

X 線偏光観測衛星 IXPE で紐解くダイナミックな宇宙 ～ミッションを支える観測装置、今衛星に組み込まれ、打ち上げの時を待つ～

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院理学研究科の三石 郁之講師、理化学研究所開拓研究本部玉川高エネルギー宇宙物理研究室 玉川 徹主任研究員らの研究グループは、2021 年度打ち上げ予定の世界初高感度 X 線偏光観測衛星 IXPE^{注 1)} に搭載される受動型熱制御薄膜フィルターおよびガス電子増幅フォイルの製作を完了し、各々米国アメリカ航空宇宙局 (NASA) やイタリアチームに提供しました。

これらの装置は観測機器の主要部である望遠鏡と検出器に取り付けられ、過酷な打ち上げ・軌道上環境に耐えながら、ミッションの科学成果創出に貢献することが期待されています。

現在は打ち上げ前最後の衛星全体の総合試験が開始されており、いよいよ打ち上げに向けた最終試験と調整が進められています。なお、本成果により、名古屋大学 - NASA 間契約の履行に伴う「提供された部品の信頼性を承認する」公文書を NASA から受け取りました。

IXPE 衛星は、これまで技術的に困難とされてきた X 線偏光をかつてない感度で検出することで、ブラックホール近傍の時空構造や中性子星の超強磁場内の真空の性質を調べ、ダイナミックな宇宙を探る切り札として期待されています。

この研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業 (19H05609, 19H00696) や稲盛財団研究助成、小笠原科学技術振興財団一般研究助成事業、ウシオ電機株式会社寄付金の支援のもとで行われたものです。

【ポイント】

- ◆ X 線偏光観測衛星 IXPE は、2021 年度に打ち上げが予定されている国際協力ミッションであり、現在は望遠鏡や検出器ごとの単体試験を終え、衛星に取り付けられての組み合わせ試験が進められている。
- ◆ 名古屋大学からは、理学研究科が過酷な軌道上熱環境から望遠鏡を守る受動型熱制御薄膜フィルターの開発を担当、納品までを完了し、残るは打ち上げ後の軌道上性能評価のみとなった。本成果に対し、名古屋大学 - NASA 間契約の履行に伴い NASA からの「提供された部品の信頼性を承認する」公文書を受け取った。
- ◆ IXPE 衛星は、ブラックホール・超新星残骸・強磁場中性子星などの高エネルギー天体から発せられる X 線の偏光をかつてない感度で検出し、超強重力場近傍の時空構造、衝撃波面での磁場の乱雑さ、超強磁場下でのプラズマや真空の振る舞いなど、ダイナミックな宇宙を探る切り札として期待されている。

【研究背景と内容】

〈研究背景〉

米・伊・日本などを中心とする国際協力ミッション「IXPE」は、NASA 小型衛星 14 号機として 2017 年 1 月に採択され、2021 年度に打ち上げが予定されている X 線偏光観測衛星です。IXPE 衛星には軟 X 線帯域にて高い感度を有する望遠鏡と撮像型偏光計が搭載されており、これまでの偏光観測衛星と比較し二桁以上の高い偏光検出感度を実現します。これにより従来観測が困難であった“偏光”という新たな情報を我々に届けてくれます。“偏光”はシンクロトン放射などの X 線発生機構、散乱などの X 線輸送機構と直接結びついているため、どのような天体から発せられる X 線も、多かれ少なかれ偏光していることが予想され、極限状態における物理現象を探索する究極のツールとなることが期待されています。特に IXPE 衛星は、ブラックホールをはじめ、強磁場中性子星^{注 2)}、中性子連星や超新星残骸^{注 3)}等の高エネルギー天体現象により引き起こされる、超強重力場・超強磁場という極限環境下における時空の歪み、超高速で噴出しているプラズマ噴流や衝撃波面近傍の偏光度や偏光方位角の空間分布やエネルギー依存性を調査することで、一般相対論などの基礎物理の検証を通し、X 線偏光天体物理学という新分野の開拓が期待されています。

