
観測機器 アブストラクト集
2022年度 第52回 天文・天体物理若手夏の学校

満田和久（国立天文台 特任教授）

観測装置開発におけるニーズ志向とシーズ志向 - X線天文学の観測装置を中心として

技術 (technology) 開発において、needs oriented (ニーズ志向) と seeds oriented (シーズ志向) と呼ばれる二つの方向性があるのをご存知でしょうか？ググってみると、『シーズ志向とは、新商品開発を行うに際して、顧客のニーズを満たそうとするのではなく、顧客に提案するような形で開発を行うこと。ニーズ志向の反意語』[exBuzzwords] など解説が出てくる。天文学においては、ニーズ志向が基本である。すなわち、大きな視野に立ったサイエンスゴール（“研究課題の核心をなす学術的「問い」”）のもとに、より直接的な“研究の目的”を設定し、その実現のために“何をどのように、どこまで明らかにしようとするのか”を明確化し、それに強く紐づけながら技術開発をすすめる必要がある[“ ”に囲まれた文言は科研費の研究調書で“具体的かつ明確に記述すること”とされている事項]。そうであれば、技術開発の紆余曲折の中で目的を見失ってしまう危険性が高い。一方で、技術的な革新は、ニーズ志向だけからでは生まれてこないことが多いことも事実である。技術革新にはニーズ志向とシーズ志向の出会いと融合が関わっていることが多い。本公演では、私自身の経験に基づきつつ、X線天文学における幾つかの革新技術開発をニーズ志向とシーズ志向の出会いという観点から紹介し、将来どのような可能性があるかも議論したい。

坂本貴紀（青山学院大学 教授）

NASA ゴダードでの8年間と大学でのキューブサット開発

私は2004年3月に博士の学位を取得後、NASA Swift 衛星の打ち上げに合わせて、同年10月にNASA ゴダードスペースフライトセンターにNASA Postdoctoral Program Fellow として着任した。2012年8月までの約8年間、Swift 衛星の仕事を中心に、アメリカでの研究環境や任期付研究員の实態などを目の当たりにした。また、私生活では、2004年12月に結婚をし、妻との新婚旅行を異国アメリカでスタートさせ、2人の娘もアメリカで産まれた。私のアメリカでの波乱万丈な8年間について包み隠さずお話しする事で、若い人の将来へのキャリアを考える参考になればと考えている。

2021年11月9日にJAXAの革新的衛星技術実証2号機の実証テーマの一つとしてイプシロンロケット5号機で、ARICA (AGU Remote Innovative Cubesat Alert system) が打ち上がった。ARICAは私の研究室で開発された1Uキューブサット(10cm角の超小型衛星)であり、本格的な開発から約3年で作り上げ、打ち上げにこぎつけた。ARICAでは、衛星の設計、製造、そして、様々な衛星環境試験を3年で行ったため、4年生の卒研配属で研究室に入った学生が修士課程終了

までに衛星開発の全ての工程を経験する事ができた。大学のいち研究室で作られた ARICA の開発を振り返り、今後の展望について述べる。

太陽観測ロケット実験 FOXSI-4 搭載用高角度分解能 X 線望遠鏡の開発 安福 千貴 (名古屋大学 M1)

FOXSI (Focusing Optics X-ray Solar Imager) は、太陽 X 線の撮像分光観測を目的とした日米共同のロケット実験である。2024 年には 4 号機が打ち上げられる予定であり、我々はこの FOXSI-4 搭載用高角度分解能 X 線望遠鏡の開発を進めている。地上 X 線結像系開発で構築した独自の小口径高精度電鍍技術 ([1]) を応用することで、これまでに直径 60 mm / 焦点距離 2000 mm 有効高さ 220 mm の Wolter-I 型反射鏡の試作に成功 ([2]) し、製作した反射鏡の X 線照射による性能評価を実施してきた。結果、15 keV にて広がった天体に対する感度の指標である HPD (Half Power Diameter) < 13 秒角、点源感度を示す FWHM は ≈ 5 秒角 (検出限界) を達成した。また、局所的な照射では 17% の領域で目標分解能である HPD < 10 秒角を達成した (日本天文学会 2022 年春季年会作田他)。

