

ブラックホール天体はくちょう座 X-1 の X 線偏光観測

玉川 徹

Tamagawa Toru

1. X 線天体物理学と偏光観測

太陽のような恒星を始め、ブラックホールや中性子星、銀河、多数の銀河の集まりである銀河団等、宇宙におけるありとあらゆる階層の天体から X 線が発せられている。地球に絶え間なく降り注ぐこれらの X 線を観測し、極限状態にある高エネルギー天体の研究を行うのが「X 線天体物理学」である。X 線は電荷を持たないので、宇宙空間の磁場により曲げられることがなく、それが発せられた天体からまっすぐに観測者まで届くので、天体の情報をストレートに我々に伝えてくれる優れたメッセンジャーである。

地球の大気は紫外線より短い波長の電磁波を吸収するので、地球は人間にとって有害な宇宙放射線から防護されている住みやすい惑星である一方、天体からの X 線を観測するためには、観測装置を宇宙に持ち出すことが必須となる。素粒子・原子核実験に加速器が必要なように、X 線天体物理学には、人工衛星等の飛び道具（飛翔体）が欠かせない。そのため X 線天体物理学は、宇宙に行く手段を自由に使えるようになった 1960 年代に開拓された、天文学の中では遅咲きの分野である。

天体からの X 線はフラックスが極めて弱いため、波ではなく光子として 1 粒ずつ検出する。X 線光子は、位置（イメージング）、時間（強度変化）、エネルギー（スペクトル）情報を持っており、これまでの X 線天体物理学は、これら 3 つの物理情報を観測することにより発展してきた。しかし X 線は波でもあるので、電気ベクトルの偏りである「偏光」

情報も運んでいる。X 線偏光の観測は、ほとんど手が付けられていない「新しい天体観測の窓」であり、これまでの延長線上に無いという意味で、X 線天体物理学に残された最後のフロンティアである。

電磁波の偏光自体は身近な物理量で、例えば可視光領域では、サングラスや液晶の画面等に活用され、特定方向の電気ベクトルのみを切り出すことで、望みの明暗を作り出している。ただし人間の目は（昆虫と違って）偏光情報を感知することができないので、電磁波の持つ他の 3 つの物理情報に比べ、研究の世界においても正当な市民権を得ていないようである。偏光観測者の間では、主流から外れた「偏った」研究であるとの自虐的な囁きも聞こえてくる。しかし偏光には、他のいかなる方法でも得ることができない優れた情報が詰まっている。例えば、天体における X 線放射過程の 1 つであるシンクロトロン放射は、磁場に巻き付いた電子の回転面に並行に偏光しているので、天体の磁場の配位が一目瞭然となる。歴史的には 1980 年代後半に米国の OSO-8 衛星により、世界で初めて衛星による X 線偏光観測が実現した。しかし当時は偏光計の感度が不十分だったため、「かに星雲」1 天体のみしか有意な検出ができなかった¹⁾。

2. X 線偏光観測衛星 IXPE

Imaging X-ray Polarimeter Explorer (IXPE) は、NASA マーシャル宇宙飛行センターが主導する、米伊の国際共同プロジェクトである²⁾。日本からはコアとなるハードウェアの一部を提供することで、国



図1 IXPE 衛星 (Credit: NASA)

際協力として参加している。9名のシニアメンバーと、その下の学生や若手研究員20名ほどが参加しており、米伊に次ぐ第三勢力である。IXPEは全長5.2mのNASAの小型衛星で、図1に示すように、先端部にX線ミラーが3台、4m離れた焦点面に3台のX線偏光計が搭載されている。X線ミラーの熱受動素子である熱シールドを名古屋大学が提供し、X線偏光計の前段増幅器であるガス電子増幅フォイル(GEM)³⁾を理化学研究所(理研)が提供した。

主検出器であるX線偏光計は、0.8気圧の純ジメチルエーテル中で動作するガス検出器である。図2に示すように、1cm厚のターゲット領域でX線を光電吸収させ、放出される光電子を50 μ mピッチで飛跡測定できる装置である。INFN/Pisa(伊)が製作したピクセル検出器に、理研が製作したGEMを組み合わせている⁴⁾。入射X線に垂直な面内で光電子が飛び出す方位角を ϕ とすると、放出微分断面積は $d\sigma/d\Omega \propto \cos^2\phi$ と表せ、偏光方向にピークを持つ周期 π の正弦波変調曲線となる。これは、入射した電磁波により電子が電気ベクトル(偏光)の向きに揺さぶられ、その方向に光電子が飛び出す、と考えると分かりやすい。1イベントでは偏光方向を決めることができないが、十分な統計をためると、変調曲線のピークから入射X線の偏光方向が決定できる。ちなみにこの方式では直線偏光のみ計測でき、円偏光の検出は将来の課題である。

