

国際宇宙ステーション搭載 NICER による低質量 X 線連星系 CygX-2 の研究

X-ray study of Low-Mass X-ray Binary CygX-2 with NICER

X 線天文学研究室 BP17003 池谷 智広

指導教員：久保田 あや 教授

1 背景と目的

中性子星とは超新星爆発の発生した際に形成される星であり、半径およそ 10km、密度は 1cm^3 あたり数億トンにもなる [1]。また、その中性子星と恒星が連星系をなしている、恒星から中性子星にガスが降着し、中性子星の周りに降着円盤という回転ガス円盤を作る。ガスは摩擦により高温に熱せられ X 線を放射する。CygX-2 は X 線観測の当初から知られている中性子星と低質量の恒星からなる低質量 X 線連星系 (LMXB) であり、はくちょう座に位置し、地球からの距離は 26000 光年と見積もられている [2]。

本研究では宇宙ステーション搭載の X 線観測装置 The Neutron Star Interior Composition Explore Mission (NICER) で観測された LMXB である CygX-2 のデータのスペクトルと時間変動解析を行った。これにより、明るさによる円盤の状態、すなわち物質降着の仕方の違いを定量的に評価することを目指す。

2 NICER による CygX-2 の観測

NICER は 2017 年 6 月 3 日に SpaceX Falcon 9 ロケットに搭載され、2017 年 6 月 16 日に国際宇宙ステーション (ISS) に配備された NASA の X 線天体観測装置である。X 線を集める 56 個の X 線集光系とシリコンドリフト検出器により、0.2~12.0keV の X 線帯域を広い有効面積 (1.5keV で 1900cm^2) で観測できる [3]。特に時間分解能は 100 ナノ秒を達成し、短時間変動を特徴とする高密度 X 線天体の時間変動解析に最適の検出器であるといえる [4]。

CygX-2 の NICER による観測は 2017 年 6 月~2019 年 9 月にかけて 71 回行われた。図 1 に、ISS 搭載の全天 X 線監視装置 MAXI で得られた CygX-2 の 100 日間のカウントレートの長期時間変動を横軸修正ユリウス日 (MJD) で示す。本研究で解析を行う NICER での観測日 (MJD58036、MJD58043、MJD58047、MJD58053、MJD58079) を図 1 に赤で示した。時期の早い観測から順に、観測 1,2,3,4,5 とする。

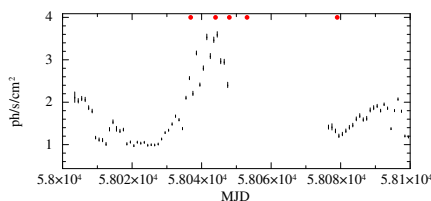


図 1: MJD58000-MJD58100 の MAXI による時間変動及び CygX-2 の解析時期 (赤)

3 スペクトル解析

スペクトルの解析では NASA の XSPEC で行う。その解析をする際に、CygX-2 のデータは NASA の HEASARC Browse で検索しダウンロードを行い [5]、また有効面積と

エネルギー較正を記述したファイルのダウンロードを行う。次に CygX-2 のデータから XSELECT でスペクトルファイルを作成する。この作成したスペクトルには天体から放射された X 線だけでなく、周囲からの漏れ込み (バックグラウンド) が含まれるため、天体のみからの放射を議論するためのバックグラウンドスペクトルを作成した。これらを用いて、スペクトルの解析を行った。

3.1 bbodyrad+diskbb(モデル 1) による解析

明るい LMXB の典型的なスペクトルモデルである黒体放射 (blackbody) と標準降着円盤 [6] を近似した diskbb モデル [7] でスペクトルの再現を試みた (図 2 左)。diskbb のパラメータは円盤の最内縁の温度 kT_{in} と円盤の内縁半径 $R_{\text{in}}\sqrt{\cos i}$ である。ここで、 i は円盤の傾斜角である。また、天体から放射された X 線は地球に到達するまでの間に星間ガスによって吸収を受ける。この吸収を考慮するため、tbabs というモデルを用いた。tbabs のパラメータは天体から地球までの間に存在する水素の柱密度 N_H である。この解析の結果、観測 1-5 の χ^2_{ν} 値は自由度 419 に対して、1.591-2.123 であり、このモデルでは再現しないことが分かった。