今年度は、試作品の望遠鏡を用いて振動試験方法の確立に取り組んでいる。ロケット打ち上げ時にかかると思われる振動レベルを設定、試験を実施した結果、異音や接着剤の破断など著しい変化はなく、振動前後の周波数応答にも大きな変動は見られなかった。また振動試験の他にも、反射鏡支持機構の設計・製作にも取り組み、ロケットへの取り付け作業等を含め、エンジニアリングモデルでの問題点の洗い出しに注力しているところである。本講演では、X 線性能評価試験に加え、振動試験やその他の現状についても報告する。

1. Mimura et al., Rev, Sci, Instrum., 2018
2. Takigawa et al., JATIS, submitted

X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器における Goffset のシミュレーション 青木 悠馬 (近畿大学 M1)

我々は X 線分光撮像衛星 XRISM に搭載する軟 X 線撮像装置 Xtend の開発を行っている。XRISM 用 CCD 素子では、1 ピクセルイベントよりも複数ピクセルにまたがったイベントの方が波高値が高くなるという現象があり、その波高値の差を Goffset という。さらに Goffset にはエネルギー依存性があり、低エネルギーのイベントであるほど Goffset は大きくなる。現在まで Goffset の物理的メカニズムは分かっておらず、較正手法に不定性があった。

我々はノイズが Goffset に影響を与えているという仮説のもと、シミュレーションを用いてノイズと Goffset の関係を調査した。その結果、ノイズが増加すると Goffset も増加すること、あるノイズの値での Goffset が実データを再現することを確認した。さらにシミュレーションデータから算出した補正パラメータを用いて実データの波高値を補正した結果、Goffset が解消することを確認した。

またシミュレーションより、ノイズがない場合でも Goffset が存在することが分かった。この場合の Goffset は、周囲のピクセルにまたがった波高値の取りこぼしに起因すると考えた。X 線

が入射したピクセルの周囲 3×3 ピクセルの波高値を全て足し合わせると、ノイズがない場合の Goffset についても解消することを確認した。

超広帯域 (6.5–12.5 GHz) Turnstile OMT の開発 知念 翼 (大阪公立大学 修士 2 年)

大質量星形成過程に付随することが知られている 6.7 GHz メタノールメーザー及び 2019 年に突発的な質量降着率増大に伴い検出された 6.2, 7.6, 7.8, 12.2 GHz のメタノールメーザーを観測し、大質量星周囲の温度、密度環境などの時間変化を捉えることで大質量星形成に関する新たな知見を得ることが期待できる [1][2]。我々はこれを受け、帯域 6.5–12.5 GHz、比帯域 $\Delta f/f_c$ にして 63% (Δf : 周波数幅、 f_c : 中心周波数) と導波管限界に近い受信機の開発を行っており、その受信機の一つとして直交偏波分離器 (OMT) がある。(導波管では一般的に TE₁₀ と呼ばれるモードで電波を伝搬させる。周波数 f により TE₁₀ が発生する導波管サイズが決まり、その 2 倍の周波数 $2f$ では TE₂₀ と呼ばれる高次モードが発生する。導波管限界とは TE₁₀ が発生する周波数から高次モード TE₂₀ が発生するまでの比帯域 $(2f-f)/(3f/2) \times 100 \approx 66\%$ のことを指す。)

電波望遠鏡のさらなる発展のために、受信機には観測効率の向上や広帯域かつ低損失な受信機コンポーネントの開発が求められている。特に OMT を用いることで直交偏波を水平・垂直偏波へとそれぞれ分けることができ、2 倍の情報量を取得することができる。低損失として知られる導波管 OMT には、Septum 型、Double Ridge 型や Turnstile 型があり、中でも広帯域な特徴を持つのが Double Ridge 型と Turnstile 型である。Double Ridge 型は比帯域 50% 前後が限界であるが、Turnstile 型は比帯域 60% 以上と導波管限界に近い比帯域を達成できる。