OSO-8衛星の時代から、X線偏光計の感度が上がらぬまま長いブランク期間があったが、1990年代後半に欧州原子核研究機構(CERN)でマイクロパターンガス検出器が開発され、光電効果を用いた偏光計の開発が可能となった。具体的な開発を進めたのはINFN/Pisa, NASAゴダード宇宙飛行センター(GSFC)

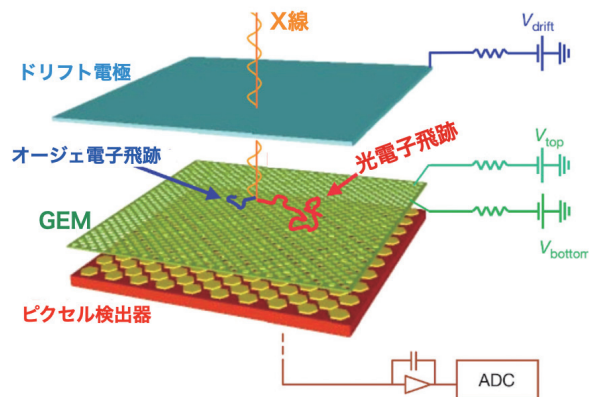


図2 IXPEに搭載されたX線偏光計の模式図(参考文献4) Fig.2を改変)

と、筆者ら理研のチームである。INFN/Pisaと理研は2007年から共同研究を続けており、15年の歳月を経てようやく宇宙に辿り着くことができたことになる。実はこの話には余談があって、2009年にNASA/GSFCがGEMS(Gravity and Extreme Magnetism Small explorer)というX線偏光観測衛星を計画し、理研チームは衛星搭載用GEMを提供した。しかし2012年にコスト増大の懸念からプロジェクト中止となり、非常に悔しい思いをした。

IXPE衛星の開発は、プロジェクトが採択された直後の、2017年2月からスタートした。理研が提供するGEMは、X線偏光計の心臓部として組み込まれるので、他の機器よりも早く納品しなくてはならない。当初は、50 μ mのファインピッチで均等な穴をうまく開けられない等、思い返すだけで胃が痛くなるような問題が発生したが、2019年にはすべてのGEMを検査し、予定どおりイタリアに納品した。

IXPE衛星建造の後半戦はコロナ禍の真っ只中で、海外に渡航できないという異常事態の中で実施された。イタリアチームに優れた経験があったとはいうものの、筆者らは偏光計が組み上がる途中までしか見ておらず、較正試験の結果のみが共有されるという状況であった。正直なところ、最後に想定どおりの性能が出ていることを確認するまで、気が気ではなかった。

幸い、コロナによる衛星開発の遅延は一年弱で済み、2021年末の打上げに漕ぎ着けた。コロナが終息に向かいつつあるように見えたので、打上げ見学のためにフロリダ行きの飛行機まで予約していたのだが、その直前の11月に米国でオミクロン株の蔓延があり渡航を断念した。最後の最後まで、我慢我

慢の5年間であった。

IXPE衛星は2021年12月9日午前1時に、NASAケネディ宇宙センターから、SpaceX Falcon 9ロケットにより無事に打ち上げられた。その後1か月の初期検証を経て、2022年1月11日から科学観測が始まった。GEMには高電圧が印加されているので、宇宙空間を飛び交う重イオンの侵入により検出器内で大きなエネルギー解放があれば、放電の危険がある。事前に量子科学技術研究開発機構HIMAC加速器での試験をクリアしていたのだが、やはり実戦は不安であった。加えて、想定外のガスの劣化が起きないか等、筆者にとって心の休まる日がなかった。今は1年目の観測が無事に終わり、ほっと一安心しているところである。

