測が行われている。

4 スペクトル解析

4.1 データの分類

解析にあたってまずはCCDを作成し、点の分布によってデータの分類を行った。CCDを作成するためにNICERによるすべての観測データをNASAの公開サーバからダウンロードし、このデータから全エネルギー帯域(0.5-10keV)、低エネルギー帯(0.5-4keV)、中エネルギー帯(4-5keV)、高エネルギー帯(5-10keV)のカウントレートを取得し、ハードカラーとソフトカラーを算出した。作成したCCDを図1に示す。また各点について天体の明るさ(カウントレート)に基づいて色付けをした。分類は点の集合の中心部分にあ

る代表的な点の一つを決め、それを基準として座標の近さと色で示された温度を基準として分類した。分類の概略図を図1に示す。

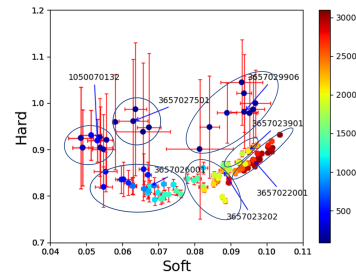


図1: 4U1608-52のCCD

4.2 diskbb + bbodyrad (モデル1a、1b)[7]

LMXBは中性子星の周りからの質量降着により降着円盤が生成される。このとき降着ガスは重力エネルギーを解放しながら円盤に沿って流れ込み、解放された重力エネルギーは熱エネルギーに変換され円盤の表面から黒体放射として放出される。円盤の温度は中性子星に近づくにつれて高くなる。円盤から中性子星にガスが落ちていく過程で半分の重力エネルギーの半分以上を黒体放射として解放し、残りの半分は中性子星表面に落下する際に解放され黒体放射でX線を放出する。典型的なLMXBのスペクトルはこの星表面(bbodyradモデルで再現)と円盤表面からの多温度黒体放射(diskbbモデルで再現[7])によって説明できる[6]。このモデルを1aとする。また、スペクトルに盛り上がりなどの特徴的な構造が表れる場合にはgaussianモデルを追加する(モデル1b)。このモデル1を図2に示す。

4.3 nthComp (モデル2)[8]

降着率が低いときには高温プラズマ低エネルギー光子(種光子)が入射して高エネルギー側にたたき上げられる逆コンプトン散乱によるモデル(nthComp[8])で表される。種光子の起源は中性子星表面もしくは降着円盤が考えられる。このモデル2を図2に示す。

4.4 nthComp + diskbb (モデル3)

高温プラズマ+標準降着円盤モデルは、標準降着円盤より内側に希薄なプラズマが存在し、その外側に標準降着円盤が存在していることを想定したモデルである。また、降着円盤の最内縁の温度と高温プラズマの温度を合わせるために、diskbbのパラメータである円盤の最内縁の温度(kT_{in})とnthCompの入射光子の黒体温度(kT_{bb})を同じ値とした。このモデル3を図2に示す。

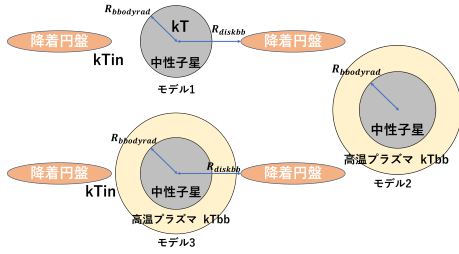


図 2: モデルのイメージ図

4.5 解析結果

図 1 で示した代表点それぞれについて以上のモデルでフィットし、最も合致した結果についてパラメータを表 1 に、各モデルのスペクトルを以下に示す。モデルの検証にあたっては、中性子星の半径、標準降着円盤の内縁半径、カイ二乗値を基準として評価した。またこの結果よりすべてのデータについて同様にモデルフィットも行った。代表点のデータから、天体が比較的明るい場合 (エディントン限界光度比 10% 以上) と暗い場合でモデルが大別できることがわかった。明るい場合には標準降着円盤および黒体放射の影響が大きく、暗い場合には逆コンプトン散乱による影響が大きい。モデル 1 でフィットしたデータにおいて半径が理論値よりも大幅に小さく算出されたが、天体までの距離の誤差を考慮しモデル 1 が最も適当だと考えた。モデル 1、3 において中性子星の半径と標準降着円盤の内縁半径が物理的に成立するモデルを求めることができた。

obsid	1050070132	3657023202	3657029906
model	モデル 3	モデル 1	モデル 2
R(bbodyrad)	$16.00^{+2.00}_{-2.00}$	$5.45^{+0.43}_{-0.45}$	$18.0^{+3.00}_{-1.00}$
kT		$1.76^{+0.06}_{-0.05}$	
R(diskbb)	$25.0^{+9.00}_{-2.00}$	$16.72^{+1.04}_{-1.00}$	
Tin	$0.57^{+0.07}_{-0.05}$	$1.07^{+0.04}_{-0.04}$	
kT_e	$1.73^{+0.47}_{-0.28}$		$4.79^{+4.78}_{-1.69}$
kT_bb	$0.57^{+0.07}_{-0.05}$		$0.51^{+0.02}_{-0.05}$
Lx/Ledd	0.046	0.287	0.023
χ^2/dof	436.35/400	412.36/401	391.33/401