今回 OMT には比帯域 60% 以上の性能が求められたため、Turnstile 型が最適だと考え、採用した。Turnstile 型は偏波を分離する Tower 部、各偏波が通過する E-bend, H-bend、最後に各偏波の信号を結合する Combiner で構成されている。これら各コンポーネントのシミュレーション結果は反射損失 25–40 dB の結果を得ている。また OMT 全体でのシミュレーションに関しても、比帯域 65% にわたり反射損失が 22 dB 以上となっており広帯域にわたり低反射な OMT の設計に成功している。現在、この OMT の測定を進めており、本講演ではシミュレーション及び測定結果について報告する。

1. Breen et al., THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 876, L25, 2019
2. MacLeod et al., Monthly Notices of the ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY, 489, 3981–3989, 2019

可視光・形状測定による Lobster Eye Optics のアラインメント調整 後藤 初音 (金沢大学宇宙物理学研究室 修士 2 年)

HiZ-GUNDAM は、高感度の広視野 X 線モニターにより突発天体を発見し、可視光・近赤外線望遠鏡による自動追観測を行う計画である。これにより、第一世代星を起源とするガンマ線バーストの探査やそれを背景光とした初期宇宙の物理状態の観測、また重力波やニュートリノ放射と同期した

突発天体の観測などを行う。突発天体を監視する広視野 X 線モニターには、Lobster Eye Optics (LEO) と呼ばれる X 線結像光学系と 2 次元イメージセンサを用いたシステムが検討されている。この検出器は、0.4–4.0 keV の軟 X 線帯域において、約 0.5 ステラジアン視野を 10^{-10} erg/cm²/s (100 秒間露光) の感度で監視する。LEO は一辺が数十 μ m の微細な四角形の穴が多数配列されたガラス基板を球殻状に湾曲させた光学系で、その内壁を X 線反射光学系として利用する。複数の LEO を球殻状に配置することで広視野のモニターを実現可能であり、入射 X 線の到来方向を HiZ-GUNDAM の目標精度 < 3.0 arcmin で決定するためには、LEO 同士の精密な位置検出と調整が必要である。

そこで本研究では、LEO の位置検出の簡便な方法として可視光による測定を検討し、1 枚の LEO を用いて可視光に対する特性を調査した。また、2 枚の LEO を球殻上に配置するために高精度のチタン製フレームを製作し、フレームに並べた LEO の位置精度を可視光による測定と形状測定により評価した。それらの測定結果からフレーム内の LEO の機械的な位置調整をおこない、調整後の LEO とフレームに対して X 線による性能評価をおこなった。本講演では、可視光と形状測定を用いた複数枚の LEO のアラインメント調整システムについて紹介し、複数枚の LEO に同時に入射した X 線に対する結像性能評価の結果を報告する。

恒星フレアの H α 輝線を検出する 25cm 自動望遠鏡の開発

井出 善心 (兵庫県立大学 理学研究科 光学赤外線天文学研究室 M1)

恒星フレアとは恒星表面で起こる爆発現象のことで、 γ 線から電波までの広範な電磁波を放出する。近年の観測的研究で、太陽での最大規模のフレアの 10 倍以上も大きなエネルギーを放出する、スーパーフレア現象が明らかになってきた。しかし、恒星でのフレア現象は発生の予測が困難なため、発生直後の観測例は多くない。そこで、恒星を夜間モニターし続け、その星のフレアの発生を検出する自動望遠鏡を作成している。

