



太陽観測ロケット FOXSI-3 の 打ち上げ成功！ ～世界初の軟 X 線撮像分光観測を実現～

名古屋大学、国立天文台、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、JAXA 宇宙科学研究所、東京理科大学、ミネソタ大学、カリフォルニア大学バークレー校、NASA からなる国際共同研究チームは、米国時間 2018 年 9 月 7 日（日本時間 9 月 8 日）、米国ニューメキシコ州ホワイトサンズ・ロケット実験場より、太陽 X 線観測ロケット実験 Focusing Optics Solar X-ray Imager の 3 号機 (FOXSI-3) の打ち上げに成功しました。FOXSI は X 線望遠鏡^{*1}により高感度の撮像分光観測を実現する実験であり、日本チームは、カブリ数物連携宇宙研究機構、宇宙科学研究所が中心となって開発した高分解能、低ノイズの半導体イメージング検出器^{*2}を提供しています。FOXSI-3 は約 15 分間の弾道飛行中に、地球大気圏外から太陽を予定どおり、約 6 分間観測しました。

FOXSI-3 には、新たに名古屋大学宇宙地球環境研究所 (ISEE) の 石川 真之介 研究員、国立天文台の 成影 典之 助教らが開発した高速 X 線 CMOS カメラが搭載され、0.5-5 キロ電子ボルトの軟 X 線帯域^{*3}において、世界で初めて太陽の撮像分光観測^{*4}を実現しました。この観測は、本学理学研究科の 三石 郁之 助教が中心となって開発した太陽からの強烈な可視光を遮断して目的とする X 線のみを透過させる遮光フィルターを搭載することにより可能になりました。

FOXSI-3 の観測により、太陽コロナにおける高エネルギープラズマの精確な測定や、コロナの小規模な現象の様子が解明されることが期待されます。

この研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（JP18H03724,JP17H04832,JP16H02170,JP16H03966,JP15H03647,JP24244021,JP21540251,JP20244017）の助成を受けたものです。

【ポイント】

- ・米国時間 2018 年 9 月 7 日（日本時間 9 月 8 日）、ニューメキシコ州ホワイトサンズより、国際共同太陽 X 線観測ロケット Focusing Optics Solar X-ray Imager の 3 回目の打ち上げ（FOXSI-3）に成功した。
- ・日本のチームが新たに開発し、FOXSI-3 で初めて搭載した観測装置により、史上初の太陽軟 X 線（0.5～5 キロ電子ボルトの帯域）の撮像分光観測に成功した。
- ・軟 X 線撮像分光観測は、名古屋大学宇宙地球環境研究所と国立天文台で開発した高速 CMOS カメラと、名古屋大学理学研究科で開発した X 線のみ透過させ太陽の強烈な可視光を遮光するフィルターにより可能となった。
- ・この観測により、太陽コロナの高エネルギープラズマの精確な物理状態の測定や小規模なエネルギー解放現象の様子が解明されることが期待される。

【研究背景と内容】

<研究背景>

太陽にはコロナと呼ばれる高温・低密度の大気があり、フレアと呼ばれる爆発現象をはじめ、様々な現象が起きています。太陽コロナの温度は、およそ 100～200 万度程度であり、X 線を発しています。これまで、日本の「ようこう衛星」「ひので衛星」をはじめとする観測機器が太陽の X 線観測に活躍し、コロナの現象を多数解明してきました。今後、さらに研究を発展させるために期待されているのが、X 線を望遠鏡で集光することで実現する高感度の撮像分光観測^{※4}です。これまでの太陽観測機器では、X 線の中でも比較的エネルギーが高い硬 X 線^{※3}では集光を実現する精度の高い望遠鏡の実現が困難だったため、感度の高い画像が得られませんでした。一方、エネルギーの低い軟 X 線領域^{※3}では集光観測は実現していましたが、従来使われていた X 線 CCD カメラでは、コロナの現象が起こる数 10 秒から数分程度の時間で分光観測を行うことは撮像のスピードが遅すぎるため実現できませんでした。

