

NICERによる中性子星連星 Cygnus X-2 の研究

Neutron star binary Cygnus X-2 studied by NICER

X線天文学研究室 BP18041 小泉 雄飛

指導教員: 久保田 あや 教授

1 研究の目的

中性子星は半径約 10 km で質量は太陽の 1.4 ~ 2 倍程度、密度は 1 cm^3 あたり数億トンにもなる超高密度の天体である [1]。中性子星が太陽程度の低質量の恒星と近接連星系を形成すると、恒星のガスは中性子星に落下し、降着円盤が形成される [3]。内側は回転速度が光速の 10% 程度まで達し、降着ガス同士の粘性摩擦により一千万度という高温に熱せられ X 線を放射する。このような連星系を *neutron star low mass X-ray binary (NS-LMXB)* と呼ぶ。また、中性子連星は暗めの Atoll ソースと明るい Z ソースに分類される。Z ソースは降着によって輝く天体の光度の上限であるエディントン限界光度 L_{edd} 近くで輝く。 L_{edd} は天体の質量 M に比例し、 $L = 1.25 \times 10^{38} (M/M_{\odot}) \text{ erg/s}$ と表される ($M_{\odot}$ は太陽質量)。また、Z 天体の X 線強度の時間変化 (ライトカーブ) はしばしば準周期振動 (Quasi Periodic Oscillation; QPO) という周期で揺らぐ短時間変動が見られる [7]。本研究は、NS-LMXB からの X 線データを解析し、放射の起源に迫ることを目的とする。

2 NICERによる Cygnus X-2 の観測

2.1 NICER

NICER は 2017 年 6 月 3 日に打ち上げられ、国際宇宙ステーション (ISS) に搭載された。搭載されている X-ray Timing Instrument (XTI) によって、0.2 ~ 12 keV の X 線を検出することが可能である。エネルギー分解能は 1 keV では 85 eV で、6 keV では 137 eV で、100 ns という短時間分解能を特徴とする¹。

2.2 Cygnus X-2

Cygnus X-2 は 1960 年代にエアロビロケットを介して発見された NS-LMXB である [4]。Cygnus X-2 の地球からの距離は $8 \sim 11 \text{ kpc}$ ($2.5 \times 10^{17} \sim 3.4 \times 10^{17} \text{ km}$) [3]、質量は太陽の 1.78 ± 0.23 倍である。一方で連星をなす恒星の質量は太陽の 0.60 ± 0.13 倍で [3]、公転周期は $(9.8444 \pm 0.0003) \text{ d}$ である [2]。図 1 は ISS に搭載された全天 X 線監視装置 (MAXI) によって得られた 2 ~ 20 keV の X 線カウントレートの長期時間変化を示している。NICER は打ち上げからの期間に 70 回の観測を行なった。

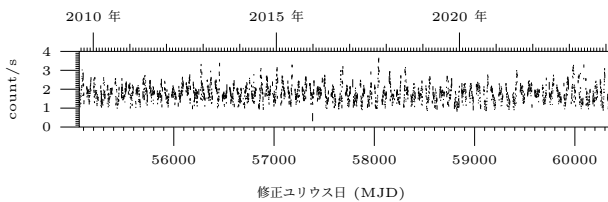


図 1: ISS 搭載全天 X 線監視装置 (MAXI) による Cygnus X-2 の 2 ~ 20 keV のカウントレートの長期変動

3 解析の準備

3.1 スペクトル

NASA が公開している NICER のデータ² を用いた。最新の較正ファイルに基づいたスクリーニングのため NICER チームにより公開されているリダクションツール *nicerl2* を実行した。バックグラウンドを再現するモデルとして 3C50 モデルを指定して 70 個の全ての観測データについて天体とバックグラウンドのスペクトルを作成した。天体スペクトルからバックグラウンドスペクトルを差し引いて解析する。

3.2 時間変動

nicerl3-lc を用いて $\Delta t = 5 \text{ ms}$ のライトカーブを作成し、NASA の時間解析ツール *powerspec* を用いて $10^{-3} \sim 10^2 \text{ Hz}$ の Power Spectral density (PSD) を作成した。

