

ようやく切り拓かれた X線偏光天文学



玉川

郡司

三石

玉川 徹¹・郡司 修一²・三石 郁之³

〈¹ 理化学研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

〈² 山形大学 〒990-8560 山形県山形市小白川町 1-4-12〉

〈³ 名古屋大学 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町〉

e-mail: ¹ tamagawa@riken.jp, ² gunji@sci.kj.yamagata-u.ac.jp, ³ mitsui@u.phys.nagoya-u.ac.jp

これまでX線天文学の中でほとんど行われてこなかった「偏光観測」が、2021年12月に打ち上げられたNASAの小型科学衛星Imaging X-ray Polarimeter Explorer (IXPE)の活躍により、ようやく開拓された。X線天文学が始まった当初から期待されていた、高感度なX線偏光観測であるが、技術的な困難もあり、実現するまで60年近くの歳月が必要であった。ひとたびIXPEの観測が始まると、これまでと質の違う新しい観測結果により多くの論文が執筆され、それ以上に新たな謎が生み出されている。本稿ではX線偏光天文学が切り拓かれるまでの長い道のりと、IXPEプロジェクトの詳細について述べるとともに、IXPEに至るまでの日本グループの苦労話を紹介する。

1. X線偏光観測の長い長い夜明け

1.1 夜明けへの希望：1970年代

1962年の弾道ロケット実験により産声を上げたX線天文学は、1970年代にX線衛星UhuruやEinstein等が活躍し大きく花ひらいた。日本も1979年の「はくちょう」から始まり、2023年9月に打ち上げられたXRISMに至るまで、お家芸と呼ばれるにふさわしい、大きな貢献を行ってきた。

衛星の開発と歩調を合わせて、X線検出技術も飛躍的に進化した。天体から到来するX線の持つ、位置(撮像観測)、時間(計時観測)、エネルギー(分光観測)の3つの物理量の測定精度は、

ここ60年間で大きな進化を遂げており、空間分解能は0.5秒角に達し、エネルギー分解能は6 keVにおいて約5 eV、時間分解能も約100 nsを実現している。電磁波にはあと一つ「偏光」という重要な物理量が付随しているが、他の3つとは異なり、その検出技術の進歩は驚くほどゆっくりであった。

天体から到来するX線の偏光^{*1}を捉える試みは、1971年に打ち上げられたAerobee-350サウンディングロケットによる、「かに星雲」の観測から始まった[1]。X線天文学が切り拓かれてから、わずか10年足らずで偏光観測が始まったことは、多くの研究者がその重要性を認識していたからに他ならない。このロケット実験は米国コロ

^{*1} 本稿では直線偏光のみを扱う。X線領域における円偏光の観測は、更なる技術開発を待たねばならない。

ンピア大学が主導したもので、図1aに原理を示すトムソン散乱を使った偏光計と、図1bに原理を示すブラッグ結晶を使った偏光計の2種類が搭載されていた。弾道飛行するロケット実験であったため、観測時間は247秒しかなかったが、2つの検出器でコンシステントな結果が得られ、偏光度が $(15.4 \pm 5.2)\%$ 、偏光方向（天の北極方向を始点に東方向をプラスとし、 180° の範囲をとる）が $156^\circ \pm 10^\circ$ という値を報告している [1]。当時「かに星雲」からの連続X線成分は、高エネルギー電子が磁場に巻き付いて放射されるシンクロトロン起源（電子の回転面に平行な偏光が期待される）なのか、2温度の希薄プラズマ起源（黒体放射なので無偏光が期待される）なのか議論になっていたが、たった1回の観測により、シンクロトロン放射起源であることが確定した。最初のトライアルにも関わらず、X線偏光観測がいかにパワフルなのかを如実に示した好例であった。

次に登場したのが、1975年に打ち上げられた

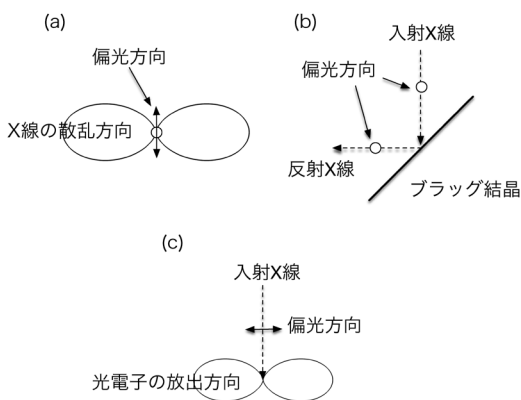


図1 偏光の検出原理。(a) 紙面に垂直に入射したX線がトムソン散乱される場合、偏光方向に垂直にX線は散乱されやすい。コンプトン散乱の場合も同様。(b) ブラッグ結晶に45度の角度でX線が入射した場合、紙面に垂直に偏光したX線のみを強く反射する。(c) 偏光したX線がK殻電子と光電吸収を起こした場合、偏光方向と同じ方向に光電子が射出されやすい。(a)と(c)の液滴状の輪は極座標プロットで、中心からの距離がその方向に飛び出す確率を表す。