名古屋大学、国立天文台、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、JAXA 宇宙科学研究所、東京理科大学、ミネソタ大学、カリフォルニア大学バークレー校、NASA からなる国際共同研究チームは、最新の技術を用いてこれらの困難を克服し、太陽 X 線高感度撮像分光観測を実現するロケット実験 Focusing Optics Solar X-ray Imager (FOXSI) を進めています。FOXSI は、2012 年と 2014 年の 2 回、打ち上げに成功しており、米国のチームが開発した硬 X 線帯域まで集光が可能な X 線望遠鏡と、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、宇宙科学研究所により開発した低ノイズ、高分解能の半導体イメージング検出器により、太陽硬 X 線で初めての高感度集光撮像観測を実現しました。この観測により、微小なフレア（ナノフレア）が太陽コロナを 100～200 万度という高温を保つのに寄与している証拠を得るなど、重要な科学成果を達成してきました。

<今回の研究成果>

米国時間 2018 年 9 月 7 日（日本時間 9 月 8 日）、ニューメキシコ州ホワイトサンズより FOXSI ロケット実験の 3 回目である FOXSI-3 の打ち上げに成功しました(図 1)。FOXSI-3 は約 15 分間の弾道飛行中に、地球大気圏外から太陽を予定どおり約 6 分間観

測しました。FOXSI-3 では、過去 2 回の打ち上げで用いた硬 X 線検出器の他に、今回新たに日本のチームが開発した軟 X 線観測装置 Photon Energy Imager in X-rays (PhoEnIX) が搭載されています。PhoEnIX の検出器である高速 X 線 CMOS カメラは名古屋大学宇宙地球環境研究所の 石川 真之介 研究員と国立天文台の 成影 典之 助教が開発したもので、太陽からの強烈な可視光を除去し X 線のみを透過する遮光フィルターを名古屋大学理学研究科の 三石 郁之 助教が開発しました。PhoEnIX により、太陽からの 0.5~5 キロ電子ボルトの範囲の軟 X 線の撮像分光観測に初めて成功しました。太陽からの硬 X 線は主におよそ 1000 万度、もしくは、それ以上という非常に高温のプラズマから発せられますが、軟 X 線は 100~1000 万度のプラズマを捉えることができます。今回、軟 X 線撮像分光観測が初めて実現したことにより、太陽のどの領域で、どのぐらいの温度のプラズマが、どのぐらいの量で存在するかを、これまでにない精確さで調査することができるようになりました。今後、観測データを詳細に解析し、コロナにおいて高温プラズマがどのような物理状態であり、どのように分布しているかを詳細に解析していく予定です。このことにより、コロナがどのように成り立っているか、小規模な現象がコロナの物理状態にどのような影響を与えるかを解明することが期待されます。

<軟 X 線検出器の開発>

X 線による天体観測において、単に画像を得るだけでなく、X 線のエネルギー分布を得る撮像分光観測は、X 線を発するプラズマの温度、密度といった物理状態や、高エネルギー粒子加速の情報を得るために重要です。軟 X 線のエネルギー帯域の撮像分光観測において、太陽以外の天体を対象とする観測装置では X 線 CCD カメラが活躍してきました。X 線 CCD カメラでは、露光時間中に X 線光子が画素数に対して十分少ない数だけ入射すると、X 線光子 1 つ 1 つのエネルギーを測定することができるため、X 線のスペクトルを作成することができます。しかし、過去の X 線 CCD カメラは、ある程度のサイズの X 線画像を取得するために短くても、およそ 1 秒以上の時間を要していました。X 線スペクトルを解析して物理状態の情報を得るには、数千個以上の光子を検出することが望ましいため、X 線天文学の観測ではスペクトル作成のために数時間以上かかることが一般的でした。太陽以外の天体の場合は、もともと X 線が微弱であるため、CCD の撮像時間を改良しても、この効率は劇的には改善されず、CCD カメラの高速化に対する要求は、これまではあまり強くありませんでした。一方、太陽は現象の時間スケールが数十秒から数分程度と短いため、ずっと短い時間で X 線スペクトルを得ることが求められます。他の天体と比べると、太陽は X 線帯域においても圧倒的に明るいため、検出器を高速化することができれば、太陽コロナ現象の時間スケールで X 線スペクトルを得ることができるようになります。