3.3 カラーカラー図と特徴的なデータ

1 つ 1 つの観測データからバンド 1 (0.2 ~ 2.0 keV)、バンド 2 (2.0 ~ 5.0 keV)、バンド 3 (5.0 ~ 10.0 keV) のカウントレートを求めバンド 1 に対するバンド 2 の割合 (Soft カラー)、バンド 2 に対するバンド 3 の割合 (Hard カラー) を計算した。図 2 は Soft カラーに対するハードカラーをプロットしたカラーカラー図 (CCD) である。この CCD から特徴的なデータを 4 つ選び、そのスペクトルと時間変動の PSD を図 3.3 に示す。ややハードな観測 2 (赤) で 7 Hz に QPO のピークが見られ、最も明るい観測 1 (黒) では 4 Hz に幅広い実像 (type A QPO) がえられる。

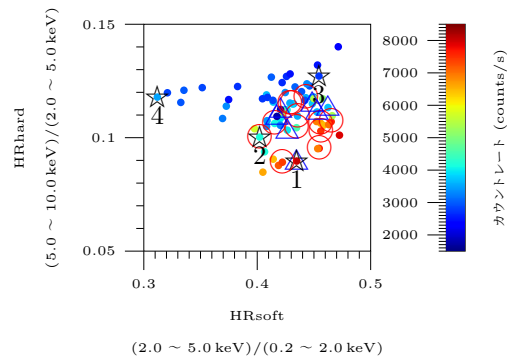


図 2: カラーカラーダイアグラム。○と△では QPO がえられる。色は 0.2 ~ 10.0 keV のカウントレートを示す。

¹https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/nicer_about.html

²<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl>

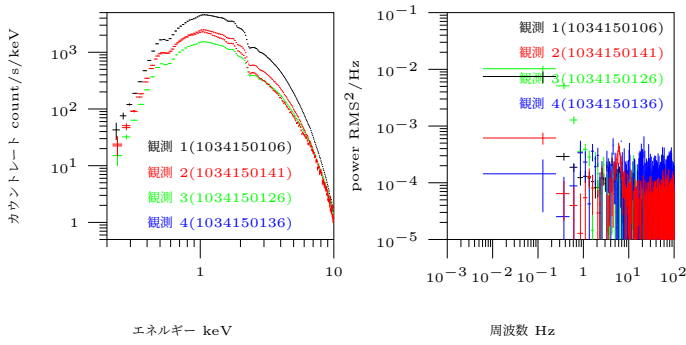


図 3: 観測 1 ～ 4 のスペクトル (左) と PSD (右)

4 スペクトル解析

4.1 放射モデル

NS-LMXB は中性子星表面の黒体放射とまわりに広がる光学的に厚い降着円盤からの黒体放射 (図 4 左) もしくは光学的に薄い高温プラズマによる逆コンプトン散乱 (図 4 右) で特徴付けられる。降着円盤の黒体放射は diskbb モデル [5] で表され降着円盤の内側の温度 kT_{in} と半径 R_{in} のパラメータを持つ。中性子星表面の放射は bbodyrad モデルで表され、降着円盤の内側の温度 kT_{bb} と球の半径 R_{bb} のパラメータを持つ。逆コンプトン散乱は nthComp モデル [6] で表され、光子指数 Γ と電子温度 kT_e と種光子温度 kT_{bb} と $norm$ のパラメータを持つ。天体からの放射は星間吸収を受けるので、これを TBabs モデルで再現した。また鉄 (6 ～ 7 keV) と ～ 1 keV に輝線が見られたので gaussian を加えた。

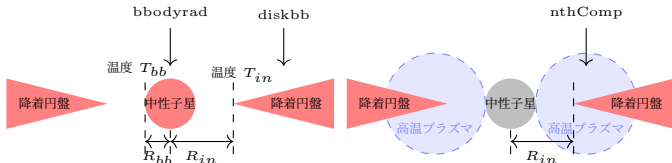


図 4: モデル 1 (状態 1、左) とモデル 2 (状態 2、右) の描像。

4.2 スペクトル解析

全てのデータをモデル 1 と 2 で解析した。モデル 2 では種光子の設定によって χ^2 値が異なり、中性子星表面より円盤の光子散乱される方が fit の再現性が良かった。またモデル 1 と 2 では χ^2 値はほぼ同じで区別できなかったのでパラメータの物理的妥当性から判断した。図 5 は観測 1 と 4 のフィット結果で観測 1 はモデル 2、観測 4 はモデル 1 が妥当であった。