NASAのOSO-8衛星である。この衛星にはグラフィット製のブラック結晶を用いたX線偏光計が搭載されており、ブラッグ条件を満たす2.6 keVと5.2 keVにのみ感度を有していた。OSO-8も「かに星雲」の観測を行ったが、光子統計を稼ぐのに有利な長時間観測ができる衛星実験であったことから、中心のパルサーを回転位相情報により取り除き、周囲のパルサー風星雲のみの偏光データ解析を行うことができた。結果は先ほど述べたAerobee-350ロケット実験とコンシステントで、偏光度と偏光方向は2.6 keVで $(19.2 \pm 1.0)\%$ と $156^\circ.4 \pm 1^\circ.4$ 、5.2 keVで $(19.5 \pm 2.8)\%$ と $152^\circ.6 \pm 4^\circ.0$ が得られている [2]。OSO-8はX線天体をいくつも観測したが、 3σ 以上の有意な結果が得られた天体は「かに星雲」だけであった。

1.2 夜明け前：2000年代

高感度でX線偏光を観測する技術が未成熟であったため、OSO-8以降は大きな進展はなく、30年近くもの観測の空白期間が続いた。2000年代に入ると、X線よりもエネルギーの高い硬X線やガンマ線領域に、偏光観測のフロンティアを求める流れが起き始めた。このエネルギー帯域では、既存の技術により、コンプトン散乱を利用した偏光計(図1a)を製作することが可能であった。ガンマ線領域では欧州のINTEGRAL衛星が、「かに星雲」とその中心のパルサーに対して偏光観測を実現し [3]、続いてインドのAstroSat CZT-imager [4] や「ひとみ」に搭載された軟ガンマ線検出器 [5] も「かに星雲」の偏光測定に成功している。

硬X線領域より高エネルギー側では観測気球の到達高度(30–40 km)でも十分に観測が行えるため、日本でも郡司、林田清(大阪大)、三原建弘(理研)らのグループが2006年に気球実験(PHENEX)で偏光観測に挑戦した [6]。その後、PoGO+気球実験による「かに星雲」の有意な偏光観測が2016年に報告され [7]、さらに現在、日本の硬X線ミラーを搭載した日米瑞国際協力によ

る気球偏光実験XL-Calibur [8] が実施されている。

一方で、フラックスが大きな天体であれば、高いSN比と光子統計を稼ぐことができるので、明るい突発天体であるガンマ線バーストに狙いを絞った偏光観測も、2000年以降に行われるようになった。先陣を切ったのが米国の太陽観測衛星RHESSI [9] や日本のGAP [10] であり、その後、中国の宇宙ステーションに搭載されたガンマ線バースト専用偏光計POLAR [11] が活躍した。

1.3 夜明け: 2020年代

50年以上にわたり、様々な偏光観測が立案され実行に移されてきたが、2020年までに有意な偏光観測が行われた天体は、結局のところ、ひときわ明るい「かに星雲」、「はくちょう座X-1」と、ガンマ線バーストのみであった。観測天体数が限られていたことから、天文学と呼ぶにふさわしい状況からは、ほど遠かった。その最大の理由は、偏光観測では光子統計と偏光解析能力（モジュレーション因子と呼ぶ）が重要であり、その両方を同時に満足する検出器を作るのが技術的に難しかったためである。

1990年代半ばから2000年初頭に登場した新しい検出技術が、X線が光電吸収される際に放出される光電子の放出方向の異方性を利用した（図1c）、ガスイメージング偏光計である [12, 13]。この検出原理を使えば、偏光情報だけでなく、エネルギー、時間、そして待望のイメージング情報までも手に入れることができる。ガスイメージング偏光計を搭載した中国の超小型衛星PolarLight [14] が2019年に打ち上げられ、その宇宙での動作が実証された。その後、満を持して打ち上げられたのが、X線の持つ4つの物理パラメーターを同時に観測し、X線偏光観測を天文学へと押しあげることを狙ったImaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE) である。

2. IXPE衛星と搭載機器

IXPEは図2に示すような、NASA マーシャル宇宙飛行センター (NASA/MSFC) が主導する小型科学衛星である。全長5.2 mで、進展ベンチの先に3台のX線望遠鏡が搭載されており、そこから4 m離れた焦点面に1台ずつ、合計3台のガスイメージング偏光計が設置されている [15]。

2.1 X線偏光計とガス電子増幅フォイル

ガスイメージング偏光計 [16] は図3に示すような構造をした、一種のガス比例計数管である。全体を覆うチェンバーにはジメチルエーテル (DME) ガスが0.8気圧で封入されており、X線望遠鏡で集められたX線は、50 μm 厚のベリリウム入射窓を通して検出器の中に入る。X線は1 cm厚のDMEガス中で光電吸収され、光電子が