軟 X 線太陽撮像分光観測実現のために我々が注目したのが、CMOS イメージングセンサー^{※5}です。近年、CMOS の技術が向上しており、1 秒間に数百枚の画像取得が可能な高速 CMOS センサーが実現しています。我々は、軟 X 線帯域で観測が可能な高速 CMOS センサーを用い、X 線 CMOS カメラを開発しました(図 2)。実験室や加速器施設での試験で性能を確認し、低いノイズ、高いエネルギー分解能で X 線撮像分光観

測が可能であることを確認しました。このシステムを PhoEnIX 検出器として、FOXSI-3 に搭載しています。FOXSI-3 では、CMOS カメラは毎秒 250 枚の X 線画像を取得し、軟 X 線画像とスペクトルを同時に得ることに成功しました。

高速 CMOS カメラを用いた太陽観測を行う際に問題となるのが、データ量が膨大であることです。毎秒 250 枚取得される X 線画像のデータ量は毎秒 150 MB にも及び、FOXSI-3 の打ち上げ時に取得するデータの合計量は 100 GB 以上に達します。このような高速、大量のデータ取得システムは実現されていませんでした。今回、我々は、最新のデジタル回路技術を用い、毎秒 150 MB の高速データを 1 TB 以上連続で保存できるデータ取得システムを開発しました（図 2 中央の四角い基板）。このデータ取得システムにより、FOXSI-3 の軟 X 線撮像分光観測が実現できました。

<遮光フィルターの開発>

太陽は、我々の目で直接見ることができる可視光帯域での明るさが、本観測の主役である X 線帯域での明るさを凌駕しています。そして、検出器はこの可視光線に対しても感度を持つため、招かれざる客である可視光線等を遮る構造が必要となります。しかしながら、当然、それ自身が主役である X 線をも遮らぬよう、フィルターの役割を担うことも求められます。さらには、この遮光フィルターは打ち上げ時の過酷な振動環境等にも耐えるよう作られねばなりません。

我々が用意したのは二種類の遮光フィルターです。各々の遮光フィルターは、太陽からの X 線を集める望遠鏡の上面部（正確にはプレ・コリメータ^{※6}前、つまりは観測機器の最上流部）および集光された X 線のエネルギー診断を行う検出器上面部に設置されています。我々はこの二重の遮光フィルターで、招かれざる光線成分の除去を目指しました。

まず、遮光フィルターの構成部品について説明していきます。大切なフィルターの役割を担うのは、およそ 150 ナノメートル厚のアルミ薄膜です。この程度の厚さであれば、アルミ薄膜は可視光や赤外線を遮断し、その一方で、X 線帯域では高い透過特性を示します。しかしながら、非常に薄いため自立性に乏しく、アルミ薄膜を支える構造が必要となります。この支持構造には、ポリイミドフィルム^{※7}を採用しました。ポリイミドフィルムの厚みは X 線透過率と機械強度を考慮して 2 マイクロメートルとし、この上にアルミ薄膜を蒸着しました。これに、機械強度部材として、ステンレス鋼フレームおよびアルミ土台がさらに加わります。このアルミの土台には腐食低減および塗装密着性の向上を目的とした表面処理が施してあり、これらが遮光フィルターの構成部品となります。例として、検出器前に設置された遮光フィルターの部品図を図 3 に示します。検出器前に設置された遮光フィルターは、アルミ土台の上下両面にステンレス鋼フレームが貼り付けられるようになっており、上流側で落としかねなかった成分を落とす、いわば最後の砦となります。また、ステンレス鋼フレームのデザインも、望遠鏡前遮光フィルターの正方形の網目形状とは異なり、検出器を考慮し、中空の円形状となっています。

