

硬 X 線偏光計 PoGO+ による「はくちょう座 X-1」の観測結果

高橋 弘充、河野 貴文、大橋 礼恵、内田 和海、水野 恒史 (広島大学)、釜江 常好 (東京大学)、片岡 淳 (早稲田大学)、田島 宏康 (名古屋大学)、Maxime Chauvin, Mette Friis, Miranda Jackson, Mozsi Kiss, Victor Mikhalev, Mark Pearce, Theodor Stana (スウェーデン王立工科大学)、H-G. Floren (ストックホルム大学)

1. 硬 X 線偏光検出器 PoGO+ 気球実験の 2016 年フライト

Polarized Gamma-ray Observer (PoGO Lite/PoGO+ : PI Mark Pearce スウェーデン王立工科大学) 気球実験は、20~180 keV の硬 X 線帯域で天体の偏光度と偏向角を測定する。シンクロトロン放射や散乱プロセスによって生じる偏光は、X 線・ガンマ線帯域においても、中性子星やブラックホール、超新星残骸、活動銀河核などにおける高エネルギー放射機構を研究する上で非常に強力な観測手法と考えられている。しかしながら、非常に明るい天体現象であるガンマ線バーストを除いては、現在までに有意な偏光の検出が報告されている天体は「かに星雲」(パルサー星雲)と「はくちょう座 X-1」(ブラックホール連星系)のみであり、その観測帯域も OSO-8 衛星による数 keV と、INTEGRAL 衛星による数百 keV の 2 帯域のみに限られている。こうした中で、ASTROSAT 衛星で偏光観測が試みられたり、本格的な X 線・ガンマ線偏光検出器の開発が世界中で進められている (IXPE 衛星等)。

我々の PoGO Lite/PoGO+ 実験は数日以上 of 長時間フライトを行うことで、世界に先駆けて「かに星雲」と「はくちょう座 X-1 (low/hard 状態では「かに星雲」と同程度のフラックスで観測可能)」の硬 X 線偏光観測を実施してきた。本講演では、PoGO+ が 2016 年 7 月 12~18 日の 7 日間に実施したフライトで得られた「はくちょう座 X-1」low/hard 状態の観測結果について報告する (気球ゴンドラやフライト状況の詳細[1]、「かに星雲」の観測結果[2]については、昨年 2017 年の集録参照)。このフライトでは、スウェーデン Esrange 実験場から、グリーンランド上空を経て、カナダのビクトリア島まで到達した。高度は約 40km に到達し、予定通りに運用・姿勢制御 (約 0.1° のポインティング精度) も実施できたため、「はくちょう座 X-1」を 6 回観測することに成功した。この PoGO+ の打ち上げから着地までの映像が、スウェーデン宇宙公社により youtube に投稿されている (<https://www.youtube.com/watch?v=0oxd9-Wl-Qg>)。この上空での映像からも、ゴンドラが方位角を規則正しく変えていることが分かり、天体観測とバックグラウンド観測を予定通り約 15 分ごとに交互に実施できていることを確認することができる。

2. PoGO+ によるブラックホール連星系「はくちょう座 X-1」の観測

2016 年の 7 日間のフライトで、PoGO+ 偏光計は low/hard 状態にあった「はくちょう座 X-1」を 6 回観測することに成功した。以下、論文[3]で発表した科学成果について報告する。

PoGO+の硬 X 線偏光計で「はくちょう座 X-1」観測中に得た偏 2-hit イベントのライトカーブが図 1 である。2-hit イベントとは、主検出部のプラスチックシンチレータ 2 ユニットが同時に反応し、コンプトン散乱と光電吸収によって生じたと考えられるイベントであり、散乱角を測定する偏光解析に利用される。PoGO+には撮像能力はないが、15 分おきに姿勢を変え「天体、右側 5 度のバックグラウンド、天体、左側 5 度のバックグラウンド、天体。。。」と天体観測とバックグラウンド観測を交互に繰り返しているため、ほぼ同時期のバックグラウンド情報が得られている。15 分間では、バックグラウンドの変化は小さいと考え、観測時間で規格化してバックグラウンドを差し引いた解析を行う。観測時間の総計は、天体観測が 123.5 ks、バックグラウンド観測が 109.6 ks であった。

図 2 は全観測時間で得られたモジュレーションカーブ (2-hit イベント間の角度であり、コンプトン散乱の散乱角分布に対応する) である。天体からの光が偏光していれば、クライン仁科の効果により、偏光方位角とは垂直方向にコンプトン散乱されやすい。よって、 360° モジュレーションカーブ内の 2 方向で検出されるイベント数がピークをもつ (180° 成分)。PoGO+では、偏光計を 1° /秒で回転させているため、その回転角をハニカム構造で決まる 60° 刻みに足しており、 60° よりも細かい 1° 刻みのプロットになっている。3つのモジュレーションカーブは上から、(上)「はくちょう座 X-1」観測中、(中) 左右 5° ずらしたバックグラウンド領域を観測中、(下) 観測時間で規格化してからバックグラウンドを差し引いた正味

