

論文内容の要旨

Spectral Study of Stellar Winds Interacting with X-rays from Accreting Neutron Stars

(X線分光観測による中性子星からのX線と
相互作用する星風の研究)

渡辺 伸

はじめに

大質量 X 線連星 (HMXB) は、中性子星と O 型、もしくは B 型の巨星とで構成される連星系であり、OB 型星が生み出す星風の一部を中性子星が重力的に捕獲し、降着させ、X 線で明るく輝く天体である。HMXB には、中性子星近傍の強い重力場、強い磁場、中性子星からの強い X 線放射というような、地球上では、実現不可能な極限環境が存在する。この連星系の内部の物理状態を探る、重要かつ強力な手段の一つが、X 線分光観測である。OB 型星から放出される星風や、その中から中性子星に向けて流れる物質は、中性子星からの X 線によって照らされ、密度や X 線強度の条件によっては高度に電離される。X 線と物質との相互作用の際に、放出される 2 次 X 線は、その場の物理状態を反映し、観測される X 線スペクトル中に様々な輝線など特徴的な構造を作る。したがって、高い精度の X 線スペクトルを得ることで中性子星の周辺の物理状態について、さらなる探査が可能になる。Chandra 衛星に搭載された X 線分光器は、これまでにないエネルギー分解能により、初めて、X 線スペクトル中の輝線の精密分光を可能にした。我々はその連星系内部の物質の電離構造、分布、星風のダイナミクスを議論する。また、この目的のために、モンテカルロ法に基づいた新しい解析手法を開発した。

Chandra 衛星による観測

我々は、異なった特徴を示す 2 つの HMXB、Vela X-1 と GX 301-2 を Chandra 衛星の X 線分光検出器 (HETGS) を用いて観測した。様々な見込み角のデータを得るため、それぞれについて、3 回ずつ、異なった軌道位相にある時を選び、観測した。

Vela X-1 の観測では、中性子星が相手の星に隠れる軌道位相 ($\phi = 0.0$) とその反対側の $\phi = 0.5$ における観測で、 $E/\Delta E = 100-1000$ という極めて高いエネルギーにより多数の輝線を検出した。ほぼ中性の Fe, Ca, Ar, S, Si からの蛍光 X 線に加え、Si, Mg, Ne がヘリウム様や水素様電離されたイオンに起因する輝線も検出された。さらに、幅の狭い放射再結合連続成分 (RRC) の構造が観測され、その幅から、電子温度が 6-8 eV (約 10 万 K) であることが導かれた。特に、Si に関しては、中性に近い状態から水素様イオンまで、数多くの電離状態のイオンと関連がある輝線が極めて高い精度で検出され

た (Figure 1)。これらの観測結果から、Vela X-1 では、中性子星からの X 線により、光電離プラズマが形成されており、しかも、様々な電離度のものが存在していることが、観測的に初めて明らかになった。さらに、Vela X-1 からは、(1) 観測された輝線の種類は、 $\phi = 0.5$ と $\phi = 0.0$ ではほぼ同じであること、(2) $\phi = 0.5$ と $\phi = 0.0$ の輝線の強度比は 5:1 ~ 10:1 であること、(3) 水素様イオン、ヘリウム様イオンの輝線からは、ドップラーシフトが検出され、 $\phi = 0.5$ では青方偏移、 $\phi = 0.0$ では、赤方偏移で、その差は $300\text{--}600 \text{ km s}^{-1}$ であること (Figure 2)、が初めて明らかになった。

GX 301-2 の観測では、3つのすべての軌道において、深い吸収を受けた連続成分に加え、中性に近い Fe, Ca, Ar, S, Si から蛍光 X 線 ($K\alpha$ 線) を検出した。Vela X-1 とは対照的に、電離状態の高いイオンからの輝線は観測されなかった。鉄の $K\alpha$ 線は、中性子星が近星点の手前にいる軌道で、最大の強度を示したが、その際、6.4 keV の $K\alpha$ 線の低エネルギー側に $\sim 6.24 \text{ keV}$ までのびる「肩」のような構造を明確に検出した (Figure 3)。観測されたエネルギー分布は、ちょうど、6.4 keV の X 線がコンプトン散乱されるときの分布に相当し、コンプトンショルダーと呼ばれる。これは、X 線が電子と衝突する際、反跳電子放出分のエネルギー損失をするコンプトン散乱を、天体現象において、初めて検出したものである。

