

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03902

研究課題名（和文）X線偏光測定による宇宙ジェットのエネルギースourceの解明

研究課題名（英文）Understanding of an energy source of astrophysical jets with X-ray polarimetry

研究代表者

北口 貴雄（Kitaguchi, Takao）

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員

研究者番号：30620679

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：天体をX線の偏光を用いて観測するという新しい手法を実現し、それを系内で最も明るいブラックホール連星系 Cygnus X-1 に適用した。観測したX線は4%ほど偏光していて、その電場方向は電波で輝く宇宙ジェットの向きと揃っていることが初めてわかった。この観測結果を説明するには、X線はジェットと垂直な方向に広がったプラズマから放たれ、それが円盤で散乱して、円盤を横から見ている我々まで届いたと考えられ、今まで解けなかったブラックホール付近のプラズマの幾何情報を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホールを含む連星系はX線で明るく輝くことは知られていて、発見から50年以上経つ今でも盛んに観測されている。しかし、X線を放出する高温プラズマがブラックホール付近にどのように分布しているかは不明であり、今も議論が続いている。その理由は、X線のエネルギー分布（スペクトル）に特徴が少なく、情報が縮退しているためである。この情報縮退を解くために、新しい物理量であるX線の偏光を測り、ブラックホール周辺のプラズマの幾何情報を初めて導いたのが、本研究の成果である。

研究成果の概要（英文）：Astronomical X-ray polarimetry was achieved with the IXPE satellite and was applied to the black hole (BH) binary Cygnus X-1. The observed X-rays were linearly polarized with its degree of 4% and direction aligned to the outflowing jet, implying that X-rays were emitted from hot plasma spatially extended in a plane perpendicular to the jet axis, then were scattered with the disk, and finally arrived at Earth, where the accretion disk is viewed close to edge-on. Therefore, polarized x-rays are efficient to constrain the disk-jet geometry in black hole x-ray binaries.

研究分野：高エネルギー天体物理学

キーワード：X線 偏光 科学衛星 宇宙 天体 機械学習 ブラックホール 宇宙ジェット

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

ブラックホール (BH) から噴き出す宇宙ジェット (細く絞られた磁化プラズマの相対論的な流れ) の生成機構は、宇宙物理学の究極的な問題であり、最高エネルギー宇宙線の加速、ガンマ線バーストの発生機構、銀河と BH の共進化をもたらすフィードバック機構などの課題に横断的に関わる天体現象である。遠方銀河の中心に座する巨大質量 ( $\sim 10^{6-10} M_{\text{sun}}$ ) BH から、系内の恒星質量 ( $\sim 10 M_{\text{sun}}$ ) BH まで、ジェットは観測されているため、BH 質量に依らない普遍的物理機構によりジェットが生成されていると考えられる。その莫大なエネルギー (最大で  $10^{40}$  W/s) の供給源は謎であり、「降着物質による重力エネルギー」と「BH の自転エネルギー」が提案され、どちらが優勢に働いているのか論争が続いている。

一般相対論を考慮した磁気流体力学シミュレーションでは、BH の自転エネルギーをエルゴ領域から磁場を介して取り出せることが示され (e.g. Koide et al. 2002, Science)、ジェットのエネルギー源として BH 自転が有力視されている。しかしこの機構が 10 桁も違う質量を持つ BH の間で共通に働くか不明であるし、そもそも観測的にはほぼ未検証である。この機構によると、BH 質量で規格化したジェットの最大パワーは、BH 自転速度を規格化したスピパラメータ ( $a$  で表し、無回転で 0、最大回転で 1) の 2 乗に比例することを予測する (Blandford et al. 1977, MNRAS) ので、この相関を観測的に示すことでジェットのエネルギー源に迫れる。この検証のためには、BH スピンを測る手法が必須である。