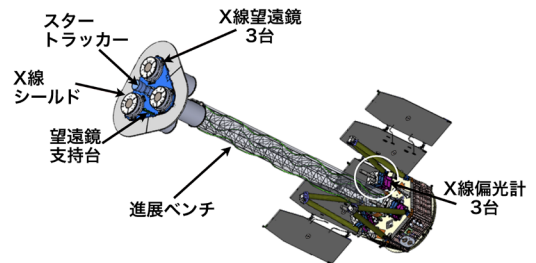


図2 小型科学衛星IXPE。全長5.2 m、質量330 kg。（文献 [15] から一部改変）

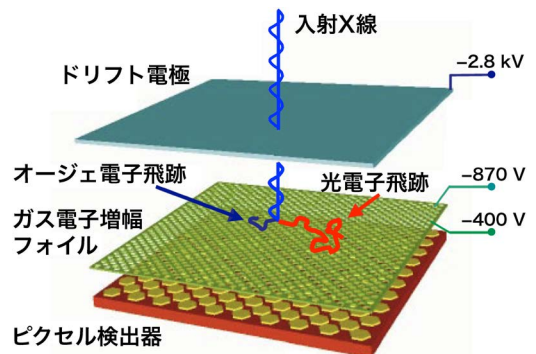


図3 イメージング能力を持つ、光電子飛跡追跡型のX線偏光計（文献 [15] から一部改変）

飛び出す。光電吸収は主にK殻電子によって起きるが、その場合、光電子は入射X線の電気ベクトルの方向（偏光方向）に飛び出しやすいという性質があるため、光電子の射出方向を精度良く検出できれば、入射X線の偏光情報を得ることができるといふ仕組みである。

飛び出した光電子はガスによりクーロン散乱されるため、まっすぐに飛ぶことはできず、曲がりくねった1 mm程度の長さの飛跡を描く(図3)。光電子はガスを電離しながら減速するため、飛跡に沿って電子雲が形成される。電子雲はガス中に印加された電場によりガス電子増幅(GEM)フォイル [17] に向けて移動し、50 μm ピッチで無数に開けられたGEMフォイルの穴を通過する際に、高電場による電子雪崩を起こして数百倍に増幅される。それが最下部に設置されているピクセル状の電極に落ちる。ピクセルからの電子信号を読み出す事で、電子雲の形状、すなわち光電子の飛跡を計測することができ、光電子の飛び出した方向を求めることができる仕組みである。

光電子はガス中で停止する際に最もエネルギーを落とすので、落としたエネルギーが少ない、飛跡の反対の端が、X線が入射した位置となる。また、GEMフォイルで増幅された電子数を数えることで、入射したX線のエネルギーを知ることができる。さらに、ピクセル検出器に信号が到達した時間を記録することで、X線が入射したタイミングも知ることができる。このようにIXPEは、X線が運ぶ4つの物理量を同時に取得する事ができ、4 keVでおよそ20% (FWHM) のエネルギー分解能、1 μs の時間分解能、23秒角の角度分解能、3.5 keVで40%程度のモジュレーション因子を達成している。X線のエネルギーが低いと光電子の飛跡が短くなり、放出方向を決めるのが難しくなるので、モジュレーション因子は小さくなる。逆にエネルギーの高いX線が入ってくると、光電吸収の確率が低くなる。X線望遠鏡の反射率とX線偏光計の検出感度を考慮すると、IXPEの

検出できるX線エネルギー帯域は2-8 keVであり、2.3 keVでの有効面積は約25 cm^2 となる [15]。

2.2 X線望遠鏡とサーマルシールド

IXPE衛星の頭文字である「I」が「Imaging=撮像」を指すように、偏光情報はもちろんのこと、その場所依存性を調べることもまたミッションの主要目的の一つとなる。これを担うのが望遠鏡であり、この望遠鏡が厳しい宇宙環境の中でもその性能を発揮するため、心強いサポーターが用意された。それが図4に示す、三石らが担当したサーマルシールドである。

NASA/MSFCグループが中心となり、3台のX線望遠鏡が用意された。構造としては、反射鏡及びこの反射鏡を上下・周方向に取り囲むハウジングからなる。反射鏡は電気鋳造法によるNi/Co合金製であり、その表面は高い角度分解能実現のためWolter-I型と呼ばれる二種類の回転二次曲面形状が採用されている。反射鏡は同心円状に24層にわたり配置されており、厚さは0.18-0.25 mm、直径およそ160-270 mm、全長は600 mmもの長さからなり、周方向と焦点距離方向に分割されていない全周二段一体型となっているのが最大の特徴である。反射鏡は支持部と接着剤により片側固着されており、支持部は反射鏡の熱膨張係数を考慮しステンレス製が基本となる。また地上較正試

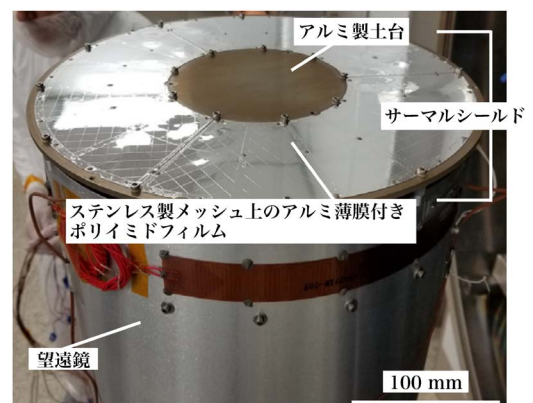


図4 望遠鏡搭載品に取り付けられたサーマルシールド外観写真(文献 [18] から一部改変)

