

降着駆動型 X 線パルサーの連続 X 線放射機構の新モデル

近藤 恵介 (宇宙科学研究所、総合研究大学院大学 物理科学研究科)

Abstract

降着駆動型の X 線連星パルサーは、強磁場中性子星と通常の恒星からなる近接連星系で、周期的に強度変動する X 線が中性子星 (パルサー) から放射される天体である。この系では、恒星からのガスが中性子星の磁極に向かって流れ込んでおり、定在衝撃波面以降に形成される柱状の高温プラズマ (降着柱) から X 線が放射されている。一般に中性子星の磁軸と回転軸は一致しておらず、観測者からは回転に合わせて降着柱が見え隠れするので、X 線は中性子星の自転周期に合わせて規則的に変化する X 線パルスとして観測される。パルサーからの X 線は降着柱からの放射が支配的であり、そのスペクトルは、ベキ関数に指数関数的なカットオフを掛けた連続成分モデル (ECUT model) (N. E. White, et al., 1983, ApJ., 270, 711) や、正負の二種類のベキ関数を用いたモデル (NPEX model) (K. Makishima, et al., 1999, ApJ., 525, 978) で表現されてきた。しかし、これらのモデルは、形が合うというだけの理由で使われ続けてきた経験的なものであって、物理的な説明が伴っていないという問題点を持つ。本研究では、X 線連星パルサーの降着柱からの連続 X 線成分を、多温度黒体放射モデルを応用した新モデルで説明することを試みた。初めに、代表的な降着型 X 線連星パルサー Hercules X-1 の、「すざく」衛星による 1.5-70 keV の観測データを使い、予備的な解析を行った。結果、パルス平均のスペクトルを再現できる可能性を示した。

1 Introduction

1.1 降着駆動型 X 線パルサー

パルサーとは、短時間の強度変化を周期的に繰り返す天体のことである。その正体は高速回転する中性子星であると考えられており、放射のエネルギー源によって、主に回転駆動型と降着駆動型の二種類に分類される¹。回転駆動型のパルサーは、磁気を帯びた中性子星が回転する事による磁気双極子放射をしている。この場合、放射光のエネルギーは主に電波領域であるため、電波パルサーとして観測される。回転駆動型のパルサーは、単独の中性子星でもパルサーとして機能する。一方の降着駆動型のパルサーは、強磁場の中性子星と通常の恒星の連星系で、X 線パルサーである。このような系では、中性子星の磁場が強く、伴星から何らかの形で中性子星に向けて質量降着がある場合にパルサーとなる。強磁場の

中性子星に向けて流れ込む物質は、まっすぐに中性子星へ落ちる事はできない。あるところで降着流のガス圧と磁気圧がつりあうため、それ以上内側へは侵入出来なくなるためである。進行を妨げられた降着流は、磁力線に沿って移動し、やがては中性子星の磁極に向けて降着する。磁極付近の降着流は、あるところで衝撃波を作る。この衝撃波面以降で、降着流は光学的に厚い高温プラズマを形成すると考えられている。その形状が磁極の上方にのびる柱状であることから、これを「降着柱」と呼ぶ。高温の降着柱からは、X 線が放射される。一般に、中性子星の回転軸と磁軸は一致していないので、観測者からはこの降着柱が回転に伴い見え隠れすることになり、これが X 線パルスとして観測される。

降着駆動型 X 線パルサーの放射スペクトルの特徴について述べる。図 1 は、代表的な降着駆動型 X 線パルサー Hercules X-1 (Her X-1²) の X 線スペクトルである。Her X-1 の詳細については、§1.3 で触れる事とし、ここでは降着駆動型 X 線パルサー一般について述べる。降着駆動型 X 線パルサーの放射は降着

¹Anomalous X-ray Pulsar (AXP) や、Soft Gamma-ray Repeater (SGR) と呼ばれる天体は、この二種類のどれにも該当せず、中性子星の磁場のエネルギーそのものを原動力としていと考えられている。これらは、超強磁場の中性子星、すなわちマグネターであると考えられている。