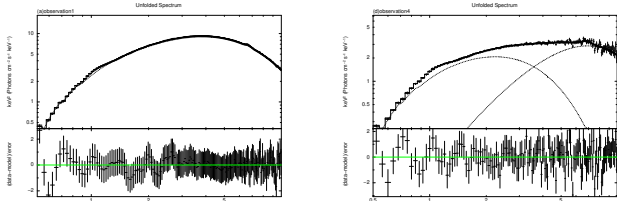


図 5: 観測 1 (左) と観測 4 (右) のフィット結果とベストフィットモデル

4.3 パラメータの時間変化

図 6 に全ての観測で得られたパラメータの時間変化を示す。また図 7 にパラメータの相関を示す。光度が低い時

はモデル 1 が妥当 (状態 1 とよぶ) であり、光度が高い時はモデル 2 が妥当 (状態 2 とよぶ) であった。状態 1 では円盤の内側の半径 R_{in} が 20 ～ 30 km まで広がっている。このとき、中性子星半径は 5 km とほぼ一定だが、理論的な中性子星の半径 10 km より小さいので、中性子星は部分的に輝いていると考えられる。状態 2 では円盤一部が膨らんで逆コンプトン散乱が効果的と分かった。また QPO は状態 2 でよく見られ、コンプトン雲と関連すると考えられる。

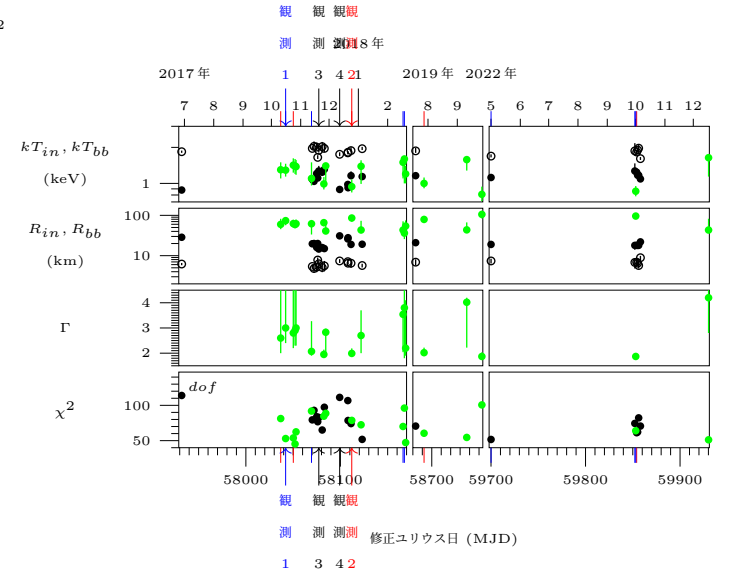


図 6: モデルのパラメータの時間変動。また、QPO がある観測日時を赤で示し、QPO が少しある観測日時を青で示した。また、緑はモデル 2 の結果、黒はモデル 1 の結果で白抜きは bbodyrad、塗り潰しは diskbb のパラメータ

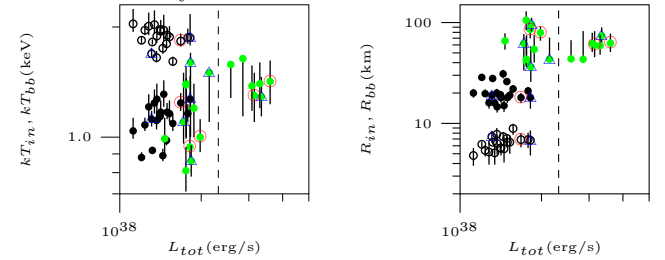


図 7: L_{tot} に対する中性子星と円盤温度 (左) と半径 (右)

5 まとめ

NICER の Cygnus X-2 のデータを網羅的に解析し、スペクトル変化から高光度での降着流の変化を捉えることができた。

参考文献

- [1] 小山勝二著. New cosmos series ; 2. 培風館, 1992.
- [2] Jerome A. et al. 1999, MNRAS 305, 132
- [3] Jorge Casares et al. 1998, APJL 493, 39-42
- [4] E. T. Byram and Chubb. AJ. 1966 71 389
- [5] Mitsuda et al., 1984, PASJ, 36, 741-759
- [6] Zycki et al, 1999, MNRAS, 309, 561-575
- [7] Ingram et al, 2019, NAR, 85, 101524