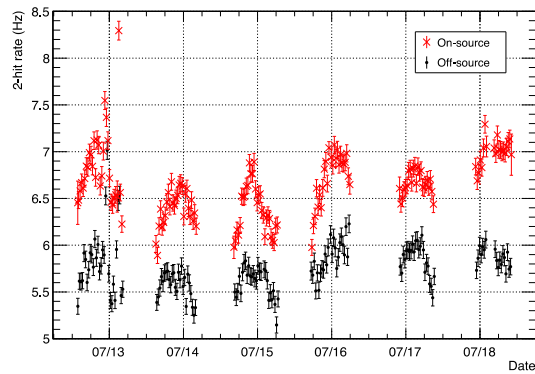


図 1: 「はくちょう座 X-1」観測中の 2-hit イベントのライトカーブ。赤: 天体観測中、黒: 左右 5° ずらしたバックグラウンド領域を観測中。

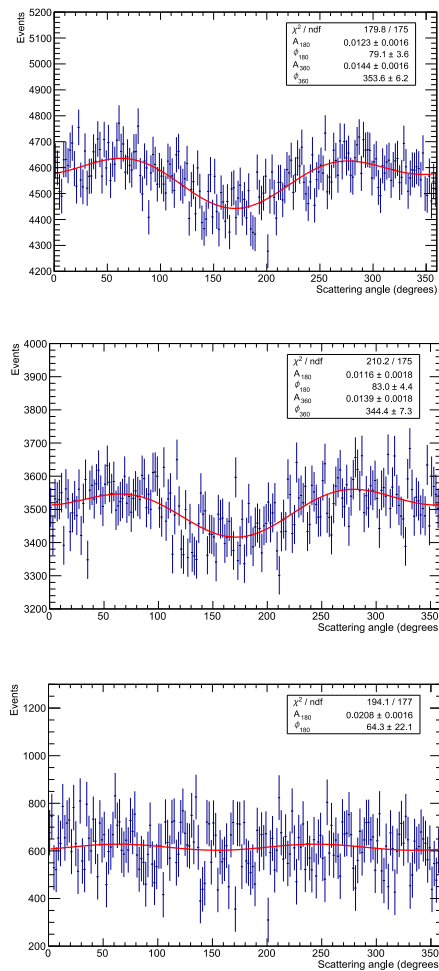


図 2: 「はくちょう座 X-1」から得たモジュレーションカーブ。上: 天体観測中、中: バックグラウンド観測中、下: 正味の天体信号 (上から中を引いたもの)。

の天体信号、になっている。

(中) バックグラウンド観測時でも、モジュレーションカーブは平坦ではない。ただし、純粋な偏光によって生じる 180° 成分では再現されず、 360° 成分 (360° 内の 1 方向のみでイベント数が多い) が卓越している。この 360° 成分のピークは、検出器の上下方向に対応することから、検出器の下部から入射する大気中性子バックグラウンドによって生じていると考えられる。(下) バックグラウンドを差し引いた正味の天体信号は、 360° 成分も 180° 成分も必要なく、 180° 成分の上限値のみで再現される。これは、バックグラウンドを精度良く差し引けており、また天体からの偏光信号も微弱であることを示している。なお、同じフライト中に観測したほぼ同じ光度であった「かに星雲」については、偏光度 21% を 4σ 以上の有意度で検出することに成功している。そのため、「はくちょう座 X-1」の偏光度が「かに星雲」よりも低いことは明らかである。

図 3 に、検出器の応答を加味してベイズ推定で求めた「はくちょう座 X-1」の偏光情報の上限値を示す。それぞれ偏光度と偏光方位角に射影することによって上限値を求めると、偏光度は 8.6% 以下 (90% 信頼区間)、偏光方位角は $154 \pm 22^\circ$ (1σ 信頼区間) となった。この角度は、電波イメージで観測されているジェットの向き (降着円盤の表面と垂直と推定される) $158 \pm 5^\circ$ と一致している。偏光方位角が 90° 異なる円盤表面と平行な場合には、偏光度は 2.2% 以下とより厳しく制限される。