〈今回の研究成果〉

次に、このような魅力的なミッションを実現するために欠かせない、魅力的なモノづくりについてもご紹介します。宇宙から到来する X 線は、地球大気により吸収されてしまうため、その観測には気球・ロケット・人工衛星のような飛翔体が必須となります。IXPE 衛星には NASA マーシャル宇宙飛行センターで開発された X 線望遠鏡が 3 台搭載され、望遠鏡から 4 m 離れた焦点面にはイタリアグループによって開発された撮像型 X 線偏光計が 3 台設置されます。観測エネルギー帯域は 2-8 キロ電子ボルトであり、偏光情報はもちろんのこと、X 線の持つエネルギー、到来時間、到来方向全ての情報を同時に取得できることが最大の特長です。望遠鏡と撮像型偏光計はヒトの目でいう水晶体と網膜であり、最も重要な観測機器となります。これらの一部に、名古屋大学大学院理学研究科 三石 郁之講師らが開

発をした望遠鏡の熱環境を保持するための受動型熱制御薄膜フィルター、および理化学研究所開拓研究本部玉川高エネルギー宇宙物理研究室 玉川 徹主任研究員らが開発をした検出器用ガス電子増幅フォイルが組み込まれており、世界最高感度の実現に貢献しているのです。現在は打ち上げ前最後の衛星全体の総合試験が米ボール・エアロスペース & テクノロジーズ社にて開始されており、いよいよ打ち上げに向けた最終調整が進められています (図 1 参照)。