口径 25 cm の市販の望遠鏡に、素子サイズが 6.9 mm \times 4.6 mm の CCD を取り付けた。視野は 9.5 ' \times 6.3 ' である。そして、透過光の中心波長が 656.3 nm で半値幅が 3 nm の H α 干渉フィルターを CCD の前に置いた。R バンドで 12 等級の天体を露出時間 5 分で S/N=40 で撮影できる。視野 2.3 度 \times 1.7 度のガイダーを望遠鏡に同架し、天体の導入精度を約 12 ' から約 2 ' に、追尾精度を 1 時間当たり約 5.3 ' から約 2.9 " に向上させた。望遠鏡とカメラを制御するソフトウェアは INDI、PHD2、CCDCiel を組み合わせて開発した。西はりま天文台に設置したスカイモニターからの天候状況の情報に応じて、指定した天体を自動で観測できる。将来は 25 cm の自動望遠鏡でフレア発生を検出した場合、すぐに西はりま天文台なゆた望遠鏡 (口径 2m) で分光観測できるように運用する。現行の視野では、画像内の星が少ないためか、Astrometry.net で WCS を画像に張り付けられない場合が多い。そのため、解析の自動化までは至っていない。星が多く写るよう、視野を広くするため、24.6 mm \times 24.6 mm の CCD に取り替えて観測を行う予定である。講演では、自動化の詳細と今までの観測結果について述べる。

遺伝的アルゴリズムによるパラボラ構造最適化手法の実装

今村 千博 (名古屋大学大学院 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 博士前期課程 2年)

本講演では、Large Submillimeter Telescope (LST) 主鏡支持構造最適化を目的とした、遺伝的アルゴリズム (GA) による構造最適化コードの開発および、今後の方針を報告する。

LST はチリ共和国に建設を計画中の口径 50m の大型ミリ波・サブミリ波単一鏡である。LST の強みである広視野・広帯域観測は、高感度・高空間分解能を有するが視野と帯域幅が狭い ALMA と相補的なディカバリースペースを開拓することが期待されている。LST のサブミリ波観測には十分な鏡面精度 ($45\mu\text{m}$ RMS) が求められる [1] が、巨大なアンテナゆえに鏡面精度は自重変形や温度膨張・収縮に大きく影響されるため、高剛性かつ軽量な主鏡支持構造が必要である。一般的に、この構造を構成する部材の数は数万に上り、部材の配置や断面積の組み合わせは無数に存在する。この中から上記の要求を満たす構造体を探索することは従来の構造設計では困難であり、コンピュータを用いた構造最適化を行うことが望ましい。この手法の天文学への応用例として、せいめい望遠鏡の開発が挙げられる。この開発では、架台の構造を GA により最適化した結果、軽量で高速に駆動する望遠鏡の構造の獲得に成功した [2]。

本研究では、構造解析ツール OpenSeesPy と進化計算フレームワーク DEAP を組み合わせ、ホモログ変形 (自重変形後も焦点は異なるが放物面を維持する変形) を考慮した最適化を実装した。評価用に作成した 2 次元パラボラ構造のモデルにコードを適用し、部材の配置・断面積の最適化を行った。その結果、仰角 30° と 90° の変形を考慮した多目的最適化では、鏡面誤差の最大値があらゆる仰角でアクチュエータで対応できる値 ($\lesssim 30\mu\text{m}$) になり、RMS $\lesssim 15\mu\text{m}$ を達成した。この開発により、さまざまな条件下での主鏡支持構造の最適化の研究を行う基礎が作られた。

1. Kawabe et al., SPIE Proc., 9906, 12, 2016
2. Kurita et al., PASJ, 72, 48, 2020

TES 型 X 線マイクロカロリメータのための超伝導磁気遮蔽シールドの開発 梶間 勇吹 (埼玉大学大学院 理工学研究科 M1)

X 線マイクロカロリメータは入射光子のエネルギーを素子の温度上昇で測る検出機である。今年度打ち上げ予定の XRISM 衛星に搭載されるマイクロカロリメータに使用されている温度計は半導体温度計だが、より感度のいい超伝導遷移端温度計 (Transition-Edge Sensor; TES) を用いることでエネルギー分解能だけでなく大面積化も実現できるため、将来衛星への搭載が決定している

TES 素子には素子表面への垂直方向からの磁場によって感度が悪化する性質が知られている。将来衛星では、大面積/広視野を実現するため、X 線が入射する開口面積を確保しつつ、検出器ステージでの磁場環境を整える必要がある。そこで、我々は独自に磁場を極低温下で遮蔽するための超伝導メッシュシールドを開発している。超伝導体である Nb を使い、Meissner 効果によって磁場の侵入を防ぐことを目的としている。また、ハニカム構造を取ることで強度を保ちながら開

