

論文の内容の要旨

論文題目 Probing Circumstellar Matter with X-ray Binary Pulsars
(X線連星パルサーを用いた星周物質の探査)

氏名 遠藤 貴雄

学籍番号 87022

1 X線連星系 – GX 301–2の特徴

GX 301–2/Wray977は1973年の気球による観測で大きな強度変化を示す明るいX線天体として発見された(Ricker et al. 1973)。その後、世界各国の飛行体観測機器が詳細に観測を続け、現在までに以下のような特徴が明らかになっている。(1) 主星は自転周期が約680秒、表面磁場強度 4×10^{12} ガウスの中性子星、伴星Wray977は質量 $\sim 35 M_{\odot}$ ¹のB2 Iae型超巨星であり、連星系としては大質量X線連星系(High-Mass X-ray Binary: HMXB)に分類される。(2) 2つの星は離心率0.46の長楕円軌道上を周期 ~ 41 日で公転している(図1参照)。軌道長半径は約380光秒であり、HMXBの中で最大である。(3) 連星の軌道位相に強く依存したX線光度の変動($2\text{--}200 \times 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$)がある。近星点付近で最大光度となり、20 keV以上の高エネルギー帯では、遠星点でも極大光度を示す。(4) 中性子星の自転に伴うX線パルス周期の長さは、時間とともにランダムに変動する。これはGX 301–2が典型的な星風捕捉型パルサーであることを示す。(5) エネルギースペクトルは、中性子星の磁極からの放射である強い吸収を受けた巾関数型の連続成分に、冷たい物質からの蛍光鉄K α 輝線(エネルギー6.4 keV)を加えたモデルで表される。等価幅²が200 eVから最大で1800 eVにも達する鉄のK α 線と、水素柱密度(N_{H})にして $2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ から最大で $2 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ に及ぶ光電吸収は、ともにHMXBの中で最大である。(6) Saraswat et al. (1996)は、GX 301–2の光電吸収吸収は2種類の水素柱密度で表されることを初めて導いた。彼らは、2つのうち少ない柱密度による吸収を受けた連続スペクトル成分はGX 301–2からの放射を散乱したものであると指摘している。(7) Leahy et al. (1989)によれば、鉄のK α 線の中心エネルギーと鉄のK吸収端のエネルギーはそれぞれ $6.46 \pm 0.05 \text{ keV}$ と $7.36 \pm 0.05 \text{ keV}$ である。両者とも鉄が電離していることを示しているが、両者から示唆される鉄の電離度は一致しない。(6)と(7)は、GX 301–2の星周物質の密度や電離状態に、空間的な非一様性があることを示唆している。これが本当であれば、一様等方的であるはずの星風から、星周物質の非一様性がどのようにして生じるのかという点が興味深い。

¹太陽質量: $M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{ g}$

²連続成分に対する輝線の強度

2 ASCAによる観測

1993年2月に打ち上げられた ASCA 衛星は、0.5–10 keV の X 線を有効に反射する X 線望遠鏡の焦点面に、高い分光能力 (5.9 keV で全半値幅 ~ 130 eV) を有する X 線 CCD カメラ (SIS) と、高エネルギー側で高い検出感度を有する撮像型ガス蛍光比例計数管 (GIS) を搭載した我が国 4 番目の X 線天文衛星である。特に SIS は 0.5–10 keV の X 線を、かつてない精度で分光できるという特長を持つ。我々はこの優れた特性を活かし、GX 301–2 に特徴的な強い鉄輝線 (6.4 keV) と鉄の K 吸収端 (~ 7.1 keV) のスペクトル構造を詳細に評価することで、超巨星 Wray977 からの星風の電離状態や、中性子星近傍での降着流の運動、過去の観測で指摘されている中性子星の星周物質の空間的非一様性を調べることを目的とした高精度の分光観測を行なった。