表 1: パラメータ

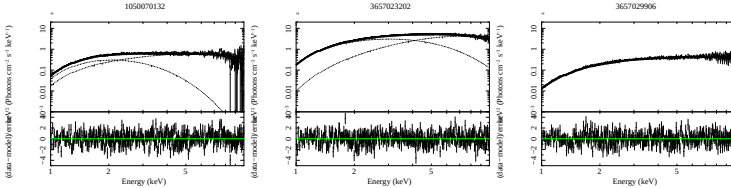


図 3: モデル 1(左) モデル 2(中) モデル 3(右)

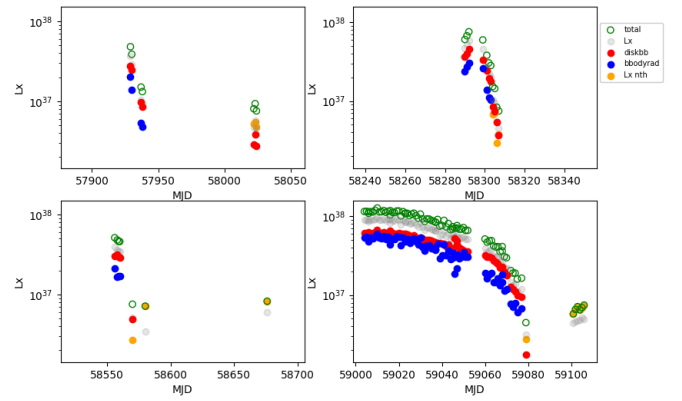


図 4: 縦軸：明るさ 横軸：時間変動

明るさと中性子星の半径の相関図を図 5(左) に、明るさと円盤の内縁半径の相関図を図 5(右) 示す。また温度と明るさの相関図を図 6 に示す。図 5 より今回の解析では比較的明るい状態 (モデル 1) では半径が中性子星の理論値 (10km) より小さく、暗い状態 (モデル 2、3) では大きく算出された。円盤の半径はどのモデルでも比較的安定しているのに対し、中性子星の半径は変動が大きい。これは明るい状態の中でも特にモデル 1 においては中性子星の一部しか明るい部分が存在しておらず、モデル 2 においては円盤を含めて高温プラズマに覆われている状態、モデル 3 においては中性子星と円盤の内側付近を高温プラズマが覆っている状態だと考えられる。

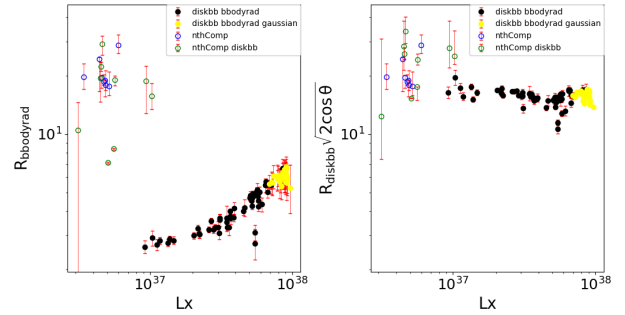


図 5: 縦：中性子星の半径 (左) 円盤の半径 (右)
横：明るさ

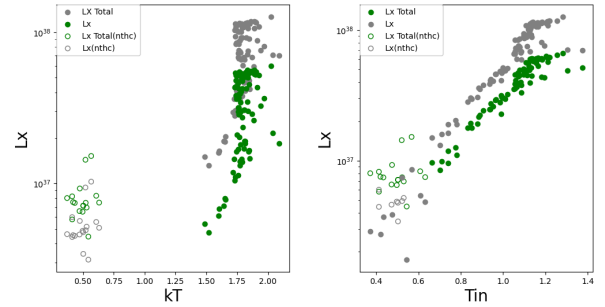


図 6: 縦：中性子星の温度 (左) 円盤の温度 (右)
横：明るさ

5 考察とまとめ

天体の明るさの時間変動を図 4 に示す。xspec の flux コマンドにより 1.0-10.0keV の X 線光度 Lx を求めたものが (灰)、diskbb の全エネルギー範囲の光度 Ldisk が (赤)、bbodyrad の全エネルギー範囲の光度 Lbb が (青)、明るさの合計が (緑)、nthcomp の全エネルギー範囲の光度 Lnthc が (橙) である。total(緑) の明るさが Lx(灰) より明るくなっているのは求めた範囲の違いによるものである。図 4 よりモデル 1、2 においては標準降着円盤の明るさのほうが黒体放射より明るい状態が続いていることがわかる。

References

- [1] 野本憲一 シリーズ現代の天文学 (日本評論社) 第 7 巻 恒星
- [2] 岡村定短 シリーズ現代の天文学 別巻 (日本評論社) 天文学辞典
- [3] Tolga Guver 2010 The Astrophysical Journal 712:964-973 p1
- [4] Gendreau and Arzoumanian 2017, Nature Astronomy 1, 895
- [5] van der Klis "A review of rapid X-ray variability in X-ray binaries" in Compact Stellar X-ray sources", eds by Lewin & van der Klis, Cambridge University Press
- [6] 小山勝二・嶺重慎 シリーズ現代の天文学 (日本評論社) 第 8 巻 ブラックホールと高エネルギー現象
- [7] Mitsuda et al. 1984, PASJ, 36, 741
- [8] Zdziarski et al. 1996, Soc, 281, 201