ISS搭載NICERによる中性子星X線連星GX 13+1の吸収線の解析

Analysis of absorption lines of neutron star X-ray binary GX 13+1 with NICER onboard ISS

X線天文学研究室　P19007 三ツ石 大智　　指導教員：久保田 あや 教授

1　はじめに

中性子星は太陽質量の 1.4 倍程度、直径 20 km 程度で 1 cm^3 あたり数億トンにも達する高密度の天体である。また単独の中性子星は低質量星と遭遇すると、互いに捉え合い中性子星-低質量 X 線連星 (Low Mass X-ray Binary: 以降 LMXB) を形成することがある [1]。今回の研究は X 線スペクトル上に吸収線構造が見られる NS-LMXB 天体 GX 13+1 の国際宇宙ステーション (ISS) 搭載の NICER 検出器によるによる観測データを解析する。

2　吸収線の発見と GX 13+1

中性子星-LMXB の低質量星から中性子星に降り積もったガスは降着し円盤を形成する。これを降着円盤と呼び、数千万度の高温になって X 線を放射している。中性子星-LMXB の X 線スペクトルは中性子星表面と円盤からの連続 X 線スペクトルであり、連続スペクトルの一部に凹み (吸収線) が見られることがある。吸収線は視線方向 (観測者から放射している物体を見た方向) に吸収物質があるということを示し、そのエネルギーは X 線が原子に入射した時に電子が励起した先と前の電子準位の持つエネルギーの差に対応しており、電子準位の持つエネルギーは原子番号の 2 乗に比例している。さらに吸収線が本来ある場所からエネルギーが高い方へずれ (青方偏移) が観測されたことから、中心から勢いよく噴き出しているということがわかり、これによって図 1 の描写が得られた。中性子星への降着は単にものが落ちているだけでなく高速でガスを宇宙空間に撒き散らす原動力になっている [2]。

GX 13+1 は銀河バルジに存在する最も明るい中性子星-LMXB で初めて鉄吸収線が観測された中性子星-LMXB であり、地球からの距離はおよそ 7 kpc(=2.16×10^{17} km) である [3] [4]。

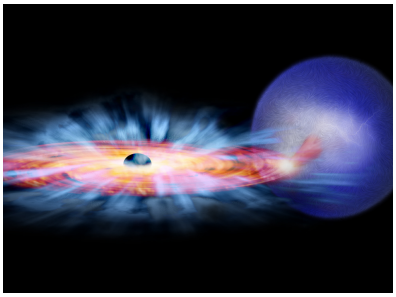

図 1: 降着円盤と円盤風のイメージ図 [5]

3　NICER による GX 13+1 の観測

図 2 は ISS 搭載全天 X 線監視装置 (MAXI) による GX 13+1 の 2009 年 8 月〜2022 年 7 月の 2-20 keV の長期強度変動で、全体を通してほぼ一定の強度に保たれている。また、矢印で示された 7 つの点は NICER によって観測された MJD を示している。

NICER は、2017 年 6 月 3 日に打ち上げられ ISS に搭載された中性子星観測装置である。主要科学観測機器は XTI(X-ray Timing Instrument) と呼ばれていて、56 個の X 線集光系 (X-ray Camera:XRC) とシリコンドリフト検出器 (SDD) により 0.2-12keV に高い感度を持つ。SDD のエネルギー分解能は 2%。時間分解能は 100nsec である [6]。

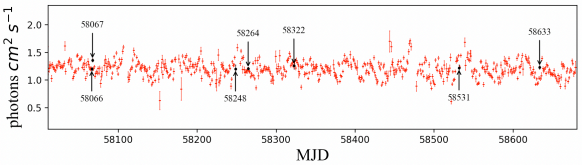

図 2: MAXI による GX 13+1 の長期変動。横軸は修正ユリウス日 (MJD)