BH 自身は光らないが、BH 周辺に形成される降着円盤は X 線で明るく輝くので、X 線スペクトルを用いたスピン測定が行われてきた。しかし手法の違いによる一致は見られず、同じ BH でも測定法により  $a = 0.287-0.293$  (Motta et al. 2014, MNRAS),  $0.65-0.75$  (Shafee et al. 2006, ApJ),  $>0.9$  (Reis et al. 2009, MNRAS) と系統的に大きくばらつく。この原因は、BH のスペクトルは滑らかで特徴が少ない一方で、降着円盤からの放射が周辺のコロナで散乱されて歪み、スピンによるスペクトルの特徴と見分けがつかなくなるためである。Steiner et al. (2013, ApJ) では、上記中央のスピンを使って、ジェットのパワーとの相関を観測的に初めて示したが、説得力に欠ける。そのため、新たな天体プローブによる BH スピン測定が待ち望まれている。

## 2. 研究の目的

「宇宙ジェットのエネルギー源が BH の自転かどうかを観測的に示す」ことを、本研究の最終ゴールとし、それに向けて偏光を利用した BH スピンの測定方法を新規に開発する。

BH の自転は BH 周辺の時空を歪ませ、降着円盤の内縁から放射される X 線に特徴的な偏光を生じることが理論予想されている (e.g. Krawczynski et al. 2012, ApJ)。そのため偏光を観測できれば BH スピンが測定でき、手法によって系統的にばらついてきたスピン値の論争を終わらせる決定打となりえる。偏光は X 線の持つ基本特性の一つであるものの、偏光をプローブとした天体観測はほぼ未開拓である。X 線のエネルギー・画像・時間の整合性を図って築き上げられてきた天体放射モデルはすべて、偏光により最終的に検証される。そして今まで縮退していた天体情報を、偏光によりひも解くことができる。

## 3. 研究の方法

X 線偏光による天体観測を実現するために、米伊日を中心とした国際衛星計画 IXPE (Imaging X-ray Polarimetry Explorer) を推進する。IXPE はイメージング X 線偏光計と X 線集

光望遠鏡を3台ずつ載せて2021年末に地球低周回赤道軌道に打ち上げられ、2023年現在も天体観測を継続している。

BH スピンとジェットの関係を知るために、複数のBHからスピンを測定する。衛星の観測時間は限られているので、深層学習をデータ処理に導入し偏光感度を改善することで、スピンの測定に必要な観測時間を短縮しつつ、検出有意度を高める。

#### 4. 研究成果

光電効果によりX線が当たって飛び出す光電子は、入射X線の電場方向に射出されやすい。そのため、光電効果を利用したX線偏光計は、光電子の飛跡を撮像し、画像処理を経て射出方向を決める。この画像処理に畳み込みニューラルネットワークを導入し、IXPE偏光計ではないが同じ検出原理のX線偏光計を模擬した360万の飛跡画像を機械に学習させ、図1のように射出方向と位置を予測するモデルを開発した。その結果、図2に示す通り、従来法に比べて最大で1.5倍の偏光検出感度の改善を達成した。この結果をまとめて、査読つき論文として出版した(Kitaguchi et al. 2019, NIMA)。現在、IXPEデータへ応用することを試みている

BHのスピンを偏光で初めて測定するために、IXPE衛星は系内BH連星系でもっとも明るいCygnus X-1を2022年5月に約1週間観測したところ、X線は4%ほど直線偏光していて、その電場方向が電波で輝く宇宙ジェットの向きと揃っていることが初めてわかった。この観測結果を説明するには、X線はジェットと垂直な方向に拡がったプラズマから放たれ、それが円盤で散乱して、円盤を横から見ている我々まで届いたと考えられ、今まで解けなかったBH付近のプラズマの幾何情報を明らかにすることができた。これらの結果は、共著者として査読付き論文にまとめて学術雑誌に掲載し(Krawczynski et al. 2022, Nature)、日本語のプレスリリースも行った。

上記の通り、X線偏光による天体観測を実現し、その有効性を実証できた。しかし観測中、Cygnus X-1は円盤の最内縁がBHから離れたLow/hard状態にあり、BHのスピンを測定することには適していなかった。そのため、当初の目的であるBHスピンと宇宙ジェットとの相関を取ることは、達成できなかった。今後は、スピン測定が期待できるHigh/Soft状態に移った時に、改めてCygnus X-1や、円盤をほぼ真横から見ているためスピがあれば高い偏光を示すと期待されるGRS 1915+105の観測を行う予定である。

