

ISS 搭載 NICER による Z-Source タイプの中性子星 X 線連星 GX17+2 の研究

X-ray study of Neutron star X-ray binary GX17+2 with NICER

X 線天文学研究室 BP19005 小林 蒼太 指導教員：久保田 あや 教授

1 はじめに

超新星爆発によって形成される中性子星は、半径約 10 km、質量 $1.4 M_{\odot}$ ($M_{\odot}$: 太陽質量) 程度の高密度星である。2つの天体が互いの重心の周囲を回転する天体を連星といい、低質量恒星と中性子星の連星を特に低質量 X 線連星 (low-mass X-ray binary: LMXB) という [1]。恒星のガスは中性子星の重力に捉えられ、中性子星の周囲を回転し、降着円盤を形成する。円盤内のガスは摩擦による力学的エネルギーを熱エネルギーに変換し X 線を放射し、徐々に内側に落ち込んでいく。LMXB からの X 線放射は「降着円盤から放たれる低エネルギーの X 線」と「中性子星から放たれる高エネルギーの X 線」の 2つが観測される。本研究では国際宇宙ステーション (ISS) 搭載の NICER 検出器による中性子星 GX17+2 の観測データを解析していく。

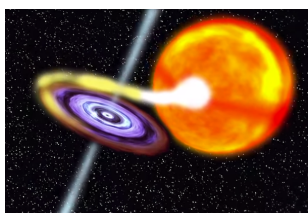


図1 LMXB(NASA「ImagineTheUniverseより」)

2 中性子星 Z 天体 GX17+2

降着物質は中性子星から重力を受けると同時に、中心部からの X 線放射による輻射圧を受ける。天体が明るくなると輻射圧が重力を上回りそれ以上降着できなくなる。その限界光度をエディントン限界光度 (L_{edd}) という。これにより、中性子星の LMXB は Z 天体と Atoll 天体の大きく 2つに分類される。Z 天体は光度が明るく、エディントン限界光度付近で輝き続ける天体であり、対して、Atoll 天体は光度の範囲が広く、エディントン限界の 1% 以下から限界光度まで変化する天体である [2]。

銀河系内には、Sco X-1、GX17+2、Cyg X-2、GX 340+0、GX 5-1、GX 349+2 の 6つの Z 天体が確認されている [3]。Z 天体の Color-Color 図 (以降 CCD) は、Z のような形をとる特徴が見られ、CCD 上で Horizontal Branch、Normal Branch、Flaring Branch の 3つの Branch に分類される。

3 NICER による GX17+2 の解析

3.1 NICER とは

ISS 搭載の NICER は、2017 年 6 月 3 日に打ち上げられた中性子星を対象とする観測機器である。NICER には、X-ray Timing Instrument(XTI) という観測装置が搭載され、この中にある 56 台の集光器 (X-ray Concentrators: XRC) と Focal Plane Modules(FPM) によって集光し、FPM 内にある Silicon Drift Detectors(SDD) で個々の X 線を検出している [4]。エネルギー分解能は 2%、時間分解能は 100 nsec で 0.2 – 12 keV の範囲で記録している。

3.2 GX17+2 の観測と解析準備

図 2 (1 段目) は ISS 搭載全天 X 線監視装置 (MAXI) による GX17+2 の長期時間変動であり、ある程度一定の強度を維持していることが見られる。NICER はこのうち 2017 年 10 月 16 日から 2020 年 9 月 8 日にかけて 37 回 GX17+2 についての詳細な観測を行った。

NASA が公開している観測データをダウンロードし、これを基に解析を行っていく。NICER の公開ツール `nicerl2`^{*1}を用いて天体のスペクトルデータを作成し、検出器のパルスハイトと X 線エネルギーを対応させるレスポンス関数とエネルギーごとの有効面積を記述した `arf` ファイルを作成した。また、観測データ含まれている目標の天体以外の周囲の星からの雑音 (バックグラウンド) を `nibackgen3C50`^{*2} というツールを用いて除去した。この先の X 線のスペクトル解析は `Xspec` というパッケージを使用する。このようにして得られたデータのカウンtrate (単位時間あたりの X 線数: 以降 CR) をまとめたものが図 2(2 段目) である。これを見ると、どのデータも非常に明るい光度であることが分かる。