4　スペクトル解析

NASA のデータ公開サイトより全ての観測データをダウンロードし、NICER チームによって供給されているツールで解析を始めた。まず nicer2 というパッケージを使用し天体のスペクトルデータを作成した。また検出器のパルスハイトチャンネルとエネルギーを対応させるレスポンス関数およびエネルギーごとの有効面積を記述する arf ファイルを nicerarf を使用し作成した。観測方向のデータには目標天体以外からの雑音 (バックグラウンド) が含まれ、これを除去するために nibackgen3C50 を用いてバックグラウンドのスペクトルファイルを作成した。　スペクトル解析には NASA が公開しているソフトウェアである xspec を利用した。本研究では全体のスペクトルと、解析する吸収線付近のフィットにそれぞれ別のモデルを用いた。

4.1　全体のモデルフィット

本研究では 7 つの観測データ全てに対してモデルフィットを行った。利用したモデルは Zdziarski らによって構築された逆コンプトン散乱の放射モデルである nthcomp[7]、幾何学的に薄く光学的に厚い降着円盤が黒体放射する時のスペクトルを表していて、標準降着円盤モデル [8] を簡単に近似したモデルの diskbb である [9]。さらに星間物質による光電吸収を考慮したモデルである tbabs[1]を前述した nthcomp と diskbb を足したものにかけた tbabs*(nthcomp+diskbb) というモデルを利用してモデルフィットを行い、flux を算出した。

全ての観測データの連続スペクトルを同時に表したものを図 3 に示す。1-10keV のフラックスは 3.70×10^{30}〜5.03×10^{30} W/cm^2 で、これは等方放射を仮定した吸収を除いた X 線光度 5.52×10^{30}〜7.46×10^{30} W/cm^2 に対応する。

[1] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node268.html

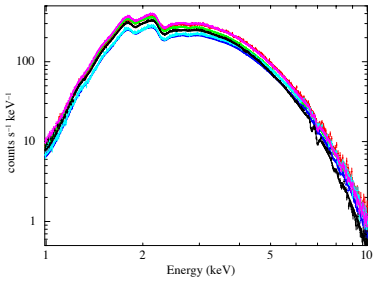

図 3: 全ての観測データ
(古い観測から順に赤、緑、青、水色、マゼンタ、黒)

4.2 吸収線付近のモデルフィット

次に各スペクトルの吸収線が現れている付近 (6.5-9.0keV) に対してモデルフィットを行った。連続成分は power-law モデル[2]で近似的に表し、これに負の正規分布を表した主に吸収線を表すのに用いられる negative gaussian モデル[3]を加えた。

全てのスペクトルについて吸収線を拡大したものを図 4 に示す。図 5 はエディントン限界光度に対する 6.5-9keV の X 線光度と水素様鉄 ($Fe_{Ly\alpha}$: 電子が一つ、青) と He 様鉄 ($Fe_{He\alpha}$: 電子が二つ、赤) の等価幅 (equivalent width) の関係を示したものである。また、図 6 は L_x/L_{edd} に対する水素様 Ni(緑) と水素様 Co(黒) の等価幅を表示した。

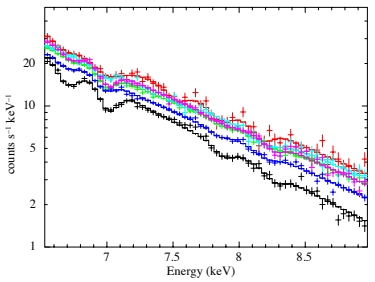

図 4: 吸収線を拡大した図 (6.5-9.0keV)
(色は図 3 と同じ)

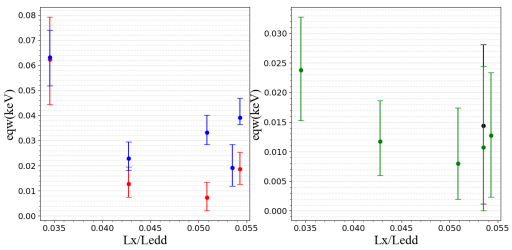

図 5: (左)L_x/L_{Edd} と $Fe_{Ly\alpha}$、$Fe_{He\alpha}$ の関係
(右)L_x/L_{Edd} と $Co_{Ly\alpha}$、$Ni_{He\alpha}$ の関係
(エネルギー範囲は 6.5-9.0keV)