験では、4.5 keVにて角度分解能はおよそ20–30秒角、有効面積は3台平均で200 cm²程度 [18] と高い性能を持っている。

また宇宙空間における過酷な熱環境は望遠鏡内部の反射鏡等を歪ませ、撮像能力の劣化や不安定化を引き起こしてしまう。そこでIXPE衛星ではヒーターのような動的な温度制御システムに加えて、電力を節約し、かつ複雑な回路系を使わない受動的な熱制御システムであるサーマルシールドも搭載されている。このサーマルシールドはアルミ薄膜フィルターであり、反射鏡支持部の上下端部に蓋をするような形で取り付けられている。可視光や赤外線をほとんど通さないアルミを利用し、強烈なノイズ源となる太陽光線を望遠鏡内部に入れず、同時に望遠鏡内部からの赤外線を外に出さないことで、快適な温度環境を作り出すのだ。これに加え、天体からのX線を十分透過させるため、アルミの膜厚は薄くしなければならず、IXPE衛星では50 nm程度を採用した。この自立性に乏しいアルミ薄膜を支えるべく、厚さ1 μmほどのポリイミドフィルム、その下には強度部材として、ステンレス製メッシュとアルミ製土台が加わる(図4参照)。各コンポーネントのデザインパラメータは、熱の流入出バランスはもちろん、X線透過率や打ち上げ時の音響振動耐性も考慮し最適化されている。

3. IXPEへ至る苦難の道

ここまでの話だと、X線偏光を検出する技術が確立して以降、すんなりとX線の偏光観測が行われたという印象を持たれたかもしれない。しかしIXPEが打ち上がるまでには、語り尽くせないほどの紆余曲折があった。ここに書いておかなければ、誰からも顧みられることなく天文学の歴史の中に消えていきそうなので、苦労話に紙面を割くことをお許しいただきたい。

3.1 GEMSのキャンセル

そもそも夜明け前の2000年代に、X線偏光観

測の実現に最も近づいていたのは、NASAゴダード宇宙飛行センター(NASA/GSFC)が主導した小型衛星Gravity and Extreme Magnetism Small explorer (GEMS)であった [19]。GEMSは2008年のNASA小型衛星(SMEX)公募において、6候補の1つとして選ばれた。2009年には、打ち上げ機会が保証された2枠のうちの1つとして選定され、2014年の宇宙行きを目指し、詳細設計が進められた。

GEMSには理研チームと、名古屋大の田原譲がコラボレーターとして参加していた。X線偏光計の開発は、GEMフォイルのノウハウを持つ早藤麻美氏が海外学振(当時)としてNASA/GSFCの現場に張り付けてくれていたおかげで、苦労はあったが粛々と進められた。その裏で、プロジェクト全体のスケジュールが遅れていることは話題になっていたが、日本メンバーはそれほど気に留めていなかった。ところがどっこい、衛星を製作する直前のKey decision point Cと呼ばれるNASAのレビューにおいて、このままいくと予算超過に陥る可能性が高いという理由で、突然キャンセル(正確にはレビュー不承認)になってしまった。

理研チームは既に、フライト品として用いるGEMフォイルをNASA/GSFCに送り出しており(偏光計の主要パーツなので事前の調達が推奨されていた)、突然のキャンセルにより梯子を外された格好となった。当時サポートいただいていた東大/理研の牧島一夫先生、JAXAの高橋忠幸先生をはじめ、多くの方がNASA本部への抗議を行ってくださった。米国でも研究者だけでなく、NASA/GSFCの位置するメリーランド州の上院議員も抗議を行ったという話も伝え聞いたが、結局のところNASA本部のキャンセルの判断は覆らなかった。

GEMSがキャンセルとなった2012年は、奇しくも宇宙線発見100周年、X線天文学50周年の記念すべき年であった。玉川は理研で行われた記念講演会の準備をしている際に、発表に関連しそ

な書籍を探していたところ、30年近く前の実験物理学講座25「宇宙放射線」[20]というのが偶然目に留まった。その中で牧島先生が、「結像鏡と組み合わせた効率のよいX線ポーラリメーターは、今後の開発課題の一つであろう」と述べておられ、どれほど苦勞しても実現しなくては、という思いが一層強くなった。

3.2 PRAXySとIXPEの戦い

GEMSのキャンセルからしばらくして、その後継となる小型衛星PRAXyS(プラクシスと発音)がNASA/GSFCから提案され[21]、それと同時にNASA/MSFCからIXPEが提案された。両者ともX線望遠鏡と光電吸収型の偏光計を搭載するというものであったが、コンセプトは全く違った。PRAXySは偏光、エネルギー、タイミングの3つの情報を同時に取得でき、高い検出効率を達成できる検出器であったが、天体のイメージを取得する事はできなかった。一方のIXPEは、検出効率はPRAXySほど高くないが、偏光、エネルギー、タイミングに加え天体のイメージも取得する事ができる検出器構成となっていた。