次に、この構成部品を組み合わせ、遮光フィルターを製作していきます。大まかな製作工程としては、1) ポリイミドフィルムの切り出し → 2) ポリイミドフィルムへの

アルミ成膜 → 3) ステンレス鋼フレームと片面アルミ薄膜付きポリイミドフィルムの接着 → 4) ステンレス鋼フレームとアルミ土台の接着 → 5) ベーキング^{※8}、となります。例えば、食品用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。扱う際、電気で苦しめられた方もいるかと思いますが、皺やダスト付着、1 ミリにも満たない小さな穴でさえも、良質なフィルター作成には天敵となります。この極薄フィルムの持ち運び方や切り出し方、接着剤の粘度調整や貼り付け方まで、端々に細かなノウハウが詰め込まれています。これらの工程を経て完成したものが図 4 となります。

本遮光フィルターは、ロケットへの初搭載という様々な新規要素で四苦八苦する中、過去の長い開発の歴史の中で培った知識とノウハウ、そして、様々な分野の専門家の方々のサポートがあり、本開発チーム全員の力を合わせ、完成に至りました。今後は、いよいよ誰も見たことのない高品質なデータを吟味し、太陽が起こす高エネルギー現象の謎に迫ります。私たちの想像を超える結果が出ることでしょう。開発者一同、今から胸が高鳴ります。

【用語説明】

- ※1) X 線望遠鏡：X 線は物質に対し非常に浅い角度でしか反射しない性質を持っているため、X 線の反射望遠鏡は通常の可視光用の反射望遠鏡とは異なる形状であり、斜入射望遠鏡と呼ばれる。X 線を集光するためには、非常に精度の高い望遠鏡が必要である。
- ※2) 半導体イメージング検出器：X 線の入射した位置とエネルギーを調べることができる半導体による検出器。FOXSI-3 ではシリコン半導体による検出器とテルル化カドミウム半導体による検出器を搭載している。テルル化カドミウム半導体は、より高いエネルギーの X 線まで検出することができる。
- ※3) 軟 X 線、硬 X 線：X 線の中でもエネルギーの低い帯域を軟 X 線、高い帯域を硬 X 線と呼ぶ。その境界となるエネルギーは明確には決まっていないが、ここでは数キロ電子ボルト以下の X 線を軟 X 線、それ以上のエネルギーの X 線を硬 X 線と呼ぶ。
- ※4) 撮像分光観測：画像を得るだけでなく、どの波長の光がどれだけ含まれているか（スペクトル）を観測することを撮像分光観測と呼ぶ。単に画像を得るだけの観測は可視光の観測においてはモノクロ画像のみを取得することに対応する。X 線観測においては、単に画像を取得するのみでは、X 線の明るさの違いが密度によるものなのか温度によるものなのかを判別できない。スペクトルを得ることにより、温度、密度といった物理状態を調べることができる。
- ※5) CMOS イメージングセンサー：CCD および CMOS イメージングセンサーはデジタルカメラ等に使われている撮像素子である。CCD、CMOS とともに受光面の厚さが十分あれば X 線を検出することができる。CCD は検出した光による電気信号を画素ごとに転送して順番に読み出す一方、CMOS センサーは 1 つ 1 つの画素にそれぞれ読み出し回路を持つ。CCD は信号の転送に時間がかかるため CMOS の方が高速化には有利。各画素で性能にばらつきが出にくい CCD が科学計測に主に用いられてきたが、近年の技術向上により、科学計測に活用できる高性能な CMOS が実現し

ている。

※6) プレ・コリメータ：期待した光線経路以外からの経路をとおり、検出器面に到達してしまう、いわゆる迷光成分による感度低下を防ぐための機構。プレ・コリメータを望遠鏡上面部に設置することにより、入射光視野を限定する。

※7) ポリイミドフィルム：有機高分子材料の一種。強固な分子構造を持ち、耐熱性が高く、優れた機械的性質も併せ持つ。化学構造により可視光透過特性が変わるため、透明なものから淡黄色・赤褐色等に着色しているものもある。

※8) ベーキング：真空チェンバー内に入れて加熱することで、例えば接着剤からのアウトガスを積極的に放出させることにより、軌道上でのアウトガス量を減少させるための工程。

