

IXPE衛星が観測した ブラックホール候補天体



管



郡司

管 佑真¹・郡 司 修 一^{1,3}・
水 野 恒 史^{2,4}・高 橋 弘 充^{2,5}

〈¹ 山形大学 〒990-8560 山形県山形市小白川町 1-4-12〉

〈² 広島大学 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: ¹ mokaash7456@icloud.com, ³ gunji@sci.kj.yamagata-u.ac.jp,

⁴ mizuno@hepl.hiroshima-u.ac.jp, ⁵ hirotaka@astro.hiroshima-u.ac.jp



水野



高橋

恒星質量のブラックホール連星に対してX線偏光観測が実現すれば、ブラックホールのスピンや周辺に存在するコロナの場所や形状を明らかにできると考えられてきました。X線での偏光観測は他波長に比べ遅れていたため、そのような観測は今までできませんでしたが、2021年末にX線偏光撮像衛星IXPEが打ち上がり、ついにブラックホール連星のX線偏光観測が実現しました。ここではブラックホールのX線偏光観測の意義や、実際にIXPEで観測を行ったブラックホール天体の成果をいくつか紹介します。

1. はじめに

太陽の8倍以上重い星は大変寿命が短く（約1億年またはそれ以下）、最後に重力崩壊とそれに続く超新星爆発を起こします。元々の星（親星）の質量が太陽の30倍程度以下では、中性子の固まりである中性子星が残され、パルサーやマグネターといった高エネルギー天体として観測されます。親星の質量がさらに大きいと中心核の重力はさらに強くなり、中性子でさえつぶれてしまうため、ブラックホールが残されます。ブラックホールは単独では光ることができませんが、恒星とペアになり近接連星系をなしている場合（ブラックホール連星）、相手の星から物質が落ちてくると、その物質はブラックホールの周りに円盤を形成し

ます。これを降着円盤と呼びます。特に恒星質量のブラックホール（半径数10 km）はポテンシャルの井戸が深いので、ブラックホール近傍の降着円盤の温度は1000万度に達し、1 keV程度のX線を放出します。このX線のエネルギースペクトルにはいくつか典型的なものがあり、特に有名なものが“High/Soft状態”と“Low/Hard状態”と呼ばれるものです [1, 2]。High/Soft状態は降着円盤からの熱的放射が卓越した状態だと考えられ、大体1 keV付近にピークをもった黒体放射のスペクトルが観測されます。一方Low/Hard状態では比較的光度は低いですが、数10 keVから数100 keVまでのびるベキ型のエネルギースペクトルが観測されます。このようなエネルギーの高いX線は、希薄な高温ガスが源となって生じると考えられて

おり、それをコロナと呼びます。またそれ以外にもしばしば、円盤に垂直方向にジェットと呼ばれる物質の噴流が見られます。ブラックホールの側まで行って見てきたかのように書いていますが、恒星質量のブラックホールの場合、円盤やコロナは余りにも小さすぎて実際に地球から見ることはできません。しかし「撮像」が実質的に不可能な恒星質量のブラックホールの周辺の様子を調べる強力な手段があります。それがX線偏光観測です。この記事では、いくつかの恒星質量のブラックホールに対してIXPEが行った偏光観測の結果を紹介します。

2. X線偏光観測で分かる物理

2.1 High/Soft状態でのスピンの観測

High/Soft状態は降着円盤からの輻射を見ていると書きましたが、一概に降着円盤と言ってもその質量降着率によっていくつかの状態が存在します [3]。その中で最もスタンダードなモデルが標準降着円盤モデルで、ShakuraとSunyaevにより提唱され [4]、NovikovとThorneにより相対論的モデルへの拡張がなされました [5]。この標準降着円盤にはいくつかの特徴があります。例えば、1) 幾何学的に円盤の厚みが薄い、2) 光学的に厚い、3) 重力エネルギーは輻射に効率よく使われ黒体放射が起こっている、4) 円盤の内側ほど温度が高くなる、等です。そしてさらに説明しておかなくてはいけないのが、5) 円盤には最内縁半径が存在する、6) 円盤からの放射を斜めから見るとX線は偏光している、の2つです。

まず5) ですが、ブラックホールにはその周りを安定して円運動できる最小の軌道半径が存在し

ます^{*1}。これをInnermost Stable Circular Orbit (ISCO) と呼びます。この半径よりも内側では安定して円軌道を描くことができないため、降着円盤もここで途切れていると考えるのが普通です。例えば回転していないシュバルツシルトブラックホールでは、その半径はシュバルツシルト半径^{*2}の3倍です。一方回転しているカーブラックホールの場合、そのISCOの値が変わります。ブラックホールの回転(角運動量)は、通常 a_* ($-1 < a_* < 1$) というスピンパラメーターを使って表し^{*3}、 $a_*=1$ ではISCOはシュバルツシルト半径の2分の1になります。つまり原理的には降着円盤はかなり内側まで入り込めます。スピンによってISCOが変わるという話は後で説明する偏光の話と大きく関係します。次に6) ですが、これは単に熱輻射をしている円盤でも生じる現象で、チャンドラセカールが最初に計算しました。円盤を真上から見るとX線は無偏光ですが、円盤の回転軸に対して傾いた方向(円盤の回転軸と観測者の視線方向のなす角を傾斜角と呼びます)から見た場合には、観測されるX線も若干偏光します(傾斜角 75° では4%程度、 90° では11%程度)。そしてその偏光方向は円盤の回転軸と視線方向の張る面に垂直です [9]。詳しい理屈は今月号のIXPE特集の理論の記事で解説されています。