郡司は2015年頃に、IXPEの傍らに小さなガンマ線バースト偏光検出器を取り付けられないか、IXPEの初代研究代表者(Principal Investigator; PI)であるNASA/MSFCのMartin Weisskopf博士と、初代副代表のBrian Ramsey博士に相談を持ちかけた経緯がある。結局開発が間に合わなかったためにガンマ線バースト用偏光計の搭載はあきらめたが、その縁で郡司はIXPEチームに参加することとなった。一方で、玉川と、田原の後を継いだ三石は、GEMSの縁もあってPRAXySに参加することとなった。2015年のSMEX公募で、PRAXySとIXPEは、近赤外線サーベイ衛星SPHERExとともにPhase-A(コンセプトと技術開発)に選定され、同じ分野から2プロジェクトが選ばれるのは極めて珍しいことであったが、1年ちょっとの間、切磋琢磨することとなった。

2017年の正月早々に、IXPEがPhase-B(予備

設計フェーズ)に選ばれたことで勝負が決まり、IXPEが打ち上げへと進むことになった。PRAXySとGEMSは、ほぼ同一デザインかつ同一チームであったことから、当時のIXPEチームでは、GEMSがキャンセルになった以上PRAXySが選ばれることはないだろうと考えていた。一方、偏光観測には光子統計が必要なので、量子効率の高いPRAXySを有利と見る研究者は、少なくとも日本には多かった。PRAXySメンバーであった玉川は、X線偏光観測衛星が一つも選ばれない可能性は想定していたが、IXPEが選ばれるということは(たいへん失礼ながら)想定していなかった。おかげで、正月気分は一気に吹き飛んでしまった。その後何を思ったのか、寒風吹き荒ぶ筑波山に登り、関東平野の夜景を見渡しながら、IXPEに参加する道を全力で探ることに腹を括ったのは、今となっては懐かしい思い出である。筑波山の山頂で撮った夜景写真は、その時の気持ちを忘れないよう、いまだに机の前に飾ってある。

3.3 ガス電子増幅フォイルの採用

一度腹を括ったからには何事にも善は急げで、理研の北口貴雄研究員と玉川は、2017年1月末にはIXPEのX線偏光計の開発主体であるイタリアの地を踏んでいた。宇宙利用に特化して、各種の環境試験にパスしたGEMフォイルを作ることができるのは、世界中で我々だけだったので、Ronaldo Bellazzini博士がINFN/ピサにおいて率いているX線偏光計開発チームへの参加は、特に困難もなく認められた。彼らとは2007年頃からX線偏光計で共同研究を実施しており、一度仲間として認めてくれた研究者は、どんな状況にあっても信用してくれる、そんなイタリア的な絆をありがたく感じた。

認められたからには頑張って作らなければならぬが、フライト用のGEMフォイル製作は、苦難の連続だった。図3に示したように、X線偏光計は、X線との光電効果で飛び出した電子の飛跡を、いかに精度良く計測できるかにかかっている。

る。そのため、理研が担当したGEMフォイルも、信号読み出し用半導体のピクセルサイズに合わせて、技術精度ぎりぎりの、 $50\ \mu\text{m}$ の穴ピッチのものが必要であった。しかし、2007年の試作で使った高性能なエッチング装置を持つ会社は既に身売りされており、あろうことか、もう作る手段がなくなってしまっていた。

最終的には、いくつかの会社の技術を組み合わせることと、自分たちの手でエッチングを工夫することで、要求された精度のものを作り上げ、2018年初頭には計画通りにイタリアに納品することができた。これには理研の中野俊男研究員(当時)、東京理科大の大学院生であった周圓輝氏と内山慶祐氏の、柔軟な発想や献身的な作業に負うところが大きい。製作に協力してくれたサイエナジー株式会社の担当者にも、2度はやりたくないですね、と言わしめるほど、大変な1年間であった。

3.4 サーマルシールドの採用

玉川と同じく、2017年正月の衝撃的な結果を受け、三石と田原も動き出した。なぜならば、IXPEでも同様にサーマルシールドの搭載が検討されている、という噂を聞きつけたからである。まず、2月にPRAXySのPIであったKeith Jahoda博士を通し、IXPEのWeisskopf博士に連絡を取ってもらった。これを受け、サーマルシールドが取り付けられる望遠鏡を主担当するNASA/MSFC開発チームメンバーとのつながりが広がり、Weisskopf博士やRamsey博士らとのリモートでの初会合が3月に実現し、参入へのポジティブな姿勢が見られたことに安堵したことを覚えている。その1ヵ月後にはNASA/MSFCを訪問し、サーマルシールドの設計・製作・評価全てを名古屋大学で担当することが決まった。実は3月の打ち合わせでは、あくまでも開発アドバイザーとしての参入検討が主であったが、フィルムが高価なこと、さらにはサーマルシールド開発経験がNASA/MSFC側で少なかったことも相まって、