<関連リンク>

Web リリース（国立天文台 SOLAR-C 準備室）

<https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3/>

FOXSI のウェブサイト（ミネソタ大学）

<http://foxsi.umn.edu/>

NASA による FOXSI-3 紹介記事

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/nasa-funded-rocket-to-view-sun-with-x-ray-vision>



図 1: 観測ロケット FOXSI-3。米国ニューメキシコ州ホワイトサンズ・ロケット実験場。
米国時間 2018 年 9 月 7 日 (日本時間 9 月 8 日) に打ち上げた。(© NASA, FOXSI-3 team)

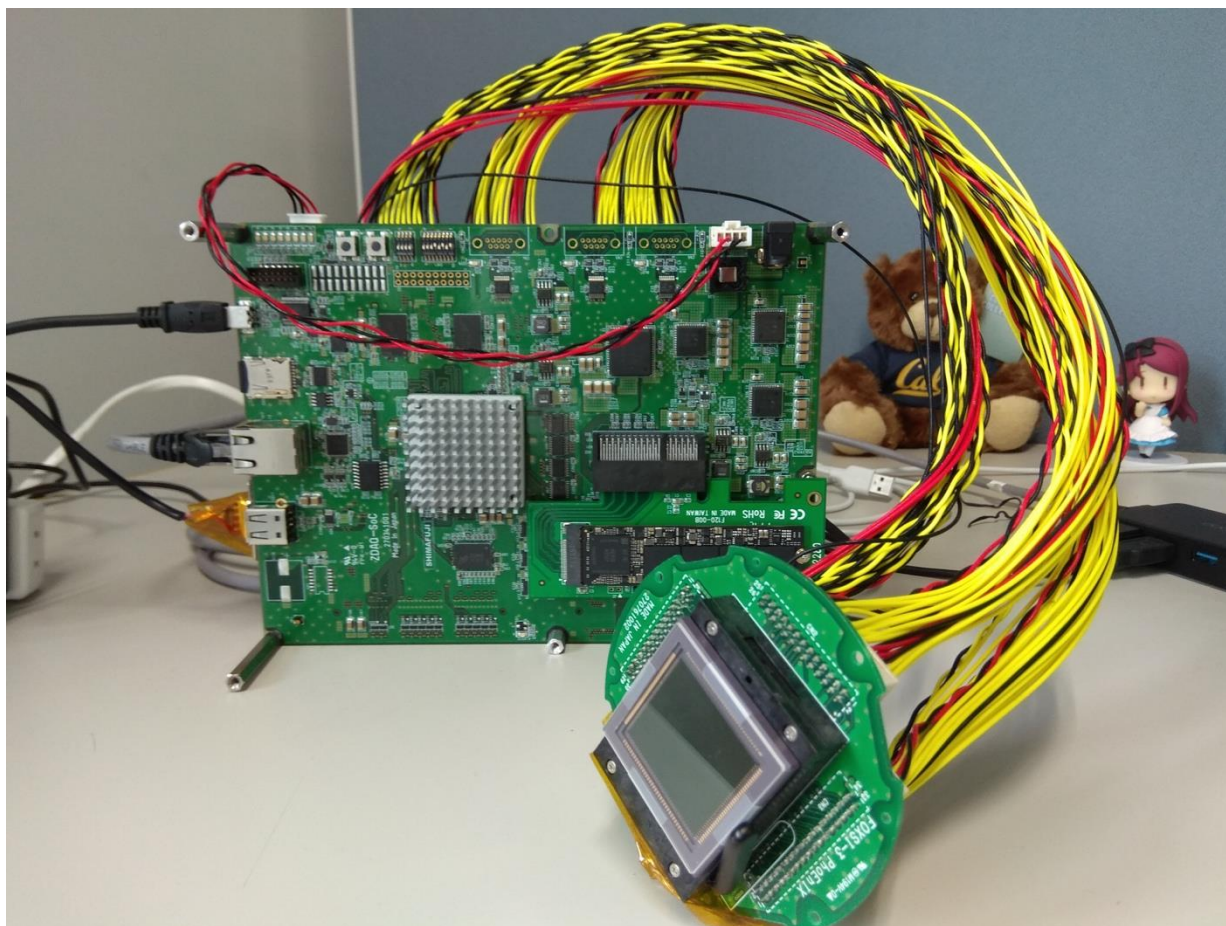


図 2: FOXSI-3 搭載の軟 X 線観測装置(PhoEnIX)。右下の丸い基板に搭載されているのが高速 X 線 CMOS センサー、左の四角い基板が高速データ取得・記録システム。(© FOXSI-3 team)