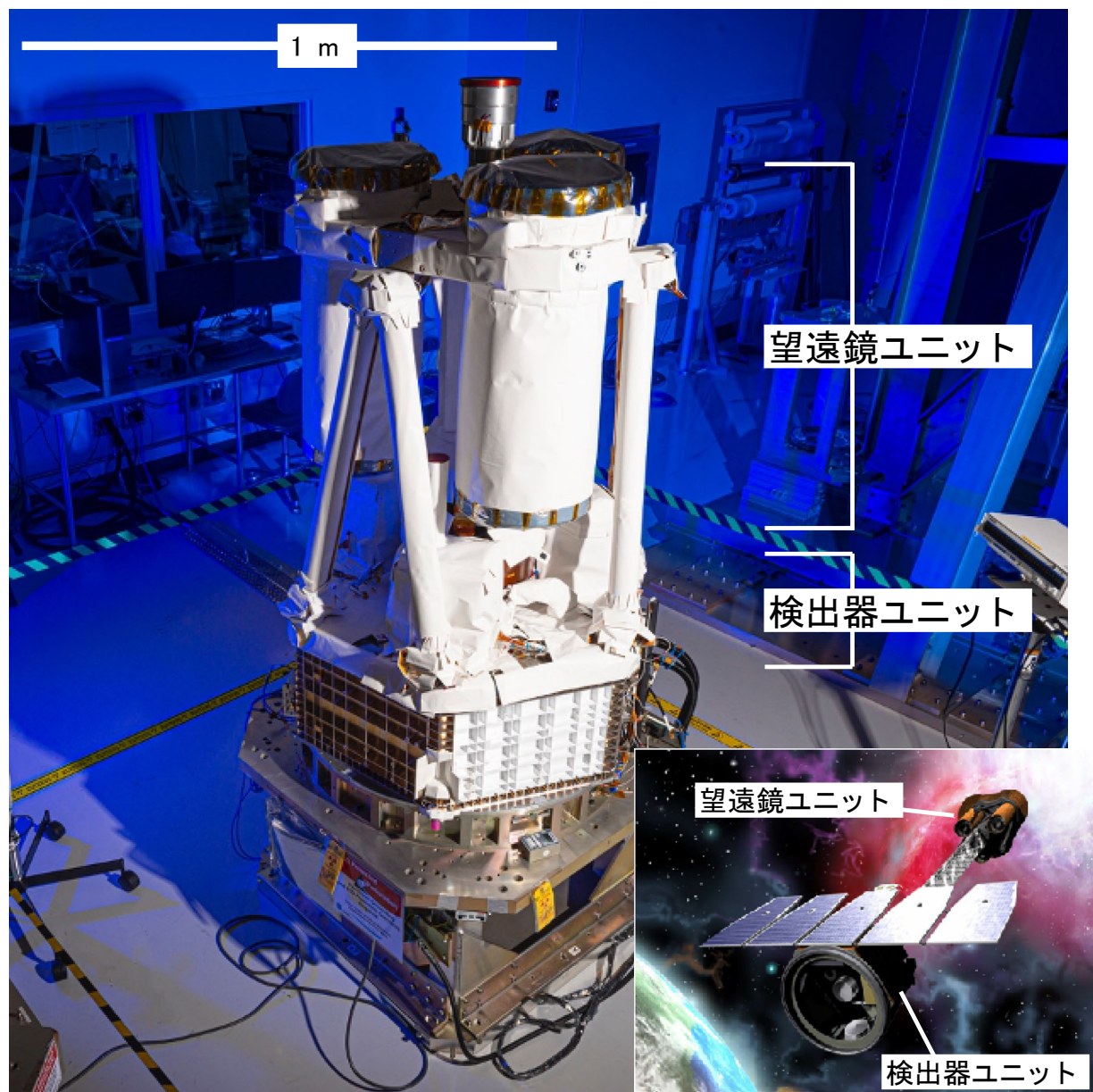


図 1: 組み立て後の IXPE 衛星全体の外観写真 (左: 写真提供 米ボール・エアロスペース & テクノロジーズ社) と軌道上での伸展ブーム展開後のイメージ (右: 写真提供 NASA)。名古屋大学が提供した薄膜フィルターは望遠鏡ユニットに、理研グループが提供したガス電子増幅フォイルは検出器ユニットにそれぞれ組み込まれています。軌道上では伸展ブームが展開され、望遠鏡と検出器ユニットは 4 m 程度離れます。搭載機器には安全のためカバーがかけられており、宇宙 X 線の到来方向は上から下になります。

〈望遠鏡用熱制御薄膜フィルターの開発〉

望遠鏡には、被写体となる X 線天体を鮮明に映すことが求められます。しかしながら、地上ではそれが実現できたとしても、宇宙空間でとなると、さらにそれが難しくなるのです。なぜならば、軌道上において人工衛星も日陰と日向を往復し、さらに周囲は極寒（宇宙空間の平均温度は $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$!!）のため、放射冷却により冷えていく、まさに過酷な熱環境にさらされるためだからです。この過酷な熱環境は、望遠鏡内部の反射鏡等を歪ませ、結果、天体像が歪んでしまいます。さらに時々刻々とこの歪み具合が変わってしまえば、天体本来の姿を正確に映し出すことができなくなってしまいます。そこで飛翔体搭載機器には、室温程度で安定した地上での熱環境を軌道上でも確保するための熱制御システムが備えられます。この熱制御システムには、ヒーターのような動的なものもありますが、電力リソース制約が非常に厳しい^{注 4)} 飛翔体においては、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が使われることもあります。IXPE 衛星ではこの受動型熱制御システムとヒーターを併用し、電力の節約を図っており、これを名古屋大学が担当することになりました。

この受動型熱制御システムの実体は、アルミ薄膜フィルターです。アルミは光学特性に優れ、車のフロントガラスの日よけシートにも利用されているように、可視光や赤外線をほとんど通さず反射します。この性質を利用し、望遠鏡外部からくる強烈な太陽光を内部に入れず、かつ望遠鏡内部からの赤外線を外に出さないようにすることで、望遠鏡にとっての静穏かつ快適な熱環境を作り出します。これに加えて、観測対象である X 線の透過率は高くする必要がありますため、IXPE 衛星では厚さ 50 ナノメートル程度の薄いアルミ膜を用いています。しかしながらこの厚さでは自立性に乏しく、このアルミ薄膜を支える構造として、耐熱性と機械強度に優れる厚さ 1 マイクロメートルほどのポリイミドフィルムを下に敷きます。これに機械強度部材として、ステンレス製メッシュとアルミ製土台がさらに加わります（図 2 左参照）。ポリイミドフィルムは、株式会社カネカから提供していただきました。

製作手順としましては、ポリイミドフィルムを注意深く切り出し、アルミを成膜し、それをステンレス製メッシュやアルミ製土台に貼り付け、組み立てます。食用品ラップフィルムの厚さが 10 マイクロメートル程度であることを考えると、それよりずっと薄い本フィルムの扱いにくさが想像できるかもしれません。これらの切り出し・貼り付け・組み立て作業の一つ一つには、使用工具の選定や接着剤の粘度調整、ネジの締め付けトルク値の最適化等、非常に多くのノウハウが詰まっています。こうしてできた薄膜フィルターは、過酷な打ち上げ・軌道上環境^{注 5)}に耐えられるよう何度も試行錯誤を繰り返し、今日の姿に至っています。完成品の外観写真を図 2 右に載せます。