一般相対論を考慮した場合、6) のX線での偏光のしかたがどのように変わるかは、1977年頃から研究が行われ [10]、2009年にはリターニング効果という重要な効果がSchnittmanにより導入されました [11]。リターニング効果とは、一度降着円盤から出て行ったX線がブラックホールの重力場で曲げられ、再び降着円盤に戻り、散乱

^{*1} ブラックホールの標準的な教科書にも説明があります [6, 7]。

^{*2} ブラックホールの質量を M 、光速度を c 、万有引力定数を G としたときに、シュバルツシルト半径 R は $2MG/c^2$ として書けます。例えば太陽の質量をこの式に入れると大体3 km程度になります。相対論の基礎的なことは佐藤先生の教科書を参考にしました [8]。

^{*3} a_* とは $Jc/(GM^2)$ で定義される値で、 J はブラックホールの角運動量です。ブラックホールの角運動量の大きさには上限値が存在し、それが $-1 < a_* < 1$ に対応します。

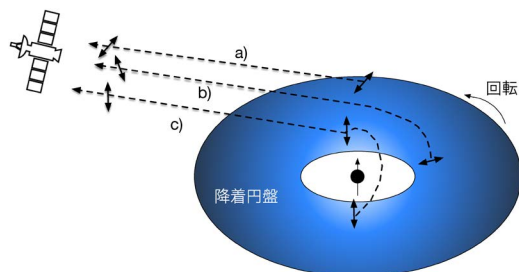


図1 降着円盤から観測者に届く3つのX線のパスが描かれている。a) は重力の影響をあまり受けないで観測者にダイレクトに届いたX線。偏光方向は回転軸に垂直となる。b) は重力の影響をある程度受けて軌道が曲げられて観測者に届いたX線。軌道が曲げられたことによって偏光方向も回転し、偏光度を下げる働きをする。c) はリターニング効果のパス。散乱前と後のX線の方を考えると、X線は回転軸方向に強く偏光している。

されて観測者に届くというものです。図1はSchnittmanの計算を理解するためのポンチ絵です。図のパスa) はブラックホールから遠く離れたところから放出されたX線です。重力の影響をあまり受けず、ほぼダイレクトに観測者に届きます。つまり偏光方向は円盤を離れたときから変わらないため、チャンドラセカールの計算と変わらない偏光度と偏光方向（降着円盤の回転軸に垂直）になります。ブラックホールから遠く離れた場所では降着円盤の温度は低いので、比較的エネルギーの低いX線が当てはまります。b) はブラックホールの側を通過しようとしているX線です。降着円盤の内側であろうが外側であろうが、どこから出ても構いませんが、このX線は重力場の影響で軌道を大きく曲げられ、その軌道に沿って偏光方向も回転します。この効果により偏光度は全体的に下がります。この効果は本来エネルギーに寄らず同等に起こりますが、より高いエネルギーのX線の方が降着円盤の温度が高い内側から出やすいため、高いエネルギーのX線で偏光度が顕著に下がります。c) はb) に似ていますが、リターニング効果が起こり降着円盤に戻ってから

散乱されて観測者に届いています。リターニング効果はブラックホールの上をまたぐようなパスで起こりやすく、それはそのときに大きく軌跡が曲げられるからです。図では円盤に戻ってきたX線が散乱されて進行方向が90度変化しています。散乱前のX線の偏光方向は、回転軸に垂直な場合が多少多いですが、回転軸に平行なものも半数弱います。そして、どちらが観測者の方向に散乱されやすいかといえば、それはトムソン散乱の性質により回転軸に平行な偏光方向を持つX線です。このようにリターニング効果が起こると、回転軸に平行な偏光方向を持つX線が観測されます。これは降着円盤の内側から出てくるX線で主に起こります。つまりエネルギーの高いX線で起こる効果です。

以上をまとめると、低エネルギー側では偏光方向は回転軸に垂直であり、偏光度はチャンドラセカールの計算とほぼ一致します。エネルギーが上がってくると、重力場によって影響を受けるX線が増えるため、偏光度は徐々に下がります。さらにエネルギーが上がるとリターニング効果が支配的になり、偏光度が再び上昇し、偏光方向は回転軸に平行になります。先ほど述べたようにスピンの大きさと降着円盤がよりブラックホール近傍まで入り込むため、リターニング効果が起こりやすくなります。そのため、低いエネルギーでも上で説明した効果が起こることになります。図2はSchnittmanの論文の図を一部改変した図ですが[12]、上の説明を踏襲しているのがわかると思います（Schnittmanの偏光方向の定義は90度が回転軸に対して平行、回転軸に垂直な偏光方向を0度としています）。この図を見てわかるのは、偏光度最小のエネルギーがスピンの値によって変わるということです。つまりエネルギーに対して偏光がどのように変化するかを調べれば、スピンの大きさを知ることができます。ただしこの図はブラックホールの質量、光度、傾斜角等のパラメーターにも依存することに注意が必要です。なお今