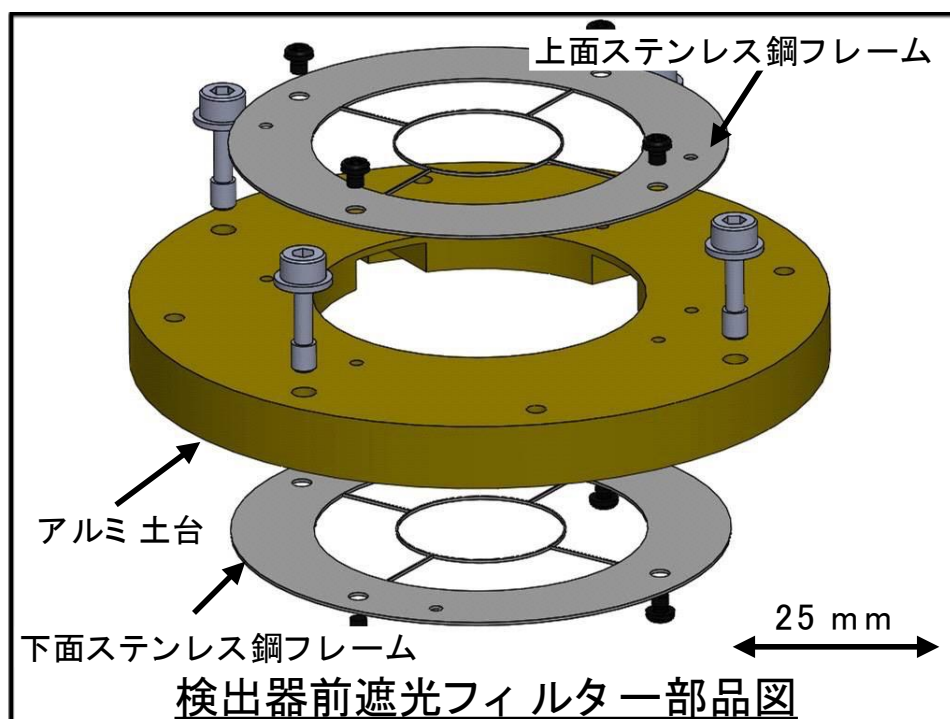


図 3: 検出器上面に設置された遮光フィルタの部品図。アルミ土台の上下にステンレス鋼フレームが接着されており、各々ポリイミドフィルムが貼り付けられるようになっている。この部品図には片面アルミ薄膜付きポリイミドフィルムは含まれていない。(© FOXSI-3 team)