口部分を確保、電磁界シミュレーションを用いて最適パラメータを計算している。

今回はメッシュピッチが 5 mm、線径 100 μm 、開口率 96.1 %の磁気遮蔽シールドを制作した。絶対温度 4 K に置いて、ホール素子と超伝導磁場印加コイルを用いて性能評価を行った。シールドなしの場合と比較して磁場強度を 7 割程度まで低減することができた。本講演では、極低温下での性能評価及び今後の磁気シールド製作方針についても報告する。

将来の太陽観測に向けた高精度 Wolter ミラーの開発研究

加島 颯太 (関西学院大学/宇宙科学研究所 M1)

太陽からの X 線は 100 万 K を超えるコロナから放射され、コロナ中の高温プラズマのダイナミックな振る舞いを捉えることができる [1][2]。

近年の衛星からの観測により、コロナ中の秒角スケールの細かい構造がコロナ中の活動現象の鍵を握る可能性が指摘されてきた [3]。また、例えば明るいフレアループ上空の暗い領域で進行する磁気リコネクションに伴うプラズマの直接加熱や超熱化の過程を捉えるには、低散乱での撮像観測が求められる。一方、このような高角分解能・低散乱の撮像観測を実現する X 線ミラーは、世界的に供給できない状況にある。そこで我々は将来の太陽 X 線観測に向けてこのような高性能 X 線ミラーを実現するための開発研究を進めている。

開発しているミラーは Wolter 光学面の回転放物面と回転双曲面を研磨によってガラス基板上に一体成型したものである。加工したミラーを Spring-8 放射光施設の平行 X 線ビーム (BL29XUL [4]) で評価し、結果を研磨工程にフィードバックすることで改善を図っている。これまでに、8 keV の平行 X 線に対して PSF (Point Spread Function) の FWHM 幅・HPD (Half Power Diameter) とも <1 秒角の性能を達成した。

講演では、この高精度 X 線ミラーの開発研究について紹介する。

1. Tsuneta, S., et al., PASJ 44 , L63-L69 , 1992
2. Tsuneta, S., et al., PASJ 44, L211-L214, 1992
3. Hara, H., et al., Ap. J. Lett. 678, L67-L71, 2008
4. Ishikawa, T., et al., Proc. SPIE 4145, 1-10, 2001

1.85 m 電波望遠鏡搭載受信機のさらなる高性能化に向けた開発

川下 紗奈 (大阪府立大学理学系研究科 修士 2 年)

我々の研究室では、野辺山宇宙電波観測所に設置している口径 1.85 m の電波望遠鏡を開発・運用してきた。この望遠鏡では、銀河系に存在する分子雲に対して主に CO を用いて広帯域観測を行っている。これまでに 230, 345 GHz 帯に存在する CO 同位体 6 輝線 ($J = 2 - 1, 3 - 2$) の同時観測を目指し、プロトタイプの広帯域マルチプレクサなどを用いてファーストライトに成功した [1]。現在は、マルチプレクサおよび受信機システムのさらなる性能向上に向けて改良を進めている。その開発項目として、(1) 受信機システムの低雑音化、(2) マルチプレクサの全ての出力に広帯域 SIS Mixer を接続すること、(3) 両偏波化の 3 つを挙げている。

低雑音化に関して、マルチプレクサは3つのダイプレクサからなる回路であり、現在搭載しているプロトタイプでは3つの異なるブロックでダイプレクサを製造している。そのため、回路的に不要な線路長が存在し、この不要な線路による損失は回路全体の挿入損失の40%程度を占めている。そこで我々は、受信機の低雑音化のために一体型マルチプレクサの開発を進めている。現状では、不要な線路を30 - 50%程度削減した設計が得られている。