開発全般の担当にこぎつけることができた。この吉報を当然ながら学生をはじめ開発チーム全員にすぐさま伝え、ここからおよそ3年間の怒涛の開発が始まった。

最大のトラブルは、やはり音響試験でのエンジニアリングモデルの破壊であろう。真夜中にこの報を受け取り、無惨にその破壊されたサンプルの写真をただただ呆然と見ながら眠れない夜を過ごした。その朝、田原をはじめとする開発メンバーと情報共有し、すぐさまその問題解決に向け走り出した。およそ20年前に搭載されたいわば初代サーマルシールド開発の手書き資料の調査からはじめ、これまでのデザインと試験項目・結果をすべて洗い出した。そこで見えてきたのは、初めて全周望遠鏡に取り付ける際に採用した新デザインによるメッシュ部への負荷の増大であった。厚さ $1\ \mu\text{m}$ の薄いフィルムではなく、その下にある屈強だと思っていたステンレス製メッシュの金属疲労による破壊が原因であることを突き止め、デザイン変更を提案したのは、報を受けてからわずか1週間程度であった。結果、この迅速な原因究明と解決策の提案はNASA/MSFCチームから非常に高い評価を受け、より強固な信頼関係を築けたことは良き思い出であり、支えてくれた開発メンバーには感謝しかない。最終的には、NASA-名古屋大学間で締結した契約履行に伴う公文書を、連絡窓口である三石がNASAから受け取ることでその役目を終えた。

3.5 IXPEの建造から打ち上げ

その後もIXPEプロジェクトは、順風満帆からほど遠い、山あり谷ありの状態であった。中でも一番影響が大きかったのはコロナ禍であろう。日本チームは当初、ローマにおけるX線偏光計のキャリブレーションや、NASA/MSFCにおける望遠鏡キャリブレーションに参加する予定であったが、2020年初頭から世界中に蔓延した新型コロナウイルスのせいで、全てキャンセルになってしまった。リモート会議が一気に広がったので、

お互いのコミュニケーションはかろうじて維持することができたが、ハードウェアを開発した身としては、現場でモノを触ることなく結果だけが送られてくる状況は、大変もどかしいものであった。

コロナ禍の中でもプロジェクトを止めることはせず、米国とイタリアの担当機関でコンポーネント製作とキャリブレーションが進められた。IXPEメンバーの多くは、コロナ禍は1年程度で落ち着くだらうと高を括っていたが、結局打ち上げまで、状況はあまり改善しなかった。IXPEのインテグレーションは米国で実施されたが、コロナ禍においてもNASAが米国入国に関して特別な配慮をしてくれたおかげで、全体スケジュールは半年程度の遅延に収まり、2021年半ばには、図5に示すように、衛星の完成に漕ぎ着けることができた。

2021年の夏には1年遅れの東京オリンピック・パラリンピックが開催され、10月には緊急事態宣言も終了したので、この頃には、12月のIXPE打ち上げには現地参加できそうだとの希望が見え



図5 進展ベンチ展開試験中のIXPE衛星 (c) Ball Aerospace

始めた。NASAの施設に入構する際の検疫は依然厳しかったが、PCR検査の予約をし、米国行き航空券も手配し、ケネディ宇宙センターへのVIP入場の手続きも取った。しかし、いざ出発という11月末になって、オミクロン株が猛威を振り始めた。三石と玉川はギリギリまで判断に逡巡したが、出発直前になって、泣く泣く出張を断念することとした。最後の最後まで、コロナ禍に苦しめられた開発であった。

IXPEの打ち上げは、それまでの苦労とは打って変わって、遅延もなくスムーズに行われた。打ち上げは現地時間の2021年12月9日深夜1時に行われ、IXPEはSpaceX Falcon 9ロケットにより、高度600 kmの赤道軌道に無事に届けられた。IXPEを打ち上げた1段目のロケットは5回目の再利用で、その前年に野口宇宙飛行士を、2021年4月には星出宇宙飛行士を国際宇宙ステーションに送り届けたものと同じであった。緯度の高いフロリダから赤道軌道に打ち上げるためには、赤道上空でロケットの軌道変更を行う必要があるのだが、これはFalcon 9にとって初めての試みであったらしい。アフリカ上空で無事に赤道軌道に入り、ロケットの2段目からの中継映像により、離れていくIXPEの太陽電池パネル展開を見た時は、いろいろな思いが込み上げてきて、感無量であった。その後IXPEは、約1カ月のコミッションングを無事に終えて、科学観測へとひた走ることになる。

4. IXPEの初期成果

観測開始から2年が経過した2023年12月末現在、IXPEサイエンスチームは48編の発見論文を出版している。観測天体は、ブラックホール連星、中性子星連星、パルサー星雲、活動銀河核、マグネター、超新星残骸、ガンマ線バーストなど、あらゆるカテゴリーの天体をカバーしている。X線天文学の初期にX線衛星Uhuruが行ったのと似た、明るい天体を無バイアスで探査し、

X線偏光の全体傾向を見ることに適した観測プランとなっている。

IXPEで観測したデータは、その天体の観測終了から1週間以内に公開するようにNASAから義務付けられているので、誰でも自由に、NASAのHEASARCのインストラクションに従ってIXPEアーカイブデータ [22] を解析することができる。最初の2年間に観測する天体は、IXPEサイエンスチーム内で議論して決めたものであるが、データ解析ツールと観測データの即時公開については、チーム外の研究者に先に論文を書かれてしまうこともあり得るので、チームメンバーはみな、戦々恐々であった。

実際には、打ち上げ1年前から天体カテゴリーごとにチームに分かれ、周到に論文を書く準備をしていた。そのおかげもあって、ほんの少数の例外を除き、大半の観測結果はIXPEチームの発見論文として出版することができた。余談ではあるが、周到に準備した偏光の理論予想のかかなりの部分が、IXPEの観測結果からは大きくかけ離れており、大いに頭を悩ますことになった。これは新しい分野を開拓する醍醐味でもあり、非常に喜ばしいことであった。個別の天体の詳細な観測結果については、今後の記事に榮譽を譲ることとし、ここでは初期観測の成果を簡単にご紹介したい。