モンテカルロ法に基づくシミュレータ

Chandra 衛星による高いエネルギー分解能の観測結果は、従来行われてきた単純な仮定 (幾何学的に対称な構造、一様な密度、光学的に十分に薄い、など) に基づく解析的モデルでは、説明できない。そこで我々は、非対称な物質分布、連続的に変化する密度、電離状態を扱い、モンテカルロ法で X 線光子の輸送過程を一つ一つ追ひ、そこからの X 線スペクトルを再現するシミュレータを構築した。そして、このシミュレーションの結果と観測データを比較し、物理状態を探るという手法をとった。

Vela X-1 の物質分布、電離構造の探査

Vela X-1 内部の物質の分布、光電離による電離構造がどうなっているかを調べるため、Vela X-1 の 3 つの軌道の観測結果をすべて、矛盾なく説明するような条件をシミュレータを用いて求めた。まずは、OB 型星の星風の速度構造として、Castor, Abbott & Klein によって提唱された星風モデル (CAK モデル) を仮定し、中性子星からの放射による電離構造を求め、その電離構造から観測される X 線スペクトルをシミュレーションで求めた。そして、 $\phi = 0.5$ と $\phi = 0.0$ の時の輝線の強度比を、Si の $\text{Ly}\alpha$ を用いて、観測とシミュレーションで比較することにより、Vela X-1 の物質の分布、イオン化の構造を得た。その電離構造に基づくシミュレーション結果は、3つ観測の連続成分の強度と多くのラインの強度を高い精度で説明できる。

しかしながら、星風の運動速度に起因すると考えられるドップラーシフトの大きさに関しては、観測のほうがシミュレーションより小さいと結果になった (Figure 2)。これは、得られた電離構造は現実の姿に近いものの、星風の速度構造は、最初に仮定した CAK モデルとは異なることを意味する。CAK モデルは単独の OB 型星の星風を考慮しており、中性子星からの X 線の影響は考慮されていない。実際に X 線による光電離の影響により、水素様イオンやヘリウム様イオンからの輝線が多く発生するような場所の星風の速度は、CAK モデルの $1/2$ から $1/3$ になりうることを我々は計算により示した。その結果は観測されたドップラーシフトのずれの速度と近い。得られたような電離構造を維持したまま、ドップラーシフトも観測と合うような星風の速度構造は存在するはずで、そのパラメータを求めるには、さらなる詳細な計算が必要となるが、今回得られたドップラーシフトのずれという結果は、Vela X-1 系内部の星風が X 線放射の影響を受けていることので確かな証拠と考えられる。

GX 301-2 の物質分布、状態の探査

コンプトンショルダーは、鉄の $K\alpha$ 線を生成している領域の物理状態を表し、そのフラックスは物質の量や組成比を、形は散乱電子の温度などを反映する。そこで、我々はモンテカルロシミュレーションを用い、それらのパラメータを数量化して、観測されたコンプトンショルダーと比較した。この結果、中性子星の全体を覆う均一な雲を仮定したとき、コンプトンショルダーを生成している散乱物質の厚みは、水素柱密度にして、 $N_{\text{H}} \sim 1 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ であり、電子温度は 3 eV 以下であることが示された。

散乱物質の金属組成比（原子番号 $Z > 2$ ）は、宇宙組成比のその 0.75 倍で観測をよく説明できることが分かった。

コンプトンショルダーで得られたパラメータは、全体の X 線スペクトルをも良く再現する。したがって、中性子星の全体を覆うような、濃く冷たい物質が GX 301-2 には存在することが示唆される。CAK モデルによる星風と、中性子星の周りを取り囲む冷たい雲という物質分布でモンテカルロシミュレーションを行ったところ、連続成分の形、鉄の α 線とそのコンプトンショルダーだけでなく、Si, S, Ar, Ca の蛍光 X 線の強度も 3 つ軌道位相の観測結果、すべてに対して良く合うことが分かった。また、このような雲の存在は、高い電離度からの輝線が観測されないという GX 301-2 の特徴もよく説明できる。