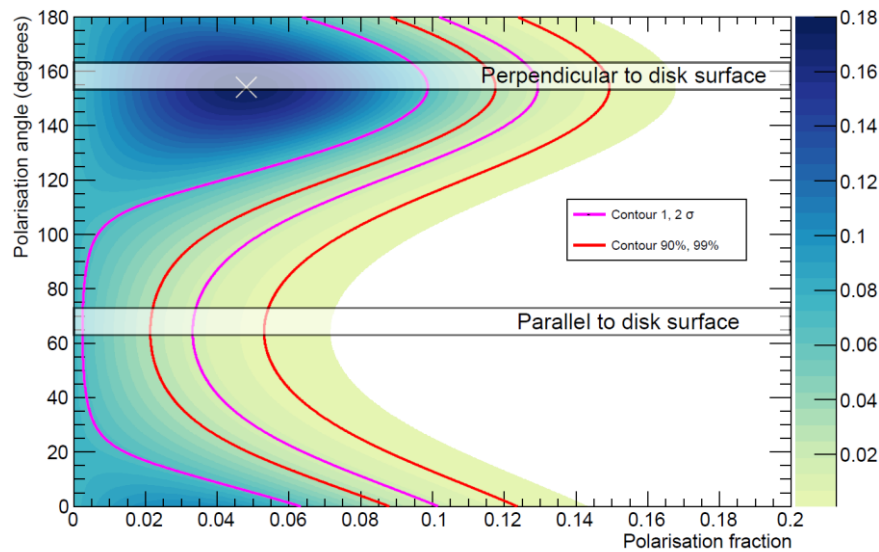


図 3 : PoGO+で得られた「はくちょう座 X-1」の偏光情報の上限。

3. 考察

ブラックホール連星系の low/hard 状態では、コロナの形状および降着円盤の最内縁が最終安定軌道 (ISCO) に到達しているのかが 30 年来の論争になっている。コロナが広がった構造で円盤の最内縁は ISCO に到達していない「広がったコロナ」モデルと、コロナはコンパクトでブラックホール近傍に存在し、円盤の最内縁も ISCO に到達している

と考える「コンパクトなコロナ」モデルである（図4参照）。精力的に行われているエネルギースペクトルや時間変動解析では、複数の放射成分の縮退が解けずに議論となっている。「広がったコロナ」モデルでは、ブラックホールの相対論的な効果が弱いため、コロナの放射が円盤で散乱される散乱光は少ない。一方で、「コンパクトなコロナ」モデルでは、ブラックホールの一般相対論的な効果が非常に強いため、散乱光が非常に強い。散乱光の強度が異なるため、散乱によって生じる硬X線の偏光度も、両者ではそれぞれ数%と微弱か、約15%と強いことが予想されていた。

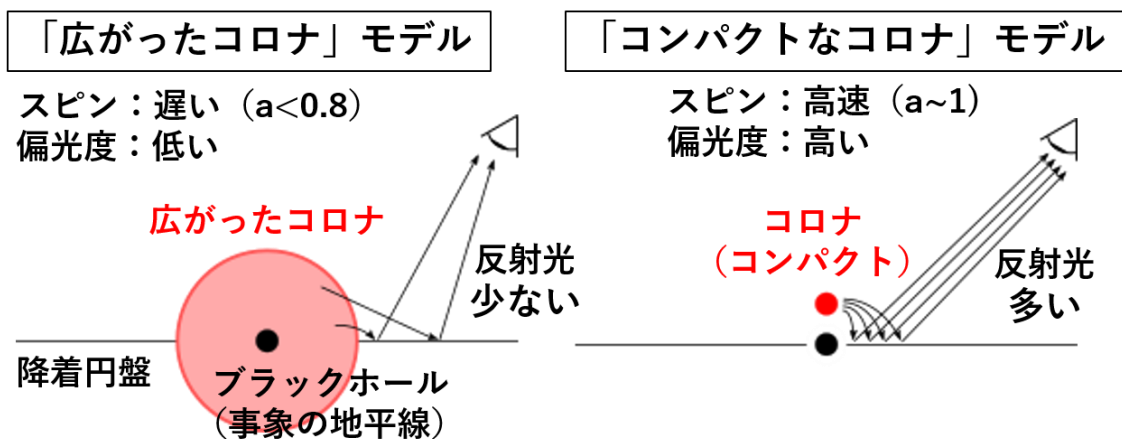


図4: ブラックホール連星系のlow/hard状態で提唱されている2つのコロナモデル。

上の2で述べたように、今回のPoGO+の観測結果は偏光度が8.6%以下と微弱であり、この結果は「コンパクトなコロナ」モデルを棄却する。偏光方位角についても、「広がったコロナ」モデルは円盤表面と垂直方向を予想し、PoGO+のデータと一致する。一方で、「コンパクトなコロナ」モデルは、相対論的な効果によって偏光方位角も曲げられ、円盤表面と垂直な方向からずれる。この角度についても、「コンパクトなコロナ」モデルはPoGO+のデータとは矛盾する。

以上から、我々PoGO+チームでは、ブラックホール連星系「はくちょう座X-1」のlow/hard状態では、PoGO+による硬X線偏光観測の結果は単純な「コンパクトなコロナ」モデルを棄却し、「広がったコロナ」モデルを支持すると考えている。

参考文献

- [1] M. Chauvin et al., Nuclear Instruments and Methods A, Vol. 859, 125-133, 2017, “Calibration and performance studies of the balloon-borne hard X-ray polarimeter PoGO+”
- [2] M. Chauvin, et al., Scientific Reports, Vol 7, 7816, 2017 “Shedding new light on the Crab with polarized X-rays”
- [3] M. Chauvin, et al., Nature Astronomy, Vol. 2, 652, 2018, “Accretion geometry of the black hole binary Cygnus X-1 from X-ray polarimetry”