IXPEは2022年1月10日にコミッションングを完了し、1月11日から最初の科学観測として、超新星残骸であるカシオペアAを19日間観測した [23]。図6に、Chandraで撮像したカシオペアAのX線画像に、IXPEの偏光観測から求めた磁場の向きを重ねた結果を示す。当初の想定よりも偏光度が低く、円対称を仮定して全体から求めた値は、 $(1.8 \pm 0.3)\%$ であった。これは電波帯域の観測で得られた結果よりも、はるかに低い偏光度である。統計的な有意度が低いので、一部を除いてピクセル毎の偏光検出は困難だが、円対称を仮定することにより、磁場が接線方向ではなく、放射状に配位していることが有意に確認できた。放

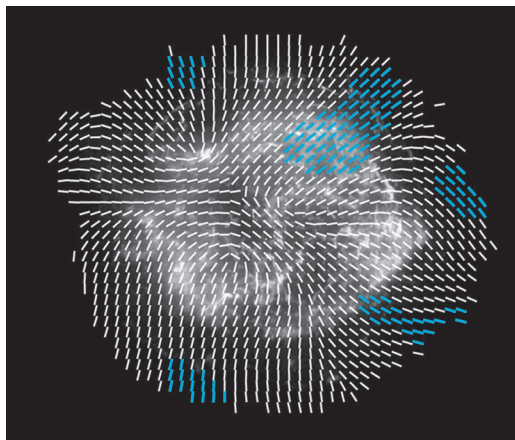


図6 カシオペアAの偏光観測。線はIXPEの観測から求めた磁場の方位を示す。みず色の線の部分のみ 3σ を超える有意度を示す。磁力線は超新星の外側に向かって、全体的に放射状に配位している。背景はChandraによるX線画像。(c) NASA/CXC/SAO, NASA/MSFC/Vink et al.

射状の磁場配位は、電波観測から得られた結果と同じである。

超新星爆残骸では、その衝撃波面で電子が10 TeV付近の高エネルギーまで加速されていると考えられている。高エネルギー電子はシンクロトロン放射によりX線を発するが、その放射により急激にエネルギーを失うので、広がる前にX線を出さなくなる。つまりX線は、衝撃波面付近の粒子加速環境を知るのに最適なツールである。X線領域ではシンクロトロン放射による内在偏光度は高くなるし、X線は衝撃波面下流の 10^{17} cm程度の狭い領域から発せられていることが知られているので、異なる偏光角の光子が混ざりにくく、電波観測よりもはるかに高い偏光度が期待されていた。また、衝撃波により接線方向の磁場成分が圧縮されるので、衝撃波面付近では磁場は接線方向に配位することが期待されていた。観測結果はいずれも事前の予想を裏切るものであり、今後のさらなる研究が期待される。IXPEはティコやSN1006といった、異なる超新星残骸も観測しているが、低い偏光度や放射状の磁場配位の傾向は、いずれ

も同じであった [24, 25].

超新星残骸の他にも、ブラックホール連星である「はくちょう座X-1」では、ブラックホール近傍のコロナの存在場所を、ジェットに垂直な面内に絞り込むことに成功し [26], マグネターの観測では、中性子星における超強磁場の証拠と考えられる高い偏光度が観測されている [27, 28]. プレーザーである Mkr501 では、ジェットの衝撃波面で粒子加速が起きていることが明らかになった [29]. 天の川銀河の中心領域の分子雲観測では、天の川銀河の中心にあるブラックホールの約200年前のフレア活動を明らかにすることができた [30]. ベラパルサー星雲では、シンクロトロン放射の限界値に近い60%を超える偏光度が観測され、磁場が大規模に整列していることが示唆された [31]. 「かに星雲」の観測では、IXPEの最大の特徴であるイメージング偏光能力を活かし、偏光度に強い場所依存性があることが明確になった [32]. パルサー星雲の観測詳細については今月号の記事を、偏光観測の理論的な側面については、来月号以降にIXPE特集記事として掲載予定の記事を参照いただきたい。つい先ほど飛び込んできたニュースだが、2024年のブルーノ・ロッシ賞がWeisskopf博士、イタリアチームPIのPaolo Soffitta博士、そしてIXPEチームに与えられたことは、我々の大きな喜びである。

5. まとめと今後の見通し

X線天文学の始まりから約60年の歳月を経て、2021年12月に打ち上げられたNASAの小型衛星IXPEにより、ようやくX線偏光天文学が切り拓かれた。IXPEの成功に至るまでには、苦難に満ちた長い歴史があり、日本チームもまた、多くの困難を乗り越えて、この場所に到達することができた。IXPEは打ち上げから2年間かけて、あらゆるカテゴリーの天体に対してX線偏光観測を行い、X線天文学における偏光観測の重要性を示した。観測した多くの天体において、我々が当初予