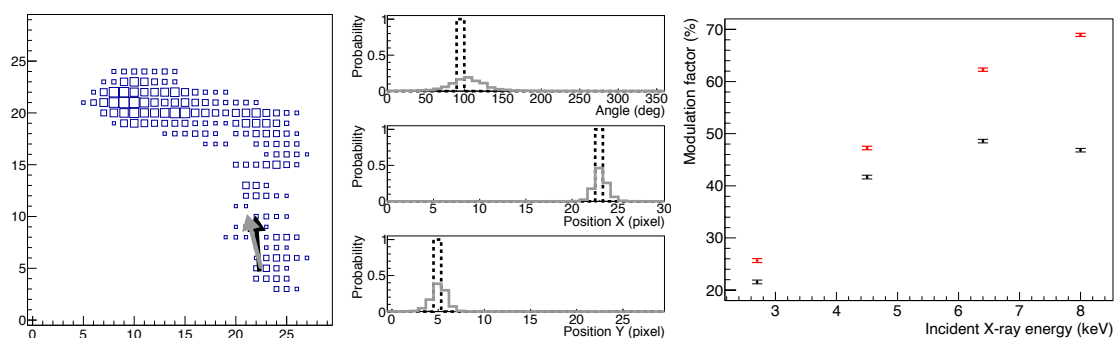


図1. 左: X線偏光計で撮像した光電子の飛跡画像(1辺3.6mm)、右: 深層学習による光電子の射出方向および位置の予想確率分布。色は黒が真値、灰が予想を表す。矢印は光電子射出の位置と方向を示す。

図2. 偏光検出効率の向上。黒色のデータ点は従来法、赤色は本研究で開発した深層学習モデルで求めた値を示す。X線のエネルギーが高くなると、電子飛跡が長くなり、偏光情報を表す光電子の最初の射出方向を決めやすくなるため、効率が上がる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計37件（うち査読付論文 29件／うち国際共著 36件／うちオープンアクセス 16件）

1. 著者名 Krawczynski Henric、(11名省略)、Kitaguchi Takao、(101名省略)	4. 巻 378
2. 論文標題 Polarized x-rays constrain the disk-jet geometry in the black hole x-ray binary Cygnus X-1	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 650 ~ 654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.add5399	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Baldini L.、(55名省略)、Kitaguchi T.、(37名省略)	4. 巻 133
2. 論文標題 Design, construction, and test of the Gas Pixel Detectors for the IXPE mission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102628 ~ 102628
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2021.102628	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Soffitta Paolo、(41名省略)、Kitaguchi Takao、(38名省略)	4. 巻 162
2. 論文標題 The Instrument of the Imaging X-Ray Polarimetry Explorer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 208 ~ 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac19b0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Kitaguchi Takao、Black Kevin、Enoto Teruaki、Hayato Asami、Hill Joanne E.、Iwakiri Wataru B.、Kaaret Philip、Mizuno Tsunefumi、Tamagawa Toru	4. 巻 942
2. 論文標題 A convolutional neural network approach for reconstructing polarization information of photoelectric X-ray polarimeters	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 162389 ~ 162389
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.162389	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 北口 貴雄, 玉川 徹, 早藤 麻美, 岩切 渉, 榎戸 輝揚, 水野 恒史, Niccol`o Di Lalla
2. 発表標題 機械学習を用いた飛跡画像処理による光電子追跡型X線偏光計の感度向上およびIXPE衛星データへの応用
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takao Kitaguchi, Teruaki Enoto, Asami Hayato, Wataru Iwakiri, Toshio Nakano, Toru Tamagawa
2. 発表標題 A machine learning approach for reconstructing X-ray polarization information acquired with micro-pattern gas polarimeters
3. 学会等名 MicroPattern Gaseous Detectors Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

プレスリリース「ブラックホールからX線の偏光を初観測」 <a href="https://www.riken.jp/press/2022/20221125_1/index.html">https://www.riken.jp/press/2022/20221125_1/index.html</a>
--

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	NASA/GSFC	ワシントン大学セントルイス	NASA/MSFC	
イタリア	INAF/Pisa			