図 2 (3 段目) は、低エネルギー帯 (1-3 keV) と中エネルギー帯 (3-5 keV) の CR 比 (ソフトカラー) であり、図 2 (4 段目) は、中エネルギー帯と高エネルギー帯 (5-10 keV) の CR 比 (ハードカラー) を表している。これらより、GX17+2 の CCD を作成する。

^{*1} https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/analysis_threads/nicerl2/

^{*2} https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nicer/tools/nicer_bkg_est_tools.html

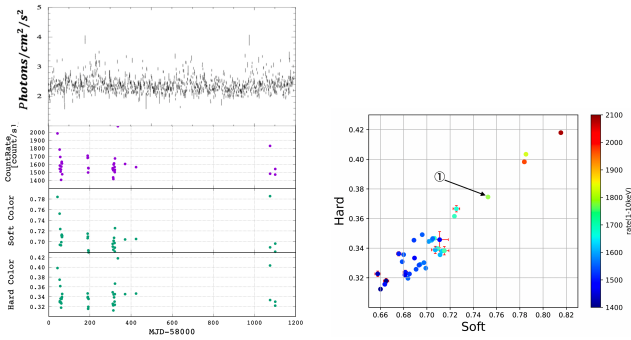


図 3 CCD

図 2 変動と CR とカラー

3.3 CCD の作成

全 37 個のデータによる CCD を作成し、GX17+2 の分布を確認する (図 3)。CCD は、図 2 のソフトカラーとハードカラーの相関図となる。また、各点の色はそのデータのカウンtrate (明るさ) を表しており、左下から右上にかけて明るい点になっていくことが確認できる。

4 スペクトル解析

4.1 スペクトル解析方法

全データの中から一番安定していたデータを抜粋し、モデルを確認する。抜粋するデータは CCD 上の中央に位置する①である。モデルの検証は、中性子星の半径、降着円盤の内縁半径、カイ二乗値を基に物理的にあり得るもので判断していく。これらの条件から $\text{tbabs}^*(\text{nthComp}+\text{diskbb})$ というモデルが最適であると求められた。

nthComp モデルは、Zdziarski が構築した中性子星の表面を覆う高温プラズマによる逆コンプトン散乱のモデル [5] であり、 diskbb モデルは、降着円盤表面からの多温度黒体放射を再現したモデルである [6]。この 2 つに加え、星間物質による吸収モデルの tbabs で全データの解析を行う。

表 1 1050410102 $\text{tbabs}^*(\text{nthComp}+\text{diskbb}+\text{gaussian})$

Component	Parameter	value
nthComp	Gamma	$2.06^{+0.76}_{-0.19}$
	kT_e	$2.26^{+1.49}_{-0.21}$ keV
	L_{nthComp}	1.58×10^{38} erg/s
diskbb	T_{in}	$1.07^{+0.24}_{-0.22}$ keV
	L_{diskbb}	3.88×10^{37} erg/s
	R_{in}	$15.2^{+4.13}_{-2.76}$ km
bbbodyrad	R_{km}	$9.77^{+3.12}_{-1.57}$ km

図 4 抜粋データ

4.2 全データ解析

図 5 は、全 37 個のデータを $\text{tbabs}^*(\text{nthComp}+\text{diskbb})$ でモデルフィットしたときの各パラメータをまとめた図である。Luminosity はモデルごとと全体のものを表示している。限界光度 (赤線) と全体の光度 (黄) を比較すると、限界光度の 72%-132% と非常に明るいことがわかる。