想していたのとは異なる結果が得られているが、それに頭を悩ますことは、科学者冥利に尽きるとも言える。

天体観測とデータ解析を進めるにつれ、IXPEで不足しているものも見え始めた。例えば、2-8 keV以外のエネルギー帯域に感度があれば、結果の解釈がより楽になるだろうし、異なる放射成分も観測することができる。大きな有効面積のX線偏光計があれば、光子統計の不足で強い結論が出せなかった天体や、そもそも暗すぎてIXPEでは感度が足りなかった膨大な数のX線天体を観測することが可能となる。広エネルギー帯域かつ高感度なX線偏光観測の実現は、今後の開発課題の一つであろう。

謝 辞

X線偏光観測を実現するにあたり、本当に多くの皆様からご支援、ご協力をいただきました。本文中に名前をあげられなかった研究者の皆様、学生の皆様、協力いただいた企業の皆様に、この場をお借りして、改めて感謝いたします。日本グループの活動には、宇宙理学委員会X線ガンマ線偏光観測リサーチグループ、JAXA小規模プロジェクト(当時)、JSPS科研費(JP19H05609, JP19H00696)、小笠原敏晶記念財団一般研究助成事業、ウシオ電機株式会社寄付金のサポートをいただきました。天文月報編集委員の勝田さん、信川さん、岩崎さんには、執筆開始から原稿を仕上げるまで、多大なるご支援をいただきました。最後に、誰よりも早くからX線ガンマ線偏光観測を志し、日本の偏光観測グループを牽引し、2021年に道半ばで亡くなられた林田清氏に、心より哀悼の意を表します。

参考文献

- [1] Novick, R., et al., 1972, ApJ, 174, L1
- [2] Weisskopf, M. C., et al., 1978, ApJ, 220, L117
- [3] Forot, M., et al., 2008, ApJ, 688, L29
- [4] Vadawale, S. V., et al., 2018, Nat. Astron. 2, 50

- [5] Hitomi Collaboration, 2018, PASJ, 70, 113
- [6] Gunji, S., et al., 2007, Proc. SPIE, 6686, 668618 (<https://doi.org/10.1117/12.738449>)
- [7] Chauvin, M., et al., 2018, MNRAS, 477, L45
- [8] Abarr, Q., et al., 2021, Astropart. Phys. 126, 102529
- [9] Coburn, W., & Boggs, S. E., 2003, Nature, 423, 415
- [10] Yonetoku, D., et al., 2011, ApJ, 743, L30
- [11] Kole, M., et al., 2020, A&A, 644, A124
- [12] Austin, R., et al., 1994, Proc. SPIE, 2010, 118 (<https://doi.org/10.1117/12.168571>)
- [13] Costa, E., et al., 2001, Nature, 411, 662
- [14] Feng, H., et al., 2019, Exp. Astron. 47, 225
- [15] Weisskopf, M. C., et al., JATIS, 8, 026002
- [16] Baldini, L., et al., 2021, Astropart. Phys. 133, 102628
- [17] Tamagawa, T., et al., 2006, Nucl. Instrum. Methods A, 560, 418
- [18] Ramsey, B. D., et al., 2022, JATIS, 8, 024003
- [19] Hill, J. E., et al., 2012, Proc. SPIE, 8443, 84431Q (<https://doi.org/10.1117/12.928435>)
- [20] 西村純責任編集, 1986, 宇宙放射線, 実験物理学講座 25 (共立出版)
- [21] Jahoda, K., et al., 2016, Proc. SPIE, 9905, 990516 (<https://doi.org/10.1117/12.2234220>)
- [22] <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/ixpe/> (2024.1.1)
- [23] Vink, J., et al., 2022, ApJ, 938, 40
- [24] Ferrazzoli, R., et al., 2023, ApJ, 945, 52
- [25] Zhou, P., et al., 2023, ApJ, 957, 55
- [26] Krawczynski, H., et al., 2022, Science, 378, 650
- [27] Taverna, R., et al., 2022, Science, 378, 646
- [28] Zane, S., et al., 2023, ApJ, 944, L27
- [29] Liodakis, I., et al., 2022, Nature, 611, 677
- [30] Marin, F., et al., 2023, Nature, 619, 41
- [31] Xie, F., et al., 2022, Nature, 612, 658
- [32] Bucciantini, N., et al., 2023, Nat. Astron. 7, 602

X-ray Polarimetry: A New Window in Astrophysics Opened at Last

Toru TAMAGAWA¹, Shuichi GUNJI² and Ikuyuki MITSUISHI³

¹RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

²Yamagata University, 1-4-12 Kojirakawa, Yamagata, Yamagata 990-8560, Japan

³Nagoya University, Furo-cho, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

Abstract: Polarimetry, which has rarely been performed in X-ray astronomy, has finally been pioneered by the successful launch in December 2021 of NASA's small scientific satellite Imaging X-ray Polarimeter Explorer (IXPE). Although highly sensitive X-ray polarimetry has been expected to be realized since the beginning of X-ray astronomy, it took nearly 60 years due to technical difficulties. Once IXPE observations began, many papers were published with new observational results, and moreover, new mysteries emerged. This paper describes the long way to the realization of X-ray polarimetry and the details of the IXPE project and introduces the struggles faced by the Japanese group before the success of IXPE.