5 考察

図 5 より 6.5keV-9.0keV の X 線光度が高いほど、He 様に電離した鉄に対して H 様まで電離が進んでいる、すなわち L_x が明るいほど円盤風を形成するプラズマの電離度が高くなることがわかる。したがって、円盤外縁部のプラズマは中心付近から放射される X 線によって光電離されていることがわかる。モデルフィットによって解析した結果を使い円盤風の構成状態を考察した。吸収線の等価幅から吸収体の柱密度を推定し、中心から吸収体までの距離 r_{wind} を推定することができる。本研究ではモデルフィットによって求めた $Fe_{Ly\alpha}$ と $Fe_{He\alpha}$ による吸収線の等価幅を利用して全吸収体の柱密度 (N_{tot}) を推定した。

吸収線の等価幅は吸収物質の柱密度 (吸収体を X 線が通過する際の単位面積あたりのイオンの個数) で決まる。文献 [10] では柱密度と等価幅の関係が計算されており、これと図 5 の結果を比較して、H 様鉄の柱密度は観測 7(図 4 では黒) を例にすると、$N_{FeLy\alpha} = 2.0 \times 10^{18}$ 個/cm^2、He 様鉄の柱密度は $N_{FeHe\alpha} = 1.0 \times 10^{18}$ 個/cm^2 と求めることができた。したがって、吸収体の H 様鉄と He 様鉄の存在比は 2:1 である。文献 [11] を参照すると、この存在比を実現するプラズマの電離度は電離パラメータ $\xi = 1.2 \times 10^4$ であることが導ける。このとき、全鉄の存在量は $N_{Fe} = 4.0 \times 10^{18}$ 個/cm^2 と見積もれるが、ここで、鉄の組成比が太陽と同じく $A_{Fe} = 3.3 \times 10^{-5}$ であると仮定すると、全物質 (ほとんどが水素) の柱密度は $N_{tot} = 1.2 \times 10^{23}$ 個/cm^2 と推定できる。また、ξ は吸収物質の個数密度 n、中心天体の光度 L、吸収体から光源までの距離 r_{wind} を用いて $\xi = L/nr_{wind}^2$ と書ける。吸収体の厚み $\Delta r = r_{wind}$ を仮定すると、$N_{tot} = n\Delta r \simeq nr_{wind}$ と近似することができるので、$\xi \simeq L/(N_{tot}r_{wind})$ と近似でき、この式から吸収体から光源までの距離 r_{wind} を推定することができる [11]。以上により観測 7 の r_{wind} は 4.9×10^5 km であることが推定できた。

6 まとめ

本研究では NICER によって 7 回観測された中性子星-LMXB の一つである GX 13+1 のスペクトル解析を行った。連続スペクトルにモデルフィットを行い高階電離した鉄の吸収線を確認し、そのパラメータから吸収体の位置である r_{wind} を推定することができ、これにより円盤の状態によって吸収体の位置が変化しているという描写を得ることができた。

References

[1] 小山勝二.X 線で探る宇宙. 培風館,p25 p80:p82
[2] 久保田 2021, 分光研究,70,170 189
[3] Bandyopadhyay, R. M., Shahbaz, T., Charles, P. A., & Naylor, T.1999,MNRAS, 306, 417
[4] Ueda et al. 2001 ApJ 556 L87
[5] Wind from a Black Hole ,Illustration Credit: M. Weiss (CXC), NASA
[6] K. Gendreau and Z. Arzoumanian, 2017 Nature Astronomy 1 895
[7] Zdziarski et al. 1996 MNRAS 283 1
[8] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, A&A, 24, 337
[9] Mitsuda, K., et al. 1984,PASJ, 36 ,741
[10] Kotani et al. 2000 ApJ 539 413
[11] Kubota et al. 2007 1630

[2] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node216.html
[3] https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/node176.html