ASCA は GX 301–2/Wray977 系を 1994 年と 1996 年に合計 3 回観測した。図 1 は GX 301–2/Wray977 系の連星軌道と観測点を図示したものである。近星点を公転位相の原点 ($\Theta_{\text{orb}} = 0$) と定義したとき、3 回の観測はそれぞれ $\Theta_{\text{orb}} \simeq 0.31$ 、 $\simeq 0.47$ (遠星点近傍)、 $\simeq 0.97$ (近星点近傍) で行なわれた。各観測における GIS での平均の X 線強度は、それぞれ 1.06 ± 0.01 、 3.18 ± 0.01 、 6.37 ± 0.02 count s⁻¹ であった。

3 解析と結果

1. 各観測の平均スペクトルは、基本的には Saraswat et al. (1996) が指摘したように、二種類の吸収 ($N_{\text{H}} \sim 10^{23}$ cm⁻² と $\sim 10^{24}$ cm⁻²) を受けた巾型の連続成分 ($\Gamma = 1.2$ – 1.6) と鉄の K α 輝線 (等価幅 = 160–1030 eV) の和で表される (図 2 参照)。巾型連続成分の強度で重みをつけた平均の水素柱密度は $\Theta_{\text{orb}} \simeq 0.31$ 、 0.47 、 0.97 の 3 つの位相でそれぞれ 6.9×10^{23} cm⁻²、 3.8×10^{23} cm⁻²、 1.0×10^{24} cm⁻² であり、パルサーと伴星の距離が近いほど吸収が大きいことがわかった。
2. ASCA の優れたエネルギー分解能によって、鉄の K α 輝線に加えて K β 輝線が存在することが初めて示された。K β 線の強度は atomic data が示す通り、K α 線の 13% と考えて矛盾しない。K β 線を取り込んでスペクトルを評価すると、K α 線のエネルギー、K 吸収端のエネルギーは、ともに鉄の電離状態として、中性もしくは低電離を示す結果となった。
3. 観測された鉄の K α 線の等価幅と平均の水素柱密度の相関を詳しく解析した結果、鉄輝線を出す星周物質は、パルサーの回りの空間をほぼ等方的かつ一様な厚さで取り巻いていることが示された。
4. 吸収を補正したパルサーの全 X 線光度は上記の 3 つの軌道位相でそれぞれ 2.1×10^{36} erg s⁻¹、 2.4×10^{36} erg s⁻¹、 1.8×10^{37} erg s⁻¹ であり、近星点付近のみ他の位相に比べて 1 桁大きくなっている。
5. パルス波形はなだらかな 2 山構造を持つ。パルス成分の割合は、1 つの観測ではエネルギーが高い程大きくなっている。また、異なる観測の間では、吸収の強い軌道位相のところほど小さく、最も吸収の強い $\Theta_{\text{orb}} = 0.97$ では 10 keV 付近で 10 % であるのに対し、他の軌道位相では同じエネルギー帯域で 20 % ほどあることがわかった。
6. 鉄の K α 輝線 (以後コア成分) は、すべての位相で有意な広がり ($\sigma = 40$ – 80 eV) を持つことが確認された。この広がりをパルサー周りの星間物質の運動が起源だと考えると、 $v/c = 0.01$ という高速運動が示唆される。
7. このコア成分の加えて、近星点の位相でのみ明らかに広がった裾 ($v/c = 0.03$) をもっていることが初めて発見された。この裾成分は ASCA SIS の放射線損傷等によるエネルギー分解能の劣化を考慮しても、有意な広がりであることを同時期に観測された Centaurus 銀河団の細い鉄

輝線を使って検証した (図 3)。Centaurus 銀河団では鉄の $K\alpha$ 線は narrow ($\sigma < 57$ eV) であり (図 3a)、GX 301-2 に見られる裾を持った輝線プロファイルは統計的に棄却される (図 3b)。従って GX 301-2 で検証された鉄輝線の広がった裾成分は real であると結論できる。この広がった裾成分のエネルギー幅はパルサーの自転位相に同期して $\sigma = 110 - 200$ eV の範囲で 6.4 keV を中心に左右対称に変化しており、連続成分の強い時に狭く、弱い時に広いことが分かった。