また、現在の受信機において230 GHz帯では、IF帯域が4 - 8 GHzのSIS Mixerを用いて周波数変換を行なっている。今回、さらなる広帯域化として、我々の観測周波数帯に最適化した、RF帯域210 - 375 GHzにおいて広帯域IFを持つSIS Mixerを230, 345 GHz帯の両方に搭載することを検討している [2]。まず初めの段階として、この広帯域 mixer の実験室評価を進めており、その後は試験的に現在の受信機システムへの載せ替えも検討している。両偏波化に関しては、広帯域な円偏波分離器の開発を進めており、円偏波分離器を構成する各回路では良い特性が得られている。本講演では、上記の一体型マルチプレクサや広帯域 SIS Mixer 受信機の開発状況について報告する。

1. S.Masui et al., Publications of the Astronomical Society of Japan, vol.73, pages1100-1115, year2021
2. 小嶋崇文, 他, 「RF 211-373GHz 帯広帯域 IF SIS ミキサの試作」, [日本天文学会 2021 年秋季年会]

CMOS イメージセンサ IU233N5-Z の X 線性能評価と偏光検出の可能性 榎木 大修 (広島大学 M2)

X 線やガンマ線の偏光観測は高エネルギー天体の放射機構などを探る重要な手段の一つである。しかし X 線やガンマ線の偏光観測は難しく、観測例が乏しい。本研究は CMOS イメージセンサとシンチレータ検出器を用いることで X 線やガンマ線の偏光観測の可能性を探ることを目標としている。

CMOS イメージセンサは CCD などと比べて空間分解能が優れた検出器である。CMOS の感度は可視光から X 線であり、ガンマ線の感度はあまりない。それに対してシンチレータ検出器はガンマ線に感度はあるが空間分解能はないという特徴がある。しかし、近年数 μm と優れた空間分解能を持つシンチレータが研究されている。これらを組み合わせ X 線・ガンマ線の散乱や吸収の電子飛跡を検出することができれば、X 線・ガンマ線の偏光を検出が期待できる。

本研究では、他の CMOS 検出器と比べると安価で、オプティカルグリスを直接塗るなど様々なことを試しやすい、SONY 製の CMOS イメージセンサ IU233N5-Z を用いた。IU233N5-Z は検出面がおおよそ $1\text{mm} \times 2\text{mm}$ でピクセルサイズが $1.12\mu\text{m} \times 1.12\mu\text{m}$ の可視光用のセンサである。IU233N5-Z 単体に ^{55}Fe 線源を用いての X 線性能評価を行い、Mn-K α と Mn-K β を検出できた。また、IU233N5-Z の検出面に微細構造を持たない CsI(Tl) シンチレータを取り付けて ^{137}Cs の 662keV ガンマ線の検出を行った。線源の有無で取得した画像の輝度に変化が見られたことから、CMOS でシンチレーション光を検出できることを確認できた。本講演ではこれらの結果について報告する。

テラヘルツ強度干渉計の光学システムおよび読み出し回路の開発

小関 知宏 (筑波大学数理物質科学研究群物理学学位プログラム M2)

我々の研究グループでは、中国紫金山天文台と協力して南極ドーム A で大気透過スペクトル測定を行い電離窒素、2 階電離酸素の輝線を含む帯域に大気の窓が存在しており、テラヘルツ領域の観測が地上から観測可能であることを確認した [1]。この領域を観測する手段として、テラヘルツ強度干渉計を提案し開発を進めている。現在開発しているテラヘルツ強度干渉計は 2 素子強度干渉計であり、周波数 500GHz、口径 76.2mm、基線長 10 – 50cm である。本干渉計の特徴は、SIS 光子検出器を用いた広帯域・高速読み出しによる遅延時間測定である。SIS 光子検出器は 0.8K で低リークの信号読み出しが可能となり、約 300M Ω の出力抵抗を持っている。このため信号を後段の広帯域増幅器に接続するためのソースフォロワー回路の開発が必要である。冷却性能制限の消費電力 100 μ W で動作し、出力抵抗が 3.4k Ω まで下げることの可能である 0.8K 動作のソースフォロワー回路を開発した。4K ステージでは消費電力 10mW 以下で動作し、出力抵抗をさらに下げることが可能である GaAs HEMT を候補として IV 特性、ゲートリークの評価を進めた。その結果、出力抵抗を 100 Ω 以下まで下げることができ、SIS 光子検出器 の高速信号読み出しによる実現が可能である。本講演では、テラヘルツ強度干渉計にむけた実証実験を目的とした強度干渉計実験の光学システムの概要を示し、広帯域かつ低雑音の読み出し回路の開発の現状と今後の開発計画を報告する。