²HZ Hercules, HZ Her と表記する

柱からの放射が支配的であり、スペクトル形はベキ関数に指数関数的なカットオフをかけた連続成分モデル (ECUT model) で表せることが良く知られている (White et al. 1983)。連続成分のカットオフ構造の中に、サイクロトロン共鳴散乱構造 (Cyclotron Resonance Scattering Feature, CRSF) を持つ X 線パルサーも存在する。サイクロトロン共鳴散乱とは、磁束密度が大きい環境下で、荷電粒子のラーマー運動の準位が量子化することで生じる現象である。サイクロトロン共鳴散乱は、観測的には、スペクトルの中に吸収構造として現れる。量子化されたラーマー運動の、プラズマ周波数の整数倍に相当する特定のエネルギー付近の光子が散乱を受けるためである。6.5 keV 付近には鉄原子に由来すると思われる輝線成分が存在している。約 1.5 keV 以下の低エネルギー側では、スペクトル形はベキ関数を超過している場合があり、このような構造を軟 X 線超過成分 (Soft Excess) と呼ぶ。Soft Excess は、X 線パルスの主成分、すなわちベキ関数成分からずれた位相で変動していることが知られており、降着柱とは起源を別にする成分ではないかと考えられている (Hickox et al. 2004)。このように、降着駆動型 X 線パルサーからの放射は、ベキ関数形の連続成分に様々な構造が加わり、複雑なスペクトルとなっている。しかしながら、全体を通して支配的な連続成分を説明する ECUT モデルは、観測結果を説明するために便宜的に持ち出されたもので、ベキ関数成分の由来やカットオフの原因は考察されていない。後に、正負の二種類のベキ関数を用いたモデル (NPEX model) が、正のベキ関数項に明確な意味を持たせたモデルとして提案された (Makishima et al. 1999)。しかし、これも、負のベキ関数成分については曖昧な説明にとどまっており、やはり経験的な部分を含んでいる。放射スペクトルの個々の特徴を調べる上で、基盤となっている連続成分に物理的な説明が伴っていないということは大きな問題である。

1.2 多温度黒体放射モデル

降着円盤からの多温度黒体放射モデルについて述べる。X 線天文では、多温度黒体放射は、ブラックホールの降着円盤からの放射を表すモデルに用いら

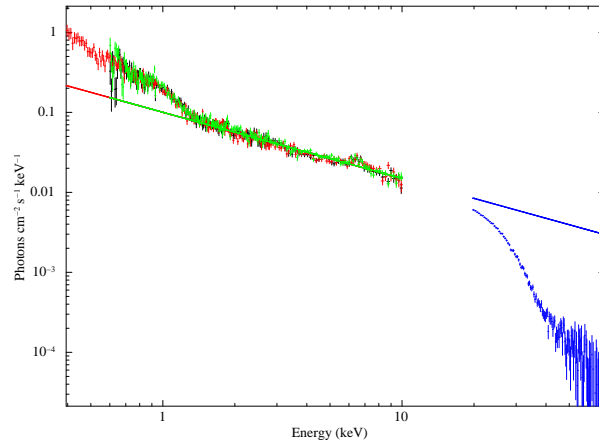


図 1: 降着駆動型 X 線パルサー Her X-1 のスペクトル。縦軸は 単位面積・時間・エネルギーあたりの光子数、横軸はエネルギー。主成分はベキ関数形をしており、高エネルギー側でカットオフがかかっている。30-40 keV 付近にはサイクロトロン共鳴散乱構造 (CRSF) がみられ、6.5 keV 付近には鉄元素に由来すると考えられる輝線構造がある。1.5 keV より低エネルギー側は、ベキ関数成分を超過している (Soft Excess)。

れる。ブラックホールの降着円盤では、物質はブラックホールの周りを回転しながら、時間をかけて徐々に落下して行く。落下のタイムスケールが大きいため、局所的に見ればエネルギーの収支がバランスしており、黒体放射をしていると考えられる。単位距離あたりに解放される重力エネルギーは重力源に近い程大きいので、降着円盤は内に向かう程高温になる。したがって、降着円盤は、温度が内から外に向かって勾配をもって連続的に分布するような黒体とみなすことができる。単一温度の黒体からの放射を、降着円盤の内縁温度 T_{in} から外縁温度 T_{out} まで積分する事で、多温度黒体放射のスペクトル形が得られる。

降着円盤からの多温度黒体放射を表す具体的なモデルについて述べる。降着円盤からの放射モデルとしては、X 線天文の分野では diskbb モデルが知られている (Mitsuda et al. 1984)。diskbb モデルは、光学的に厚く幾何学的に薄い、標準降着円盤を仮定している。モデルの中では、中心のブラックホールからの距離 r と降着円盤の温度 T が $T \propto r^{-p}$ ($p = 0.75$) という関係にあることを使っているが、実際はその