本論文により、新しい高精度の観測データをもとに、大質量 X 線連星系の内部の物理状態を探る新しい手法が確立され、2 つの異なるタイプの系に対して、その違いを形作る物理状態を特定した。この観測、解析から示唆される Vela X-1 と GX 301-2 の連星系の内部構造について、概念図を Figure 5 に示す。Vela X-1 では、中性子星は直接、星風を照らしているが、GX 301-2 では、冷たく濃い雲が中性子星を囲んでいる。この差は、重力的に捕獲した星風を中性子星に降着させるメカニズムの違いによってもたらされることが考えられるが、現在の観測データだけでは、制限がつかない。X 線分光観測とともに、高感度の硬 X 線、ガンマ線ミッションが期待される。

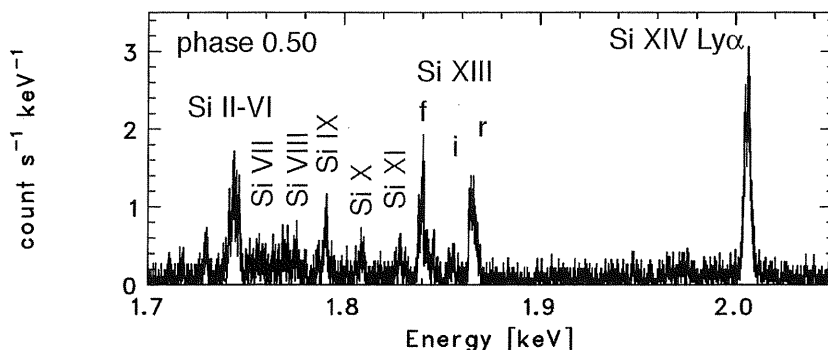


Figure 1: Vela X-1 の Si の K ライン領域 (1.7–2.1 keV) の X 線スペクトル。複数の電離状態が確認できる。

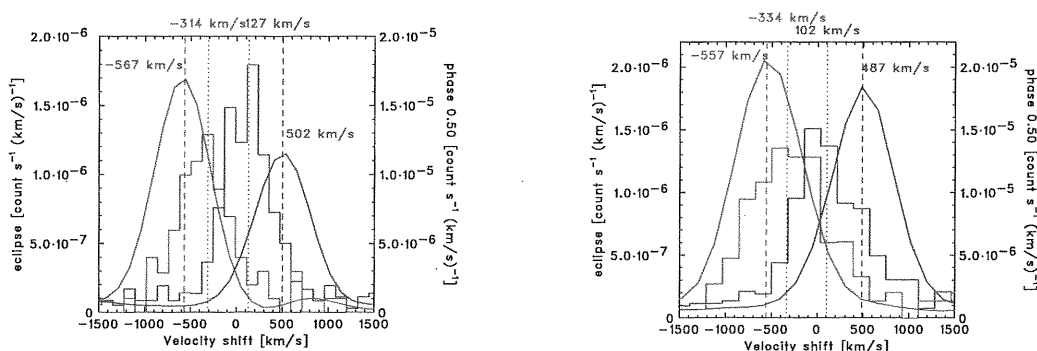


Figure 2: Vela X-1 の Si Ly α (左) と Mg Ly α (右) のラインプロファイル。ヒストグラムが観測データで、曲線で表されているのは、検出器のレスポンスをかけたシミュレーションの結果。赤が軌道位相 $\phi = 0.0$ のときで、青が軌道位相 $\phi = 0.5$ のとき。シミュレーションより、観測データのほうがドップラーシフトが小さいことが分かる。