この完成品は、望遠鏡内部の静穏かつ快適な熱環境を確保するため、図 3 のように望遠鏡鏡筒の上下端部に取り付けられます。IXPE 衛星では望遠鏡 3 台が搭載されるため、6 枚の搭載品、さらに 6 枚分のスペアを加え、計 12 枚を NASA に納品しました。また、本開発で得られた膨大な実験データ一式も提出し、2021 年 1 月に NASA 開発メンバーによるレビューが実施され、承認に至りました。これにより、名古屋大学 - NASA 間契約の履行に伴い NASA からの公文書【Acceptance of Thermal Shield Spaceflight Hardware for the IXPE Project】を受け取りました。また、IXPE ミッション Principal Investigator である Martin Weiskopf 博士から以下のようなメッセージも受け取っております。

“NASA’s Imaging X-ray Polarimetry Explorer mission is an international space science endeavor with contributions and experts from Nagoya University in Japan and around the world. When IXPE launches, it will be a testament to what global cooperation and collaboration can achieve.”

片面アルミ薄膜付き
ポリイミドフィルム

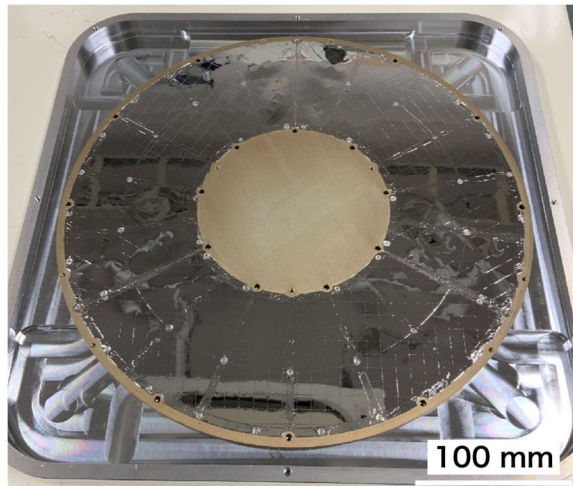
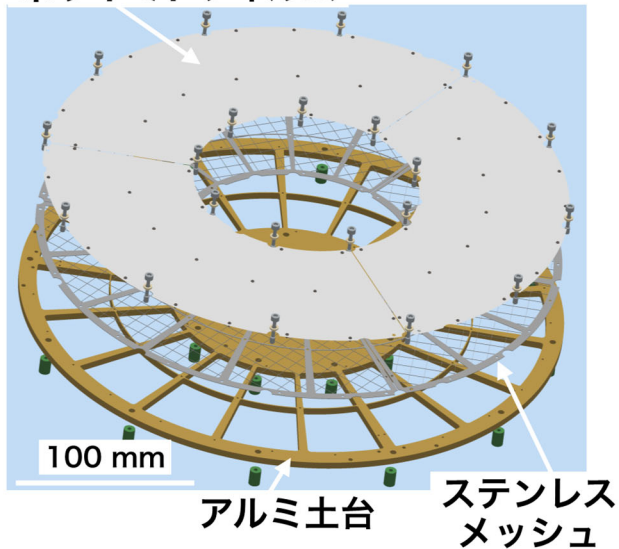


図 2: IXPE 衛星搭載 X 線望遠鏡用に開発された受動型熱制御薄膜フィルターのデザイン (左) と搭載品の外観写真 (右)。薄膜フィルターは、片面アルミ薄膜付きのポリイミドフィルム、ステンレス製メッシュとアルミ製土台からなり、過酷な軌道上熱環境から望遠鏡を守り、性能劣化を抑制する働きを持ちます。