3. ブラックホール天体「はくちょう座 X-1」の X 線偏光観測

IXPE衛星は打上げから5か月後の、2022年5月15～21日にかけて、ブラックホール天体「はくちょう座 X-1 (Cyg X-1)」を観測した⁵⁾。この天体は図3に示すような、太陽質量の約20倍のブラックホールが、太陽質量の約40倍の恒星HDE226868と連星系を成しており、お互いの周りを5.6日で回っている。地球からの距離は約7300光年である。Cyg X-1はX線天体物理学のパイオニアである故小田稔先生(東京大学名誉教授)が1970年代にブラックホール天体であると喝破し、牧島一夫先生(東京大学名誉教授)を始めとする、X線天体物理学の黎明期を支えてきたメンバーが精力的に観測を続けてきた、日本でも馴染み深い天体である。

ブラックホールは光すら抜け出せない強重力天体なので、どのようにX線が放出されるか疑問に思われる方もおられるであろう。この先の理解に重要なので、簡単にその標準的なX線放射メカニズムを解説しておく。伴星からブラックホールに落ち込む物質は、一般的に角運動量を持つので、ブラックホールの周りをケプラー運動する降着円盤を形成する。少し内側を回っている物質は、その外側を回っている物質に比べて速度が速いので、お互いの間に摩擦力が働く。ブレーキをかけられた内側の物質は更に内側に落ち込むが、獲得した重力エネルギーの半分のみ運動エネルギーに変換され(ビリアル定理)、



図3 ブラックホール連星系「はくちょう座 X-1」の想像図 (Credit: John Paice)

残りの半分は摩擦による熱となって物質中に蓄えられる。この加熱が、物質がブラックホールに落下する近傍まで続くので、降着円盤はブラックホールに近づくほど高温となる。降着円盤の最内縁部分では100万℃にも達し、熱的にX線が発せられる。ただし、そこはまだ光も脱出できなくなるシュバルツシルト半径の外側なので、X線がブラックホールの強い重力を振り切って我々の元まで届くのである。

X線スペクトルを観測することで降着円盤の最高温度を知ることができれば(黒体放射なので温度の計測は容易)、ブラックホールの質量を簡単な計算から求めることができるし、X線はブラックホール近傍から出てくることから、その時空構造等を探るにも適している。Cyg X-1では降着円盤の上下方向に垂直に飛び出すプラズマ(ジェット)も、電波により観測されている。しかしブラックホール本体の大きさは100kmほどなので、今の技術で空間分解して観測できる可能性は皆無である。また、ブラックホール周辺には、コロナと呼ばれる、密度が極めて薄く高温(約10億℃)のプラズマが存在していることが分光観測から分かっているが、その分布や形成メカニズムは大きな謎である。

ブラックホール連星系には、ソフトとハードの2つの状態が存在し、その間を遷移することが知られている。伴星からの物質降着が多い場合は、降着円盤の放射が卓越するソフト状態になり、エネルギーの低いX線が増える。他方、物質の降着が少ない場合は、主にコロナで逆コンプトン散乱された高エネルギーX線が卓越するハード状態となる。今回の観測は、Cyg X-1がハード状態にある時期に行われた

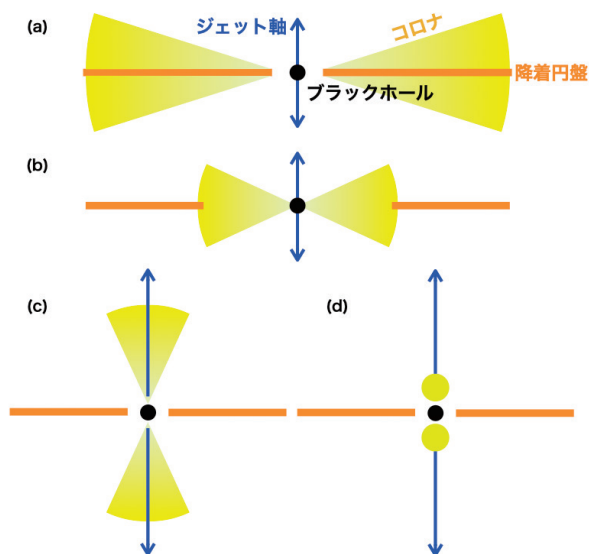


図4 ブラックホール、降着円盤とコロナの位置関係を真横から見た図

今回の偏光観測から、(c)(d)は棄却された

ので、コロナの研究をするには最適である。

偏光観測からは、偏光度と偏光角の2つの物理量が得られる。偏光角の観測結果から先に述べておくと $-21 \pm 1^\circ$ であり、これはジェットの放出方向と並行であった。逆コンプトン散乱は強い偏光を生み出す基礎過程で、光源（降着円盤）と散乱体（コロナ）と観測者が作る面に垂直な方向に偏光する。偏光角がジェットと並行であるということは、図4a, bに示すように、ジェットと垂直な面（降着円盤面）にコロナが分布していることを意味する。