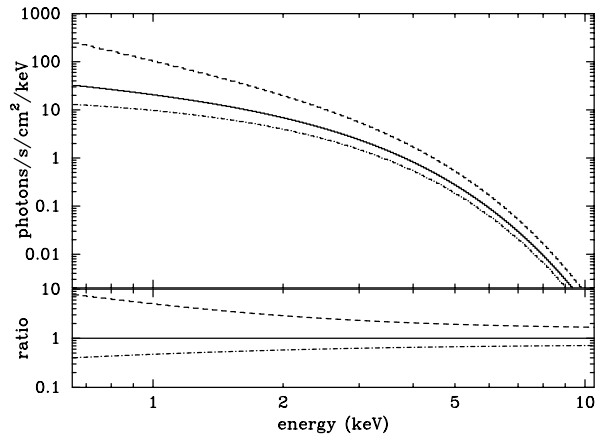


図 2: 多温度黒体放射モデルのスペクトル (Kubota et al. 2004)。中央の実線は $p=0.75$ 、すなわち diskbb モデル。その上の破線は $p=0.5$ のとき、下の一点鎖線は $p=1.0$ のときのもの。降着円盤内縁温度の T_{in} は、全て $T_{in}=0.8$ keV としている。

通りではないと考えられる。そこで、この温度勾配を表す定数 p を free parameter として、diskbb モデルよりも自由度を上げた diskpbb モデル (Kubota et al. 2004) が提案された。温度勾配を自由な変数とすることで、降着円盤の厚みが変化したりするような場合にも対応することができる。本研究で用いたのは、この diskpbb モデルである。図 2 は、diskbb および diskpbb モデルのスペクトルである。

1.3 Hercules X-1

新モデルの適用を試みるための試験的な解析対象には、代表的な降着駆動型 X 線パルサーである Hercules X-1 (Her X-1) を選んだ。ここでは、Her X-1 について述べる。Her X-1 は、強磁場中性子星と晩期型星との連星系で、構成からのガスが、Roche lobe を超えて中性子星に流れ込み、降着駆動型の X 線パルサーとなっている。Her X-1 は、パルス周期 (自転周期) 約 1.24 秒、連星系の公転周期約 1.7 日、このほか、降着円盤の歳差運動によると思われる 35 日の周期で、放射強度が変動する。35 日周期の中には main-on、short-on、low の三つの state がある事が知られている。Her X-1 は、明るい X 線パルサーで、過去に様々な研究がされ、よく調べられた天体である。

2 Methods and Observations

2.1 多温度黒体放射モデルの、降着柱への適用

中性子星の降着柱では、衝撃波面以降では落下のタイムスケールが大きいという点がブラックホールの降着円盤と共通しているため、降着円盤と同様の議論ができると考えられる。従って、降着柱は、中性子星に近い程高温になるような温度勾配を持つ多温度黒体をしているといえる。円盤と柱状という点では扱う物の形状は違うが、最終的に得られるスペクトル形は類似すると考えられる。実際に、図 2 に示すように、diskbb や diskpbb モデルはべき関数的な部分に高エネルギー側でカットオフがかかるような特徴を持っており、図 1 のような実際の観測データと共通している。多温度黒体放射を連続成分として用い、そこに輝線成分や吸収構造を加える事で、物理的にもっともらしい解釈を伴ったモデルを構築出来ると考えられる。

モデルおよび fitting 作業は、NASA が提供する X 線天文衛星のデータ解析ソフト、“XSPEC v12” の機能を使用した³。XSPEC 上のモデル構成は、cyclabs* (gaussian + diskpbb) とした。cycleabs は、CRSF の吸収構造を表すモデルで、gaussian は、6.5 keV 付近の鉄輝線構造を表す。初期値の参考には、過去の研究例 (Asami et al. 2014)、(Enoto et al. 2008) を参考にした。fitting に使用したエネルギー範囲は、1.5-70 keV とした。Soft Excess 構造は、降着柱とは別起源の放射である可能性があるため、今回の fitting 範囲からは外した。