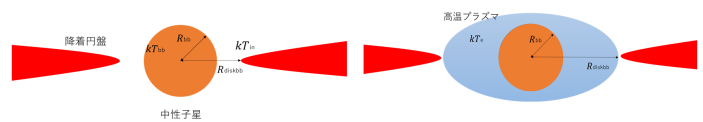


図 2: モデル 1(左) とモデル 2(右) の概念図

3.2 nthcomp+diskbb(モデル 2) による解析

次に、黒体放射を行う中性子星が高温のプラズマに囲まれ、その外側に標準降着円盤が存在するモデルで再現を試みた (図 2 右)。標準降着円盤はモデル 1 と同様に diskbb モデル、高温プラズマは nthcomp モデル [8] を用いた。低エネルギーの光子が高温のプラズマに入射し、逆コンプトン散乱され高エネルギー側にたたき上げられるというモデルで、プラズマの電子温度 (kT_e) 以下のエネルギーではべき関数 (power-law) 型のスペクトルを示す。パラメータは電子温度 kT_e の他に、入射光子の黒体温度 kT_{bb} 、power-law の光子指数 Γ 、及び normalization である。この解析の結果、観測 1-5 の χ^2_{ν} 値は自由度 417 に対して、値は 0.821-0.599 となるため、このモデルはデータを再現した。図 3 に観測 1 で得られたスペクトルとベストフィットモデルを示す。図の下段はモデルとデータの差異である。1.0keV 付近は較正が不十分であることから解析では除外している。表 1 に各観測のベストフィット値を示す。また単位時間に天体から放射される X 線のエネルギーを X 線光度 L_X と呼ぶが、CygX-2 における 0.6-10.0keV の各観測の X 線光度も同じ表に示した。天体が輝ける最大光度をエディントン限界光度 L_{Edd} と

呼び、これは降着するガスに働く重力とガス中の電子に働く光子の輻射圧の釣り合いで決まるため、天体の質量に比例する。質量が太陽の 1.4 倍の中性子星ではエディントン限界光度は 2×10^{31} W である。観測 2 が最も明るく L_X は L_{Edd} の 85% に達する。観測 1,3,4 は同じ程度の明るさで L_{Edd} の 75%、最も暗い観測でも 30% であり、期間を通して CygX-2 が明るい LMXB であることが分かる。図 4 には、全ての観測で検出器の有効面積を補正したスペクトルの比較を示した。観測 1,2,3,4 はほぼ同様な形で、観測 5(橙) は全体に放射強度が低いものの 10keV 付近で他の観測とほぼ同じ強度である。これは観測 5 で電子温度が高いこと (表 1) と一致する。

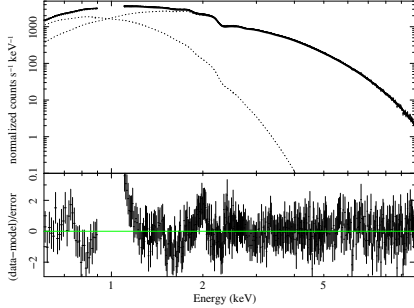


図 3: 観測 1 のスペクトルとモデルの比

表 1: パラメータの時間変化

	Unit	観測 1	観測 2	観測 3	観測 4	観測 5
L_X	W	1.498E+38	1.718E+38	1.492E+38	1.477E+38	6.217E+37
L_X/L_{Edd}		7.491E+06	8.589E+06	7.461E+06	7.384E+06	3.108E+06
nH	$10^{22}/\text{cm}^2$	$0.254^{+0.011}_{-0.011}$	$0.253^{+0.009}_{-0.004}$	$0.250^{+0.008}_{-0.008}$	$0.255^{+0.009}_{-0.008}$	$0.252^{+0.010}_{-0.010}$
Tin	keV	$0.284^{+0.016}_{-0.016}$	$0.291^{+0.013}_{-0.012}$	$0.290^{+0.013}_{-0.012}$	$0.288^{+0.013}_{-0.012}$	$0.267^{+0.014}_{-0.012}$
$R_{\text{disk}}\sqrt{\cos i}$	km	$165.9^{+25.73}_{-21.11}$	$171.1^{+19.75}_{-17.16}$	$162.3^{+17.27}_{-15.28}$	$167.6^{+18.53}_{-16.63}$	$120.5^{+15.95}_{-14.16}$
kT_{bb}	keV	$0.532^{+0.028}_{-0.020}$	$0.545^{+0.024}_{-0.021}$	$0.535^{+0.018}_{-0.019}$	$0.540^{+0.021}_{-0.021}$	$0.466^{+0.023}_{-0.022}$
kT_e	keV	$1.809^{+0.059}_{-0.058}$	$1.787^{+0.039}_{-0.035}$	$1.896^{+0.037}_{-0.033}$	$1.697^{+0.037}_{-0.033}$	$2.436^{+0.076}_{-0.064}$
Γ		$1.833^{+0.047}_{-0.047}$	$1.883^{+0.039}_{-0.035}$	$1.878^{+0.031}_{-0.028}$	$1.887^{+0.042}_{-0.037}$	$1.721^{+0.020}_{-0.018}$
R_{bb}	km	$93.90^{+8.641}_{-9.938}$	$97.20^{+6.022}_{-5.493}$	$92.72^{+5.187}_{-4.827}$	$91.98^{+5.635}_{-5.345}$	$72.94^{+5.438}_{-5.097}$
τ		8.395	8.275	8.014	8.511	7.423
y		0.998	0.958	0.953	0.962	1.052
$\chi^2_{\nu}(\text{dof})$		0.821	0.513	0.472	0.722	0.599