コロナの分布については、ブラックホールのジェットに沿って形成される（図4c）、ジェットの根元にコンパクトに存在している（図4d）等、モデルが百花繚乱であったが、筆者らの観測結果と一致するコロナの存在場所は図4aに示すように、降着円盤を挟むように上下に分布するか、図4bのように降着円盤よりも内側に存在する、の2か所に絞られた。降着円盤内でねじられた磁場がその上下で磁気リコネクションし、太陽の表面のようにコロナが形成される、もしくは降着円盤の内縁で物質が蒸発しブラックホールに流れ込むコロナを形成するシナリオが考えられる。他のモデルに確実に引導を渡したということは、観測の重要な成果であるが、今後の更なる観測と理論研究の進展を待ちたい。

X線偏光のもう1つの観測量である偏光度につい

ては、理論的に予想されるよりも高い $4.0 \pm 0.2\%$ が得られた。コンプトン散乱の特性から、降着円盤を真上から見るよりも真横から見る方が偏光度は高くなる。Cyg X-1の可視光観測からは、連星系の軌道傾斜角（真上から見た場合が 0° 、真横から見た場合が 90° ）は 27° という推定が得られている⁶⁾。今回の4%という偏光度を実現しようとする、最低でも 45° の軌道傾斜角が必要で、これは観測の統計誤差では説明できない。X線を出すブラックホール近傍で降着円盤が大きく歪んでいるのか、我々の知らない何らかのメカニズムが働いているのか、更に謎が深まった。

4. 今後の見通し

今回はCyg X-1のハード状態での観測を行ったが、降着円盤からのX線が卓越するソフト状態での観測にも期待がかかる。ブラックホール近傍の時空の歪みにより、降着円盤の最内縁（つまり高温側）で偏光度が落ちることが予想されており、ブラックホールの時空構造を直接観測できる可能性がある。Event Horizon Telescopeが2019年にM87銀河にある超巨大ブラックホールの影を電波で撮像したが⁷⁾、太陽質量程度のブラックホールは見かけの大きさがそれよりはるかに小さいので、時空の歪みを探るにはX線観測が唯一の手段である。今後は、相補的な研究が進むことが期待できる。

IXPE衛星は、科学観測開始から1年間で約40天体を観測した。平均すると1天体を1週間以上観測しており、通常のX線天文衛星に比べて1年間で観測できる天体は圧倒的に少ない。これは、X線偏光観測の有意度が光子統計に強く依存するからである。2023年3月現在、これらの観測から、Nature 2本、Science 2本を含む17編の論文が出版された。

すべてのデータは、観測終了後1週間以内に一般公開され、データ解析ツールも公開されている。究極のオープンサイエンスだが、天文観測では誰でも参加できることが一般的になりつつある。IXPEメンバーにとっては、知らぬ間にチーム外の研究者に出し抜かれることもありうるので、早期の論文文化に強いプレッシャーがある。それでも新しい宇宙の観測手段を獲得したことは素晴らしく、この先しばらくの間、新しい発見を楽しめそうである。

謝辞

本研究の遂行にあたり、著者は科学研究費補助金 (S) (19H05609, 研究代表者：玉川 徹) の援助を受けました。IXPE 衛星は多くのメンバーの努力により建造、運用されています。すべてのチームメンバー、並びに、これまで 20 年近くにわたり X 線偏光計と一緒に開発してきた研究者、学生の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) M. Weisskopf, *et al.*, *ApJ*, **208**, L125 (1976)
- 2) M. Weisskopf, *et al.*, *JATIS*, **8**, 026002 (2022)
- 3) T. Tamagawa, *et al.*, *NIMA*, **608**, 390 (2009)
- 4) L. Baldini, *et al.*, *Astropart. Phys.*, **133**, 102628 (2021)
- 5) H. Krawczynski, *et al.*, *Science*, **378**, 650 (2022)
- 6) J. C. A. Miller-Jones, *et al.*, *Science*, **371**, 1046 (2021)
- 7) The Event Horizon Telescope Collaboration, *ApJL*, **875**, L1 (2019)

(理化学研究所)