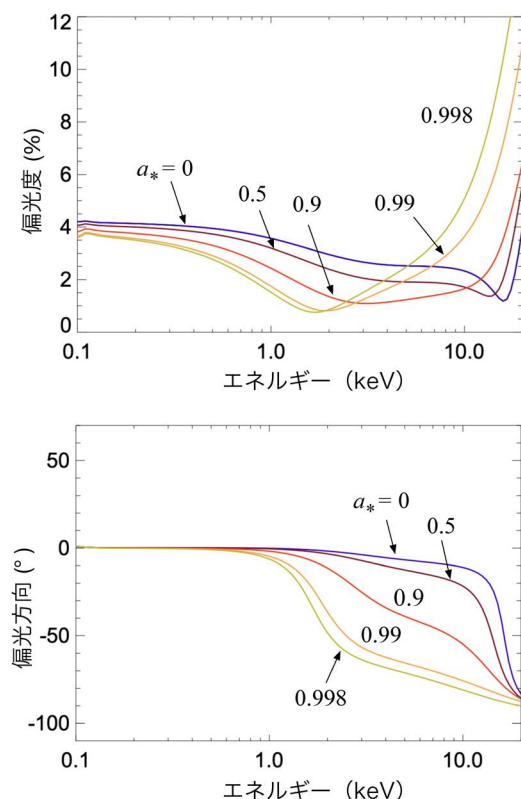


図2 上の図はエネルギーに対する偏光度、下の図は偏光方向を表している [12]. 図中には a_* が異なる何本かの線がある. 最初, 偏光方向は回転軸に対して垂直であり, エネルギーが上がるに従って回転軸に対して平行方向に変化する. 偏光度はエネルギーが上がるに従って落ちていき, あるエネルギーで極小値を迎えると, そこから上昇に転じる. スピンが大きいくほど, その極小を迎えるエネルギーが下がる. この図は傾斜角 75° , ブラックホールの質量が $10 M_\odot$, 光度がエディントン限界の10分の1の場合の図である.

月号の理論の記事にもこの話は一部書かれているので, 合わせてご覧下さい.

なお, 以上で説明した方法以外にスピンを知る方法もあります. 例えば降着円盤の光度は, 最内縁の温度の4乗に比例し [13], その比例定数が最内縁半径の2乗に比例します. そして光度と円盤の温度をスペクトルから調べて, ブラックホールのスピンを導出するスペクトルフィッティング法

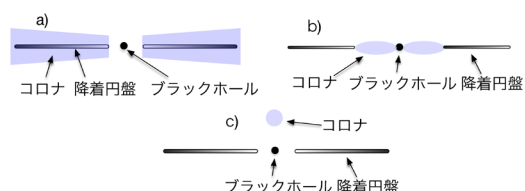


図3 すべての絵は降着円盤を横から見ている. 図a) はWedgeモデルと呼ばれ, 降着円盤を挟むようにコロナが広がっているモデル. b) はTruncated diskモデルと呼ばれ降着円盤の内側にコロナがある. c) はLamp-postモデルと呼ばれ, ブラックホールの上にコンパクトなコロナが存在する.

があります [14]. また鉄輝線を使って調べるという方法もあります [15]. そのため偏光を観測して初めてスピンのわかるという訳ではありません. しかし, スペクトルからスピンを測る方法は連続成分のモデリングに依存するため, 独立な方法としてX線偏光は重要です. また偏光を使った方法の場合, ブラックホール周辺の重力場の様子やリターニング効果が起こっているのかまでわかるため, 情報量に富んだ方法と言えます.

2.2 Low/Hard状態でコロナの位置を調査

Low/Hard状態では, コロナから直接観測者に届くX線, 降着円盤からダイレクトに届くX線, コロナから出て降着円盤で散乱されて届くX線, 降着円盤から出てコロナで散乱されて届くX線などが観測されるはずで. そしてその割合は, コロナと降着円盤の位置にも依存するでしょう. その中で散乱されて届くX線を考えると, その偏光度や偏光方向は降着円盤とコロナ, そして観測者の位置関係に依存します. つまりこの散乱X線の偏光を観測すると, 降着円盤に対してコロナがどこに存在するのかを明らかにできる可能性があります. 現在のところ, コロナの位置を巡って様々なモデルが提唱されています. 例として図3にそのいくつかを紹介しておきます. 図3a) はWedgeモデルと呼ばれるもので, 降着円盤を挟み込むような形になっています [16]. 図3b) はTruncated

diskモデルと呼ばれ、降着円盤の内側にコロナが存在します [17]。また降着円盤がコロナに多少入っている可能性もあります [18]。また図3c)はLamppostモデルと呼ばれるもので、ブラックホールの上方に孤立してコンパクトなコロナが存在するモデルです [19]。X線偏光でこれらのモデルの区別、つまりコロナの幾何構造の制限ができると期待されていました。