4 高温プラズマの性質と円盤の配置

図 4 から、エネルギー放出の大部分は高温プラズマによってなされているので (図 4)、プラズマの物理量をより定量的に評価するため、以下の手順で入射光子の放射領域のサイズ R_{bb} とプラズマの光学的厚み τ 及び、コンプトンの y パラメータ (逆コンプトン散乱のパワー) を求めた。nthcomp は半径 R_{bb} の球面からの放射がコンプトンされる。それを用いて、光子強度を $p[\text{photon}/\text{cm}^2/\text{s}]$ 、地球から CygX-2 の距離を D として R_{bb} を求める。またその際に p は xspec の flux コマンドの光子強度を用いる。

$$R_{\text{bb}} = \sqrt{\frac{p}{0.0025186 \frac{\text{photons}}{(\text{s} \cdot \text{cm}^2)}}} \times \frac{D}{10 \text{ kpc}} \quad (1)$$

次に nthcomp の光学的厚みで τ を求める。

$$\tau = \frac{-3 + \sqrt{9 + \frac{12}{q(\Gamma^2 + 3\Gamma)}}}{2} [9] \quad (2)$$

ここで q は電子の静止質量エネルギーに対する電子温度の比 ($q = \frac{kT_e}{m_e c^2}$) である。また y パラメータは電子のエネルギーと散乱回数で決まるので、 $\max(\tau, \tau^2)$ とかける。これから降着率の低い状態 (観測 5) は、高降着率の状態に比べて、プラズマの光学的厚みは薄いものの、エネルギーが相

対的に高くなっていることがわかった。得られた結果を表 1 に追記した。

$$y = 4q\max(\tau, \tau^2) \quad (3)$$

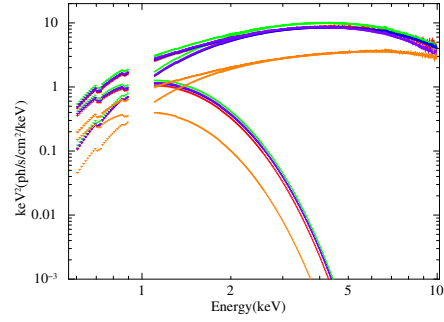


図 4: 観測 1(赤), 観測 2(緑), 観測 3(青), 観測 4(紫), 観測 5(橙)

5 まとめと考察

本研究ではモデル 1 よりモデル 2 の方が一致したため、モデル 2 に着目して解析を行った。また表 1 から、観測 1–5 は中性子星の半径と中性子星から円盤までの距離で $R_{\text{bb}} < R_{\text{disk}}\sqrt{\cos i}$ となり、矛盾はないが、第 1 章で記述した通り中性子星の半径は 10km に対し、本研究では $R_{\text{bb}} \gg 10$ と矛盾が生じている。この矛盾点を解消するべきシナリオが 2 つ考えた。以下に記載する (図 5)。シナリオ 1: 高温プラズマの中心部が広い範囲で $\tau \gg 1$ となっており、黒体放射のように振る舞っている。シナリオ 2: 高温プラズマに円盤も入り込んでおり、タネ光子の数を増やしている。

次にスペクトル解析の結果から、明るさによって温度が異なり、明るくなるとプラズマは低温になり、黒体放射及びプラズマの範囲が広がる (図 5 上)。一方、暗くなるとプラズマは高温になり、黒体放射及びプラズマの範囲が狭くなる (図 5 下)。

本研究により、高光度状態の LMXB ではスペクトル状態は高温プラズマの光学的厚みと温度の違いとして説明することができることがわかった。これまで複数回の観測は RXTE 衛星などで行われてきたが、エネルギー下限が 3keV 程度であり、円盤とプラズマのパラメータを独立に決めることが困難であった。今回は NICER を用いることで、0.5keV までの詳細なスペクトルの発展を追うことができた。

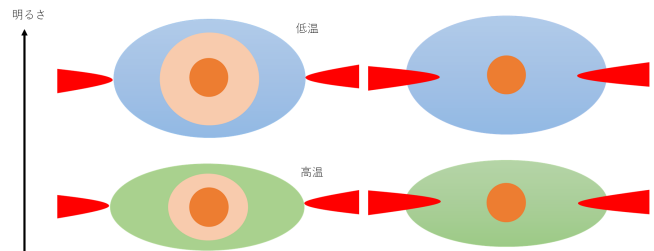


図 5: シナリオ 1(左) とシナリオ 2(右)

References

- [1] X 線を探る宇宙 小山勝二 初版第三刷 p.25
- [2] Hasinger et al. 1990, A&A, 235, 131
- [3] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/mission_guide/
- [4] Elizabeth Gibney Nature ダイジェスト Vol.14 No.9
- [5] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl>
- [6] Shakura Sunyaev 1973, A&A, 24, 338
- [7] Mitsuda et al. 1984, PASJ, 36, 755-757
- [8] Zycki et al. 1999, MNRAS, 309, 563
- [9] Andrzej A. Zdziarski, W. Neil Johnson and Pawel Magdziarz, 1996 MNRAS 283,193