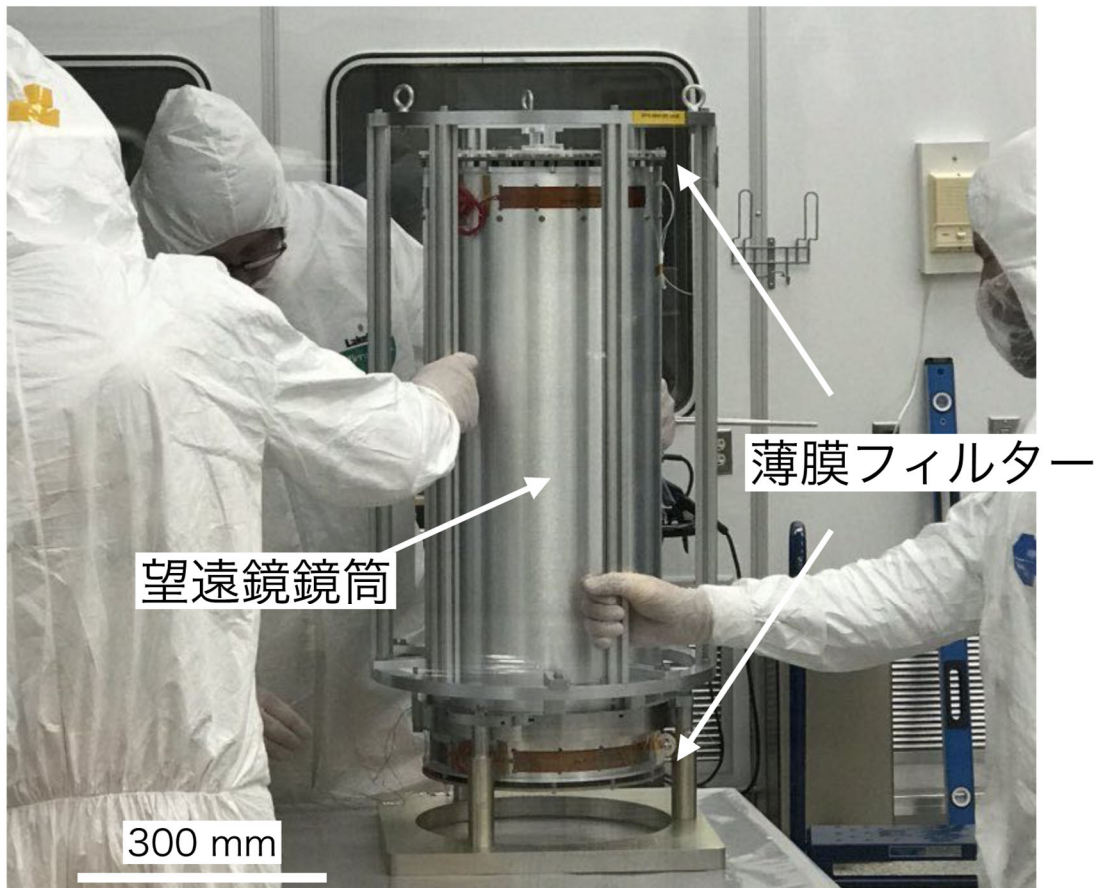


図 3: IXPE 搭載 X 線望遠鏡の上下端部に取り付けられた受動型熱制御薄膜フィルターの外観図。(写真提供: NASA)

〈撮像型 X 線偏光計用ガス電子増幅フォイルの開発〉

X 線は電磁波の一種であり、「波」としての性質を持つと同時に、「粒子」としての性質も持ち合わせています。天体からの X 線はきわめて微弱なため、われわれは X 線を「波」としてではなく、「粒子」として一粒一粒とらえます。波としての電磁波は、進行方向に垂直な面で波うっており（偏光面）、偏光の検出は容易です。一方で、粒子としての電磁波から偏光の情報を引き出すのは、非常に困難です。

IXPE 衛星搭載の撮像型 X 線偏光計は、アインシュタインが提唱しノーベル物理学賞を受賞した「光量子仮説」を原理とする「光電効果」を用いて、粒子として検出された X 線一粒一粒から偏光情報を取り出すことができる、画期的な宇宙観測装置です。天体からの X 線一粒が偏光計内に封入されたガスの原子と光電効果を起こすことで、光電子が飛び出しますが、その飛び出す方向は、元の X 線の持つ偏光方向であるという性質を用います。我々の装置は、X 線によりガス原子から叩き出された光電子の飛跡を、ミクロン単位で計測することができます。

光電子による電気信号は、そのままではきわめて弱いので、微細加工技術を駆使して製作した「ガス電子増幅フォイル（図 4）」を用いて、電子回路で計測できる電圧まで増幅します。このフォイルは、50 ミクロン離れた両面の電極間に 500V 程度の電圧を

かけることで、穴を通過する際に1個の電子が1000倍程度に増幅されます。理化学研究所ではこれまで衛星搭載用にガス電子増幅フォイルの開発を行っており、様々な宇宙観測機器に搭載されています。この穴サイズの宇宙用ガス電子増幅フォイルを作ることができるのは、世界中で理化学研究所のグループだけであり、偏光計の心臓部となるセンサーを提供します。