5 まとめと考察

Luminosity と中性子星の半径 R_{bb} との相関と diskbb の半径 R_{in} との相関を図 6 に示した。 R_{bb} は一部にばらつきが見られるがまとまりのみを見ると R_{in} のまとまりよりも若干小さい位置にあり、光度が強いと中性子星の半径は小

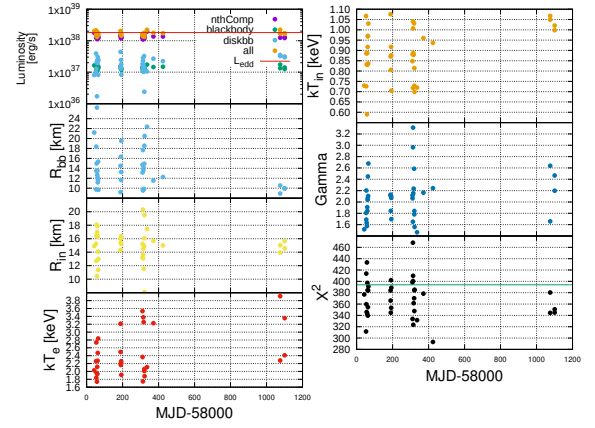


図 5 各パラメータ

さくなる若干の相関関係が、 diskbb の半径は変化がない無相関がわかる。これより、中性子星を覆う高温プラズマ層が円盤の内縁付近も覆うことがあると考えられる。また、基本的に中性子星の半径は理論値である 10 km を前後している様子が窺える。

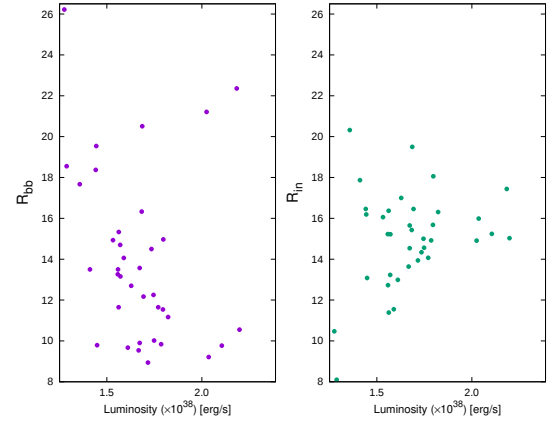


図 6 Luminosity と中性子星の半径の相関 (左)
Luminosity と diskbb の半径の相関 (右)

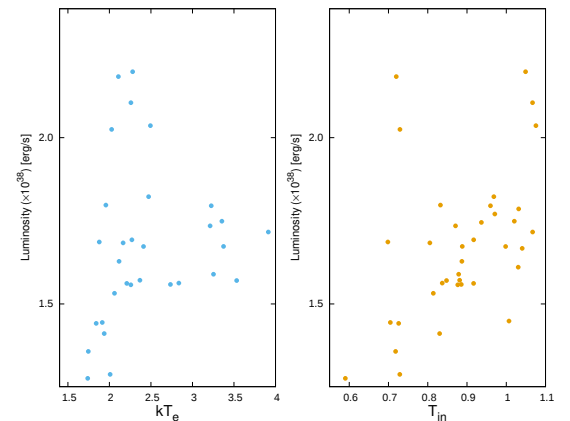


図 7 Luminosity と中性子星の温度の相関 (左)
Luminosity と円盤の温度の相関 (右)

参考文献

- [1] 野本他「シリーズ現代の天文学：7 恒星」日本評論社
- [2] Thomas E. Harrison et al. 2011 APJ 736 54H
- [3] Kuulkers, E. van der Klis, M. 1996AA 314 567K
- [4] K. Gendreau and Z. Arzoumanian 2017 1 895
- [5] Zdziarski et al.1996 MNRAS 283 193Z
- [6] Mitsuda, K., et al. 1984,PASJ, 36 ,741