3. IXPE衛星での偏光観測

ここからは実際にIXPE衛星で観測したいくつかのブラックホールに関して、観測データを交えながらお話しします。IXPE衛星に関しては、4月号のIXPE全体の記事やIXPEの前Principal InvestigatorであったWeisskopf博士の論文をご覧ください [20]。

3.1 High/Soft状態の観測

ブラックホールのスピンの情報を引き出すには、ブラックホールがHigh/Soft状態であることが重要です。そして偏光度や偏光方向のエネルギー依存性を調べるには十分な光子統計が必要になります。また前章で説明したように、傾斜角が大きい方が偏光度が高くなるため、傾斜角が大きいブラックホールの方が有利です。表1は現在(2023年12月時点)までに、IXPEで観測されたHigh/Soft状態のブラックホールをまとめたものです(ただしこの時点で論文が発表されていないものは除きました)。同じ天体を何度も時期をおいて観測したため、それぞれの観測時間も書いておきます。表1にリストされている天体のうち、スピンを引き出すのに適した天体である4U 1957+115とLMC X-3に的を絞って説明します。それ以外の天体は、以下の事情からここでは紹介を省きます。まずCyg X-1は過去のスペクトル解析

表1 IXPEにより観測されたHigh/Soft状態のブラックホール(BH)。観測時間は天体が地球に隠れる時間帯などを除いた有効観測時間(Livetime)。BHの種類は相手の星の質量により大別される*4。

天体名	観測時間 (ks)	BHの種類
4U 1630-47	~460	LMXB [21]
LMC X-1	~562	HMXB [22]
Cyg X-1	~21	HMXB [23]
Cyg X-1	~31	HMXB [23]
4U 1957+115	~571	LMXB [24]
Cyg X-1	~25	HMXB [23]
LMC X-3	~562	HMXB [25]

から比較的大きいスピンが示唆されており、観測時間は短いもののフラックスが高いため、数10 ksの観測時間でもイベント数は十分です。しかしHigh/Soft状態のチーム論文は投稿中のため割愛します。4U 1630-47は傾斜角も過去の観測から60-70°程度ということがわかっており [26, 27]、光子数も特に問題ありませんでした。しかし偏光度を調べたところ、8 keVで10%程度偏光していました [21]！第2章で説明したように標準降着円盤からやってきたX線に対して期待される偏光度は数%であり、標準円盤とは異なると考えられるため紹介は行わないことにしました。LMC X-1はいつもHigh/Soft状態の天体で、スペクトルフィッティング法や鉄輝線による推定法から非常に高いスピン(前者の推定法では $0.85 \leq a_* \leq 0.95$ 、後者の推定法では $0.93 \leq a_* \leq 0.97$)が期待できる天体でした [28]。しかし、傾斜角は36°程度 [29]であり偏光度は大きくないことが予想され、実際に2-8 keVの全バンドで偏光解析をした結果、偏光を有意に検出することができませんでした。そのためこの天体に関しても割愛します。

*4 近接連星系において、相手の星の質量によりブラックホール連星は2種類に大別されます。その1つは「大質量X線連星 (high mass X-ray binaries; HMXB)」と呼ばれ、大質量星とブラックホールからなります。もう1つは「小質量X線連星 (low mass X-ray binaries; LMXB)」と呼ばれ、小質量星とブラックホールからなります。

では本題の4U 1957+115の結果に入ります [24]. この天体は1973年にUhuru衛星によって発見されて以来、定常的に明るく、High/Soft状態を保っている天体です. 観測的に詳細なことはわかっていないのですが、質量は $3 M_{\odot}$ と軽いかもしれません (90%の確率で $6.2 M_{\odot}$ 以下) [30]. 公転周期は0.39日程度であり、公転軌道の傾斜角に関しても $65\text{--}75^{\circ}$ という報告もあれば [31], $\sim 13^{\circ}$ という報告もあります [30]. IXPEでは2023年の5月に観測が行われ、同時にNICER, NuSTAR, ART-XC等の衛星でも観測が行われており、状態が概ね安定していたことがわかっています. そしてNICERとNuSTARのスペクトルを解析したところ、X線フラックスの約98%が降着円盤からの熱放射で説明できることがわかりました. またIXPEでは2–8 keV全体で $1.9 \pm 0.4\%$ という偏光度で観測されています. 図4は偏光度や偏光角のエネルギー依存性を表しています. なお青いヒストグラムが同時に描かれていますが、これはMDP (Minimum Detectable Polarization) を表し、データ点がこの青い領域に入っている場合は、本当に偏光していたのかわからないということを意味します. つまり6 keVまでの3ビンに関しては偏光が有意に検出されており、2–3 keVでの偏光度は2%弱となっています. 偏光方向に目を移してみると、3–4 keVを境に値が変わります. 4U 1957+115の場合、ブラックホールの質量が図2で仮定した $10 M_{\odot}$ に比べ軽い場合、定量的な議論はできませんが、まず図2と比べることで大まかな傾向を考えてみましょう. 図4からは偏光度が比較的小さく、また極小値が2 keV以下にあると考えられるため、スピンは比較的高そうだとわかります. 実際IXPEのチーム論文では [24], 傾斜角はNICERやNuSTARで得られた 75° という値を採用し、kerrbbという回転するブラックホールの円盤放射スペクトルモデルを適用してスピンを求めた結果、ベストフィットでは $a_* = 0.992$ という値を得ました. さらに標準円盤からの熱的放射を仮定