IXPE 衛星用のガス電子増幅フォイルは、協力企業であるサイエナジー株式会社にて製作したのちに、理化学研究所でスクリーニングと簡易試験を終え、撮像型 X 線偏光計を組み立てているイタリアチームのもとに送付しました。現在はイタリアから米国に輸送され、IXPE 衛星に搭載され、試験が進められています。

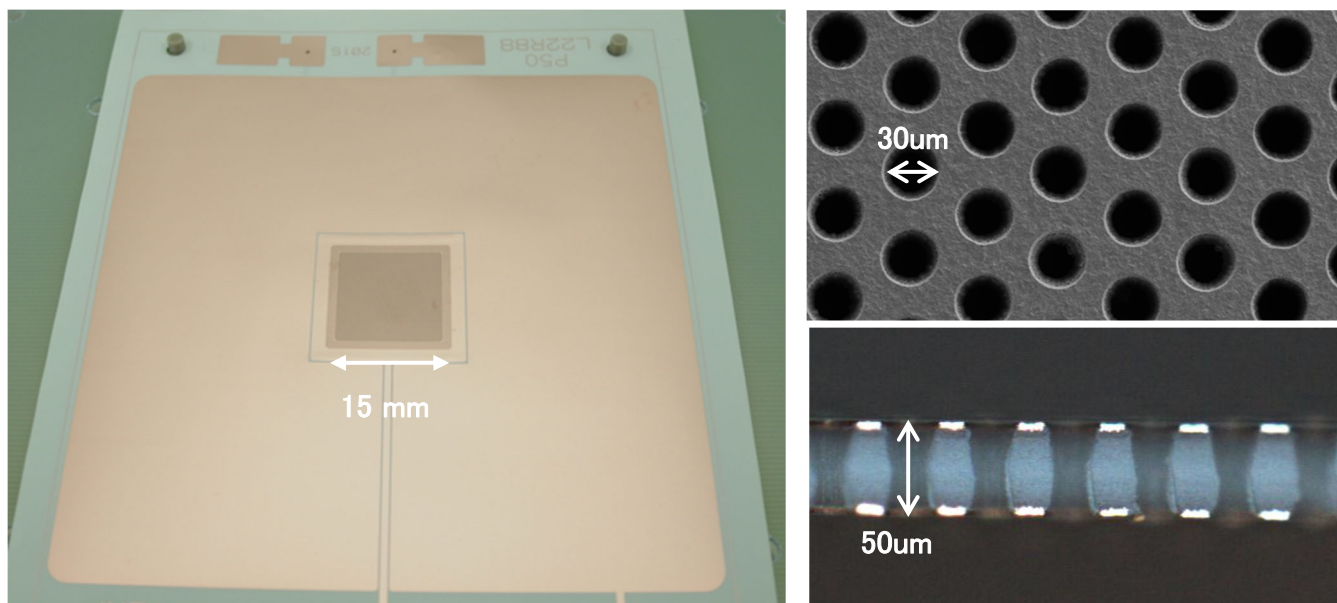


図 4: 撮像型 X 線偏光計に搭載されたガス電子増幅フォイル。(左) 全体写真、(右上) 一部を拡大した電子顕微鏡写真、(右下) 断面写真。(写真提供: 理化学研究所)

【用語説明】

注 1) IXPE: Imaging X-ray Polarimetry Explorer の略。

軟 X 線帯域での世界最高感度 X 線偏光イメージング観測を世界に先駆け実施する国際協力ミッション。観測対象はブラックホールや強磁場中性子星などの点源のみならず、超新星残骸や天の川銀河中心領域等の広がった天体をも含み、偏光という全く新しい物理量を用いて新たな宇宙科学を切り拓くことが期待されている。

注 2) 極めて磁場の強い特殊な中性子星。

中性子星は、超新星爆発後に残される半径 10 km 程度の天体であり、宇宙に存在する最も高密度の物質として知られている。

注 3) 太陽よりも数倍重い恒星の進化の最終段階で起こる大爆発である超新星爆発の名残。

注 4) IXPE 衛星ではわずか 300 W 程度の電力量で 300 kg 程度の衛星を運用する。

注 5) 例えば打ち上げ時のロケット噴射によって生じる大音響、地球高層大気中の活発な原子状酸素、軌道上での日向・日陰時の温度サイクル等。