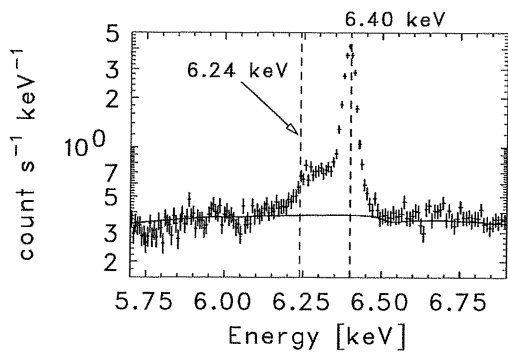


Figure 3: GX 301-2 で検出された鉄の $K\alpha$ 線とコンプトンショルダー

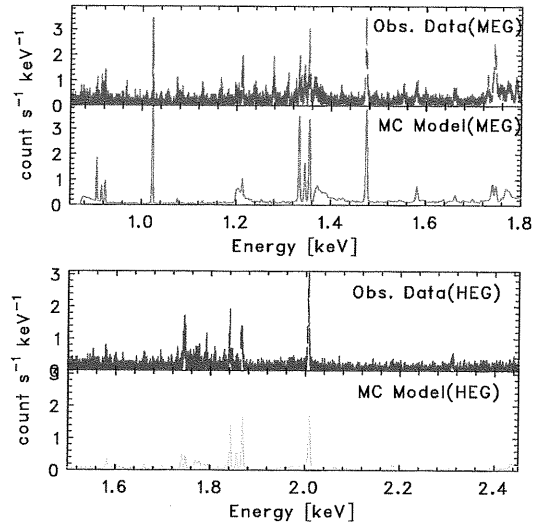


Figure 4: Vela X-1 の $\phi = 0.5$ のときの観測データとシミュレーション結果の比較。(上) Ne と Mg の領域 (0.85–1.80 keV), (下) Si の領域 (1.50–2.45 keV)。それぞれのパネルで上が観測データ、下が検出器のレスポンスをかけたシミュレーション結果。

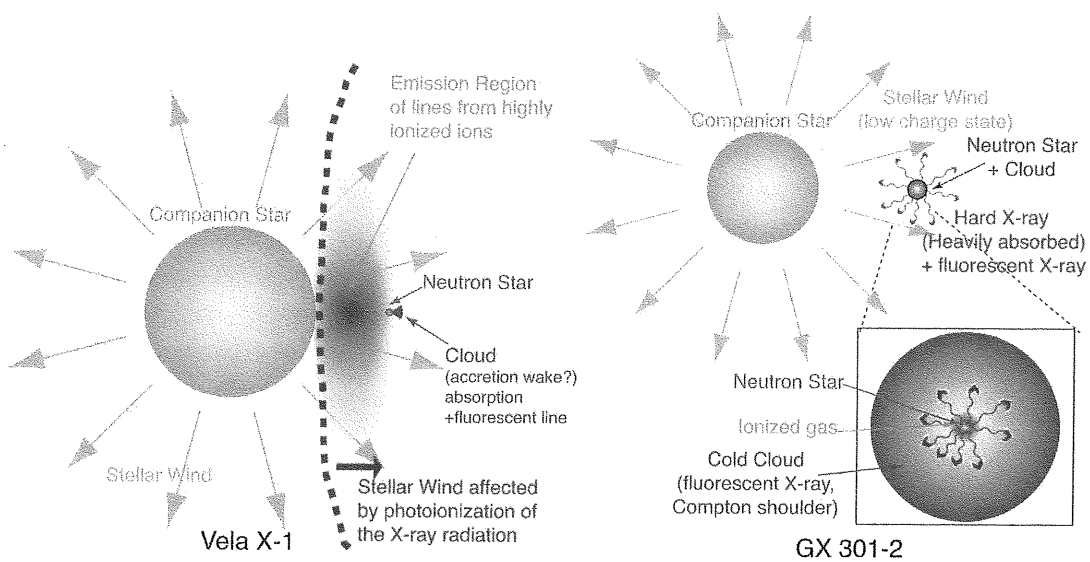


Figure 5: 今回の観測、および解析と考察で得た Vela X-1、GX 301-2 の連星系内部の物理状態。