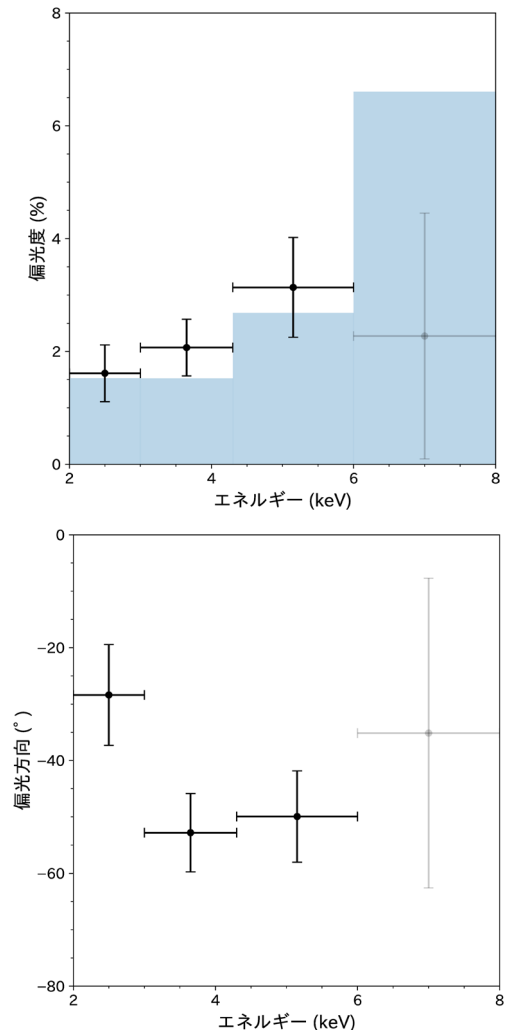


図4 4U 1957+115の解析結果. 上の図がエネルギーに対する偏光度を表しており、下の図は偏光方向(相対値)を示している. 上の図の青いヒストグラムはMDPの値を表している.

し、リターニング効果も加味された偏光モデルであるkynbrrというモデルを使って、得られた偏光データに対してフィッティングした結果、少なくとも $a_* = 0.96$ 以上のスピンを持つと結論づけられました. なお最近行われたスペクトルフィッティング法でも $a_* = 0.95^{+0.02}_{-0.04}$ という高い値が得られ、我々の結果と矛盾しません [32].

次にLMC X-3の結果を簡単に紹介します [25].

LMC X-3は、大マゼラン雲にあるHMXBで、光学観測からブラックホールと伴星の質量はそれぞれ $6.98 \pm 0.56 M_{\odot}$ と $3.63 \pm 0.57 M_{\odot}$ だとわかっており、軌道傾斜角も 69.2° と測定されています [33]. またIXPEが観測を行っていた時期にNICER, NuSTAR, Swiftでの観測も行われており、そのスペクトル形状から降着円盤からの放射が支配的であることがわかりました. そしてIXPEで観測された2-8 keVでの平均偏光度は3.2%程度で、図5にはそのエネルギー依存性が示されています. 図からは6 keV以下で有意な偏光が検出されていることがわかります. また、こちらの偏光のエネルギー依存性は4U 1957+115とは違っていることがわかります. 最も統計のよい2-3 keVでLMC X-3の方が偏光度が高いこと、3 keVを境にした偏光角の変化が見られないこと、偏光度の極小値がおそらく3-4 keVにある(4U 1957+115の場合は、おそらく2 keV以下にある)ことなどです. ブラックホールの質量は $6.98 \pm 0.56 M_{\odot}$ であるため、この天体も図2と定量的に比べることはできませんが、定性的には4U 1957+115に比べて低いスピンを持っていると推測されます. LMC X-3はこのとき光度が大変高く、スリム円盤 [3] と呼ばれる状態にあったと考えられます. スリム円盤の偏光モデルはまだありませんが、光学的に厚いため標準円盤に近い偏光を示すと期待されます. そこでIXPEのチーム論文 [25] では、前述の偏光モデルを適用し $a_* < 0.7$ という結果を得ました. 先行研究では $a_* = 0.25^{+0.20}_{-0.29}$ という値が得られており [34], 今回のIXPEの結果は先行研究とコンシステントだと言えます.