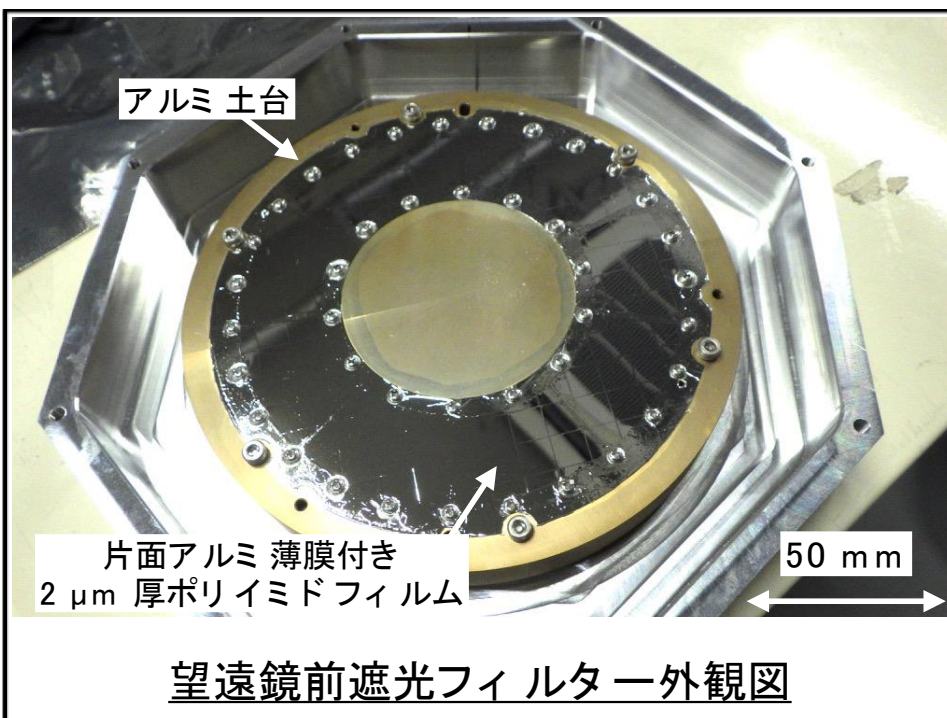
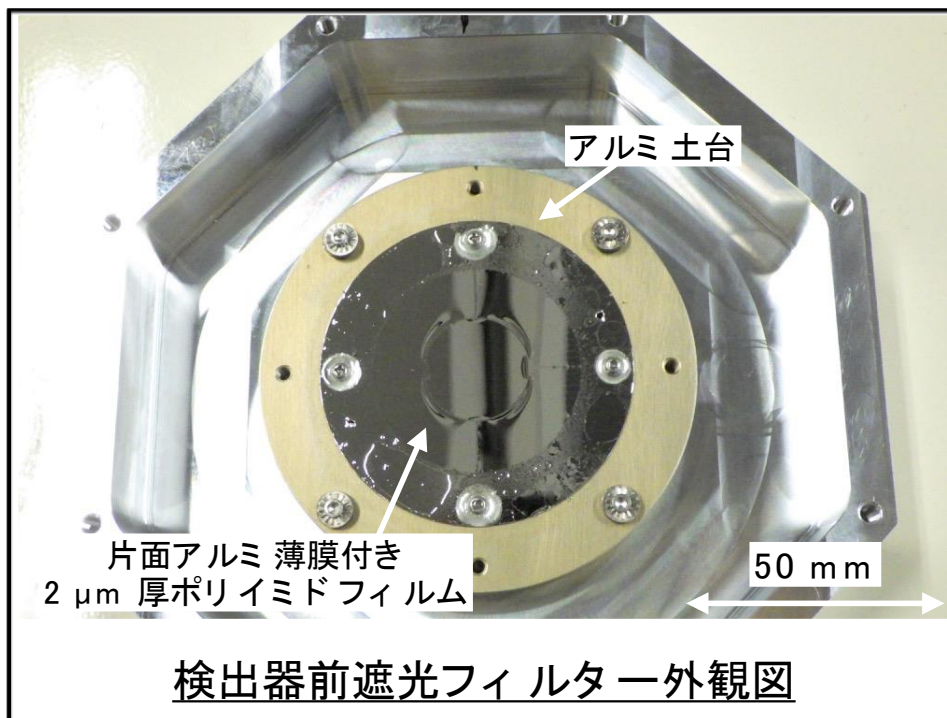


図 4: 検出器 (上図) / 望遠鏡 (下図) 上面に設置された遮光フィルターの外観図。機械強度部材であるアルミ土台の上にステンレス鋼製フレームが接着され、さらにその上に片面アルミ薄膜付きポリイミドフィルムが接着されている。アルミ土台には耐食性および塗装密着性の向上のため表面処理が施されている。ただし、検出器前遮光フィルターのアルミ製土台の裏側にも、表側と同様の構造があり、二枚のフィルムから成る。(© FOXSI-3 team)