4 議論と結論

鉄の $K\alpha$ 線のコア成分の起源

鉄 $K\alpha$ 線のコア成分の広がりを Doppler 効果によるものと考えたとすると $v/c = 1\%$ という高速運動が示唆される。これは予想される星風の速度 $v_{\text{rel}}/c = 0.16\%$ より一桁大きい。したがって観測された輝線の幅を説明するには、蛍光輝線を出す物質がより高速に運動していることが要求される。この起源として中性子星近傍の強い重力場による自由落下を仮定すると、コア成分の放射領域は Alfvén 半径の 4 倍以内という制限が得られた。一方、異なる位相の連続スペクトル成分が受ける平均の吸収量と裾成分を除いた鉄 $K\alpha$ 輝線の等価幅の関係を定量的に調べることにより、星周物質が中性子星の周り立体角 4π をほぼ均一に覆っていることが示された。

以上の二つの事実から、蛍光鉄 $K\alpha$ 線は連星軌道にわたって広がっている星風起源ではなく、伴星からの濃い星風を中性子星がかき集めたより近傍の星周物質が起源であることがわかった。

鉄の $K\alpha$ 線の広がった裾成分の起源

裾成分が 6.4 keV を中心に左右対称に広がることから、電離鉄輝線の混合 (> 6.4 keV) や、静止系 Compton 散乱 (< 6.4 keV) は左右非対称になることから不適切であることがわかる。よってコア成分と同様に、裾成分の広がりを Doppler 効果によるものと考えたと、蛍光物質はモデルにより光速の 3-6% の運動をしているという結論になる (図 4)。一方、降着物質が磁力線に沿って降着し始める Alfvén 半径での自由落下速度は、X線光度が 10^{36-37} erg s^{-1} の範囲で光速のほぼ 2% に過ぎないので、裾成分を放射している物質は Alfvén 半径の内側に存在していることになる。HMXBにおいて、中性子星のこれほど近傍から鉄輝線の情報が得られたことはなく、X線パルサーにおいて、X線放射領域へ突入する直前の物質の物理状態を知る上で画期的な発見と言える。

実際に裾成分の起源として、accretion column 内に閉じ込められた衝撃波通過前の物質を考えると、裾成分の等価幅の大きさや、X線光度が低い軌道位相では裾成分が見えないこと、裾成分の幅の広がりが連続スペクトル成分の強度と逆相関を示すことなど、裾成分の性質の大部分を自然に説明することができる。しかしこの描像では、Alfvén 半径の内側では観測結果に反して、鉄の電離がかなり進むことが予想されるという問題が残った。これを解決するには、降着物質が仮定している自由落下よりゆっくり落ちるか、Alfvén 半径付近で磁気的な不安定を起こし blob 状になるという描像が考えられる。

パルサーの星周物質の一様等方性

Saraswat et al. (1996) は 2 種類のうちの弱い吸収を受けた連続スペクトル成分が、星周物質からの散乱によるものであると指摘した。しかし星周物質が立体角 4π を一様等方的に覆っていることから、パルサーからいったん星周物質に散乱されて観測者に達する X線は、パルサーから直接観測者に達する X線よりも必ず長い経路を通ることになる。このため散乱成分の X線スペクトルは直接成分よりも強い吸収を受けるはずである。また、我々の解析から、弱い方の吸収を受けた成分からもパルスが見つかった。以上のことから Saraswat et al. (1996) の指摘が誤りであり、弱い吸収を受けた成分もパルサーから直接我々に届いている放射であると結論される。2 種類の柱密度は、むしろ星周物質の小さい空間スケールでの非一様性を表しており、このような非一様性が立体角 4π に互って等方的に存在していると解釈するほうがより自然である。

鉄の $K\beta$ 輝線の発見

ASCAの観測により、GX 301-2から鉄の $K\beta$ が初めて $K\alpha$ 線から分離して検出された。 $K\beta$ 線をスペクトルモデルに取り込んで、鉄の K 殻による6-7 keV付近の構造を評価すると、 $K\alpha$ 線の中心エネルギー、 K 吸収端のエネルギーともに、星周物質中の鉄が、実は中性、もしくは低電離状態にあるという結果になった。これはLeahy et al. (1989) が示唆した高階電離した鉄という星周物質の描像を覆すものである。また、視線方向とそれ以外で鉄の電離度が異なるという、彼らが導いた奇妙な結論も、 $K\beta$ 線が検出できなかったための間違いであることが判明した。