今回、偏光データを使ってスピンの推定を行い、他の方法で求めたスピンの値と矛盾しない結果を得ました. IXPEのエネルギー帯域は2-8 keVですが、より広い帯域での偏光観測が実現すれば、2.1節の最後に書いたように重力場の様子やリタリング効果をより詳細に調べることができるはずです. またスリム円盤に対する偏光のよいモデル

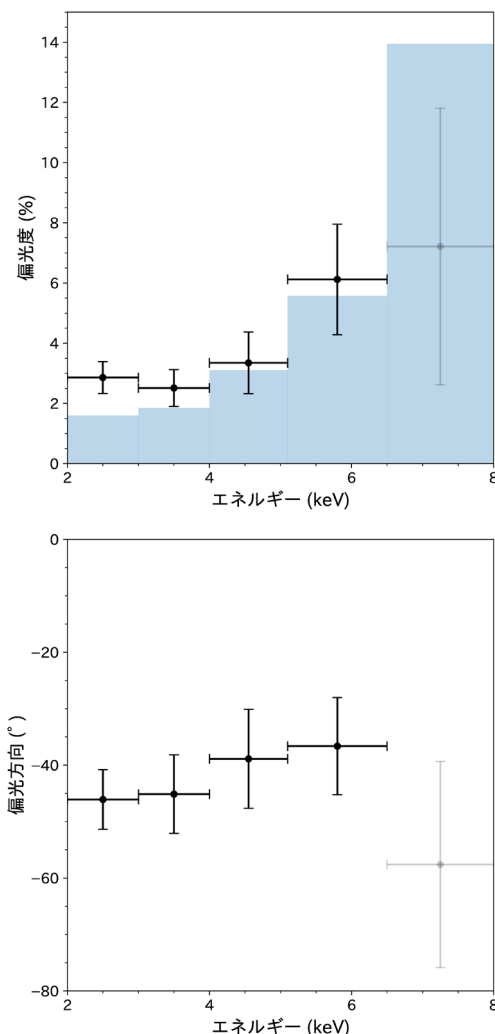


図5 LMC X-3の解析結果. 上の図がエネルギーに対する偏光度を表しており、下の図は偏光方向(相対値)を示している. 上の図の青いヒストグラムはMDPの値を表している.

が現在なく、LMC X-3では暫定的なスピンの推定に留まっています. そこで今後、新たな降着円盤モデルが理論家の方々により開発された際に、いち早くそのモデルをデータに適用しスピンの値を決定できるように、我々は偏光を取り入れたテーブルモデルを開発しました [35]. 例えばSchnittmanの論文のグラフに示された、偏光度や偏光方向(ストークスパラメーターのQとU)

のエネルギー依存性が、様々なパラメーターに対してどのように変化するのかをまとめた表を作ります。通常X線のデータはxspec [36] と呼ばれる標準的なツールを使ってモデルフィットを行いますが、この偏光情報も含む表のデータをxspecで読み込み、それをデータに直接適用することができます。この方法を使えばあまり難しいことをしなくても、理論家が行った理論計算を直ぐに取り込めてモデルフィットを行うことができます。エネルギースペクトルに対しては、この方法はすでに確立されていたのですが、偏光情報(QとU)のテーブルも同時に取り込んでフィットするというのは、私が知る限り今回が初めての試みだったため、テストを繰り返しながら半年あまりかけて開発しました。このテーブルモデルを用いた解析手法が将来的に役立つことを願っています。

3.2 Low/Hard 状態の観測

IXPEではLow/Hard状態のブラックホールもいくつか観測しています。例えばCyg X-1やCyg X-3です。特にCyg X-1ではコロナの位置について制限を与えることに成功したため、ここで紹介します(3.1章で述べたようにCyg X-1はHigh/Soft状態でも観測をしており、チーム論文を投稿中です)。Cyg X-1は $21.2 \pm 2.2 M_{\odot}$ のブラックホールと $40.6 M_{\odot}$ の星の連星系で、その公転周期は約5.6日、公転軌道の回転軸と視線方向のなす角は 27.5° です [37] (降着円盤の回転軸と公転軌道の回転軸がもし同じなら傾斜角も 27.5° になります)。Cyg X-1は硬X線でも明るいので、IXPEよりも先にPoGO+という気球実験によって硬X線領域(19–181 keV)での偏光観測が行われました [38]。そして8.6%という偏光度の上限値がつけられ、偏光方向としてはジェットの噴出方向と同じ方向であろうということもおおよそわかりました。そしてコロナの幾何構造は、図3のLamppostモデルc)ではないという結論を得ました。詳しくは高橋によるPoGO+の紹介記事をご覧ください [39]。ではIXPEでの観測を紹介しま