2.2 「すざく」による Her X-1 の観測

今回解析したデータについて述べる。観測対象は、降着駆動型 X 線パルサー Hercules X-1 である。観測には、日本の X 線天文衛星「すざく」を用いた。「すざく」は、複数の検出器を組み合わせる事で、幅広いエネルギー帯域を同時に観測する事が出来るのが大きな特徴である。降着駆動型 X 線パルサーの連続成分

³ソフトとモデルの詳細は <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/> を参照

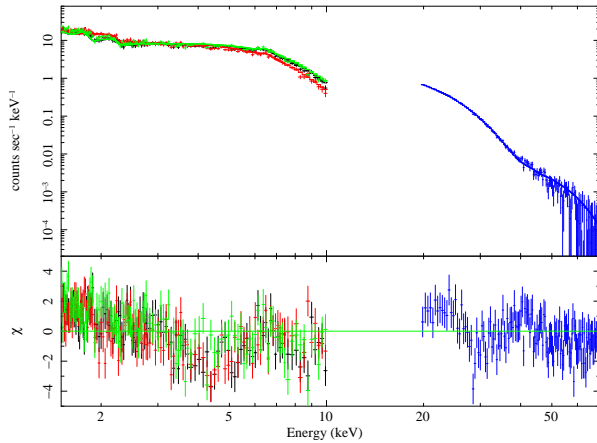


図 3: 連続成分に diskpbb を Her X-1 の観測データに適用した結果。縦軸は、単位時間・エネルギーあたりの検出器のカウント数、横軸はエネルギー。黒、赤、緑のデータ点はそれぞれ、XIS0、1、3 を表しており、青のデータ点は HXD PIN を表している。下段は、モデルとデータ点との残差を χ^2 のずれで表したものの。

は、1 keV 以下から 100 keV 付近にわたる広いエネルギー範囲で観測されるため、「すざく」を用いるのが適している。主に 0.4-10 keV の範囲を観測するのは、CCD 検出器 XIS (X-ray Imaging Spectrometer)、およそ 10-700 keV を観測するのは HXD (Hard X-ray Detector) である。XIS は、XIS0、XIS1、XIS2、XIS3 の、全部で 4 つの CCD カメラで構成されている。今回使用したのは、XIS0、XIS1、XIS3 の三つのデータである。HXD は、PIN 型半導体検出器と、GSO シンチレーターを組み合わせた構造になっており、今回は PIN 型半導体検出器 (HXD PIN) の X 線のデータを使用した。観測時刻および時間は 2008 年 2 月 21 日から 22 日にかけての 64 ksec で、観測時期は、Her X-1 の 35 日周期の変動のなかで最も明るい main-on state を狙った。

3 Results

図 3 は、「すざく」による Her X-1 の観測データに、連続成分を diskpbb としたモデルで fitting をした結果である。表 1 に、fit 結果のパラメータを示す。

表 1: Her X-1 のパルス平均スペクトルの fit 結果

成分	パラメータ	数値	備考
cyclabs	Depth0	1.74	
	E0	38.0 keV	
	Width0	11.0 keV	固定
	Depth2	1.7	固定
	width2	17.0 keV	固定
gaussian	LineE	6.5 keV	固定
	Sigma	0.23 keV	固定
	norm	2.08E-03	
diskpbb	Tin	11.9	
	p	0.76	
	norm	2.37E-02	

Reduced $\chi^2 = 1.9134$ for 477 degrees of freedom

4 Discussion

fit 結果は、Reduced $\chi^2 \simeq 1.9$ という、良く合っているとは言えない物であった。まだ初期値設定や固定パラメータの選び方などの調整が必要であると考えられる。また、fit 結果がうまく合っていないのは、連続成分として使った多温度黒体放射モデルの diskpbb は、あくまで円盤状の物体からの放射を仮定したモデルなので、降着柱からの放射に適用するためにはモデル自体に修正を加える必要があるためだと考えられる。しかし、既存のモデルを組み合わせただけで得られた結果としては、調整次第ではモデルとデータを十分に近づける事ができる可能性を示していると言える。

Reference

- N. E. White, et al., 1983, ApJ., 270, 711
- K. Makishima, et al., 1999, ApJ., 525, 978
- K. Mitsuda et al., 1984, PASJ, 36, 741, 759
- R. C. Hickox et al., 2004, ApJ, 614, 881, 896
- A. Kubota et al., 2005, ApJ, 631, 1062, 1071
- F. Asami et al., 2014, PASJ, 66, 44
- T. Enoto et al., 2008, PASJ, 60, 57, 68