このように、ASCAの観測により、パルサーの星周物質に関するこれまでの知見には多くの誤りがあったことがわかった。我々は、ASCAの観測によって、パルサーを取り巻く星周物質が極めて一様等方的で、かつ低電離であるという描像を確立した。

5 結び

以上のように ASCA の優れたエネルギー分解能により、鉄輝線の精密な分光観測が可能になった。これによりパルサー周辺の幾何学と運動学が初めて議論の俎上にのぼるようになった。今後は Chandra 衛星や Astro-E-II 衛星による更に精度の高い分光観測によって、この方面の研究が一層進むことが予想されるが、本研究はその先鞭となるものである。

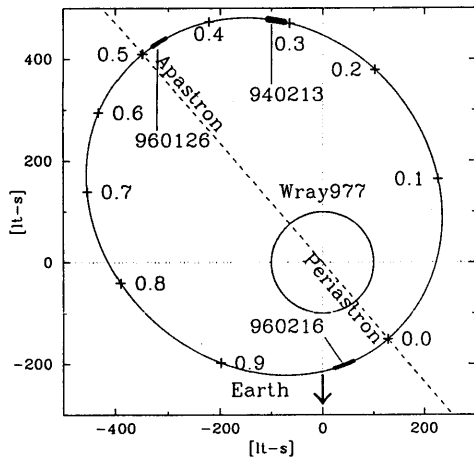


図 1. 連星軌道と観測時期

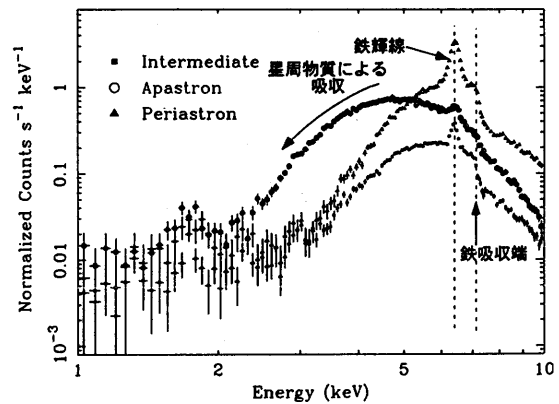


図 2. エネルギースペクトルの連星位相依存性

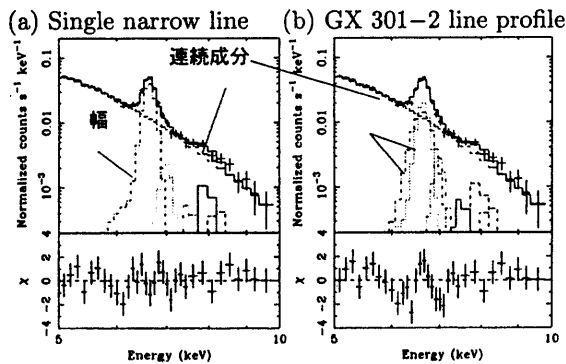


図 3. Centaurus 銀河団の細い鉄輝線による検証

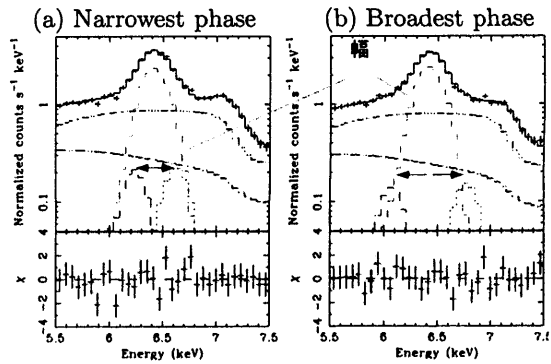


図 4. 鉄輝線のパルス位相変化