す [40]。IXPEでは2022年5月(観測時間は約242 ks)と6月(観測時間は86 ks)にCyg X-1の観測を行いました。特に5月の観測ではIXPEと同時にNICER, NuSTAR, INTEGRAL衛星でも観測されたため、非常に広範囲のエネルギースペクトルが取得できました。そのスペクトルを解析することで、コロナでコンプトン散乱されて観測者に届いたX線(降着円盤からの光子をコロナで散乱する場合、もしくはコロナ中でシンクロトロン放射により作られたX線を逆コンプトン散乱する場合)が支配的であることがわかりました。そして2–8 keVのエネルギー帯域で積分すると、偏光度が $4.01 \pm 0.20\%$ であり、偏光方向はPoGO+が示唆したように、ジェットの方向と一致していました。この偏光度や偏光方向は5月と6月の観測でほぼ同じ、さらに公転周期に渡ってもほぼ同じでした。なお偏光度や偏光方向のエネルギー依存性を調べると、エネルギーが上がるに従って偏光度は緩やかに上昇する傾向があり(2 keVで約4%から8 keVで約7%)、偏光方向も 10° 程度の緩やかな変化がありました(文献 [40] のSupplementを参照)。そこで、以上の傾向を説明できるモデルは図3のうちどれかを調べた結果、PoGO+の場合と同様図3c)のLamppostモデルでは、偏光方向が全く合わないという結果になりました。また図3a)のWedgeモデルと図3b)のTruncated diskモデルでは、偏光方向はよく再現できることがわかりました。さらにエネルギーが上がるに従い偏光度が上昇する傾向はWedgeモデルでよく再現できます(Truncated diskモデルではエネルギー依存性はあまりない)。なおWedgeモデルの場合に偏光方向がなぜディスクに垂直になるのかは、今月号のIXPE特集の理論の記事をご覧ください。ただ今回得られた4%という偏光度は、事前の予想を覆す大きな値でした。偏光度4%を達成するには、Wedgeモデルでは傾斜角が 65° 以上、Truncated diskモデルでも 45° 以上がモデル計算からは必要になります。もし公転

軌道の回転軸が降着円盤のスピン軸に合っており、 27° よりもっと大きければ説明できますが、詳しいことはまだわかりません。

Cyg X-1のLow/Hard状態において、硬X線の方が高い偏光を示すと期待されます。そこで硬X線の精度のよい観測を実施するため、現在XL-Caliburと呼ばれる硬X線偏光観測の気球実験がアメリカ、日本、スウェーデンの国際共同で進められています。天体からの硬X線は、上空40 km近くまで到達すれば、大気に完全に吸収されず観測することができます。XL-Calibur計画 [41] は、世界最大の有効面積を持つ日本の硬X線望遠鏡を搭載することで、世界最高感度で15–80 keVの硬X線の偏光観測を実施します。直径100 mに膨らむ大型気球を利用することで、全長12 m、総重量2トンのゴンドラを放球することができ(図6)、次回フライトが今年2024年夏にスウェーデンからカナダまで約1週間予定されています。気球全体の組み合わせ試験がNASAのColumbia Scientific Balloon Facilityにおいて無事に完了し、気球打ち上げを行うスウェーデン北方のEsrang実験場に物品が輸送されている段



図6 NASAで組み合わせ試験中のXL-Calibur気球実験の全体像。手前に日本製の硬X線望遠鏡、焦点距離である12 m奥に偏光計を搭載する。

階です。今回XL-Caliburフライト中に、Cyg X-1をIXPE衛星と同時観測する観測提案が採択されています。従来のエネルギースペクトルと時間変動の情報に、軟X線から硬X線の広帯域の偏光情報が新たに加わることで、降着円盤、コロナ、散乱成分の全ての放射機構・幾何構造、およびブラックホールの物理描像の統一的理解が進むことが期待されます。

4. おわりに

X線の偏光と同時にエネルギーも測定できるIXPE衛星で、いくつかのHigh/Soft状態とLow/Hard状態のブラックホールが観測されました。High/Soft状態の観測からはスピンを決めることができる可能性があり、それに最適である4U 1957+115の結果をこの記事では紹介しました。IXPEによる観測の結果、偏光度が極小値になるエネルギーを知ることではできませんでしたが、偏光度と偏光方向のエネルギー依存性から $a_* \sim 0.96$ 以上の非常に大きいスピンを持っていることが示唆されました。またLMC X-3に関しては暫定的な方法ですが、偏光を用いてスピンの値を求め、 $a_* < 0.7$ という結果を得ました。これらは先行研究のスペクトルフィッティングで求めた結果とコンシステントです。より統計を増やして細かくエネルギーを分けて解析したり、より低い・高いエネルギーの偏光情報も取得できれば偏光のエネルギー依存性を明確にし、スピンを精度よく決めることができるでしょう。

一方、Low/Hard状態のブラックホールではコロナの幾何構造に制限をつけられる可能性があります。この記事ではLow/Hard状態のCyg X-1について紹介しました。過去の硬X線の観測と同様に、Lamppostモデルを否定する結果が今回も得られ、さらに従来考えられてきた傾斜角を前提とすると、偏光度が高すぎるという想定外の結果も得られました。さらに詳しい幾何構造を議論するためには、高統計と広いエネルギー帯域での観測

が必要です。現在IXPEの数倍の有効面積を持ったeXTPという偏光X線観測衛星が開発されているため、このような将来の衛星に期待です [42]。

謝 辞

筆が遅く、編集委員の方にはご迷惑をおかけしました。それにもかかわらず丁寧に相談に乗ってください、何とか記事を仕上げることができました。本研究には大阪大学の故林田清氏も参加していましたが、道半ばで亡くなられてしまい我々も断腸の思いです。なお本研究は科学研究費(19H00696)の支援の基に行われました。

参考文献

- [1] Remillard, R. A., & McClintock, J. E., 2006, ARA&A, 44, 49
- [2] Yamada, S., et al., 2013, PASJ, 65, 80
- [3] Ohsuga, K., et al., 2009, PASJ, 61, L7
- [4] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A., 1973, A&A, 24, 337
- [5] Novikov, I. D., & Thorne, K. S., 1973, in Black Holes (Les Astres Occlus), eds. DeWitt, C. & DeWitt, B., (Gordon and Breach, New York), 343
- [6] 嶺重慎, 2016, ブラックホール天文学 (日本評論社)
- [7] 福江純, 2007, 輝くブラックホール降着円盤 (プレアデス出版)
- [8] 佐藤勝彦, 2003, 相対性理論 (岩波書店)
- [9] Chandrasekhar, S., 1960, Radiative Transfer (Dover Publication)
- [10] Connors, P. A., & Stark R. F., 1977, Nature, 269, 128
- [11] Schnittman, J. D., & Krolik, J. H., 2009, ApJ, 701, 1175
- [12] Schnittman, J. D., et al., 2013, arXiv:1301.1957
- [13] Kubota, A., et al., 2001, ApJL, 560, L147
- [14] Shafee, R., et al., 2006, ApJL, 636, L113
- [15] Kojima, Y., 1991, MNRAS, 250, 629
- [16] Schnittman, J. D., & Krolik, J. H., 2010, ApJ, 712, 908
- [17] Done, C., et al., 2007, A&AR, 15, 1
- [18] Makishima, K., et al., 2008, PASJ, 60, 585
- [19] Dovčiak, M., et al., 2012, Journal of Physics: Conference Series, 372, 012056
- [20] Weisskopf, M. C., et al., 2022, JATIS, 8, 026002
- [21] Ratheesh, A., et al., 2024, ApJ, 964, 77
- [22] Podgorný, J., et al., 2023, MNRAS, 526, 5964
- [23] Jana, A., & Chang, H.-K., 2024, MNRAS, 527, 10837
- [24] Marra, L., et al., 2023, arXiv, arXiv:2310.11125
- [25] Svoboda, J., et al., 2024, ApJ, 960, 3
- [26] Seifina, E., et al., 2014, ApJ, 789, 57
- [27] King, A. L., et al., 2014, ApJL, 784, L2
- [28] Bhuvana, G. R., et al., 2022, Adv. Space Res., 69, 483
- [29] Orosz, J. A., et al., 2009, ApJ, 697, 573
- [30] Gomez, S., et al., 2015, ApJ, 809, 9
- [31] Hakala, P. J., et al., 1999, MNRAS, 306, 701
- [32] Draghis, P. A., et al., 2023, ApJ, 946, 19
- [33] Orosz, J. A., et al., 2014, ApJ, 794, 154
- [34] Steiner, J. F., et al., 2014, ApJL, 793, L29
- [35] 管佑真, 2023, 日本物理学会第78回年次大会, 16aT21-12
- [36] [https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/\(2024.3.27\)](https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/(2024.3.27))
- [37] Miller-Jones, J. C. A., et al., 2021, Science, 371, 1046
- [38] Chauvin, M., et al., 2018, Nat. Astron., 2, 652
- [39] 高橋弘充, 2019, 天文月報, 112, 480
- [40] Krawczynski, H., et al., 2022, Science, 378, 650
- [41] Maeda, Y., et al., 2021, Proc SPIE, 11444, 114442X
- [42] Zhang, S. N., et al., 2016, Proc SPIE, 9905, 99051Q

X-ray Polarimetry of Black-Hole Candidates by IXPE

Yuma KAN¹, Shuichi GUNJI^{1,3}, Tsunefumi MIZUNO^{2,4} and Hiromitsu TAKAHASHI^{2,5}

¹*Yamagata University, 1-4-12 Koshirakawamachi, Yamagata 990-8560, Japan*

²*Hiroshima University, 1-3-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8526, Japan*

Abstract: It has been thought that polarization observations of a stellar-mass black hole will reveal its spin and the corona's position and shape surrounding the black hole and accretion disk. However, polarimetry in X-rays is technically difficult, and high-sensitivity observations had not been possible until the launch of IXPE. In this article, we describe how the X-ray polarimetry constrains the BH spin and corona geometry, and introduce several key results of stellar-mass black holes observed by IXPE.