1. Hiroshi Matsuo, Sheng-Cai Shi, Scott Paine, Qi-Jun Yao, Zhen-Hui Lin. 2019. Terahertz Atmospheric Windows for High Angular Resolution Terahertz Astronomy from Dome A. Advances in Polar Science

受光面積向上を目指した超伝導転移端型 X 線マイクロカロリメータ Au マッシュルーム型吸収体の開発

宮川 陸大 (東京大学/JAXA 宇宙科学研究所 修士 2 年)

宇宙を構成するバリオンのうち未検出であるダークバリオンの一部は、数値シミュレーションにより、銀河団同士を繋ぐ 10^5 - 10^7 K のガス (Warm-hot intergalactic medium; WHIM) として分布することが示唆されている [1], [2]。WHIM は電離酸素の組成比が最も大きい [3] ため、電離酸素の輝線吸収線の直接観測により WHIM の空間分布を明らかにできる。広範囲な観測のためには、高いエネルギー分解能で広い受光面積を持つ検出器を搭載し、かつ広視野な X 線天文衛星が要求される。

我々は、極低温 (~ 100 mK) で数 eV と高いエネルギー分解能を誇る検出器である超伝導転移端 (Transition Edge Sensor; TES) 型 X 線マイクロカロリメータ (TES カロリメータ) の開発を進めている。TES カロリメータは、入射 X 線光子による素子の温度上昇を超伝導転移端の急峻な抵抗変化を利用して測定する検出器である。衛星の搭載に向けては大きな有効面積と高い開口率が要求され、デッドスペースを覆うために、TES と柱で繋がった笠状の吸収体 (マッシュルーム型吸収体) の開発が進められてきた。しかし、マイクロマシニングでの立体構造製作は難しく、笠部分が垂れ

るなどの問題点があった。我々は今回、熱伝導率が良い吸収体を成膜可能な電解析出法を用いて、面積 $260 \times 260 \mu\text{m}^2$ 、厚み $\sim 2 \mu\text{m}$ 、柱直径 $12 \mu\text{m}$ で $3 \mu\text{m}$ 程度の高さの中空構造をもつ Au マッシュルーム型吸収体の形成を実現した。X 線天文衛星への搭載を目指したマッシュルーム型吸収体を持つ TES カロリメータの開発について報告する。

1. Renyue Cen and Jeremiah P Ostriker, *The Astrophysical journal*, vol.514, No.1 pp. 1-6, 1999.
2. Renyue Cen and Jeremiah P Ostriker, *The Astrophysical journal*, vol.650, No.2 pp. 560-572, 2006.
3. Joel N Bregman, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol.45, No.1 pp. 221-259, 2007

GEO-X 衛星に向けた迷光防止用コリメータの開発 村川 貴俊 (東京都立大学宇宙物理実験研究室 M1)

我々は地球磁気圏 X 線撮像に向けた超小型衛星 GEO-X(GEOspace X-ray imager)[1] に搭載する軽量の X 線望遠鏡の開発を進めている。300 μm 厚の Si ウェハに、幅 20 μm の微細穴を同心円状に形成し、その側壁を反射面として利用する。水素アニールにより壁面を平滑化し、塑性変形により基板に曲率を持たせる。そして側壁に重金属を膜付けした上で、曲率の異なる 2 枚の基板を重ねることにより、WolterI 型望遠鏡とする。

GEO-X では磁気圏撮像のため広視野 ($5 \times 5 \text{ deg}$) で月付近の高度からの観測を行う。主要なターゲットには、磁気圏のバウショック、マグネトシース、カスプといった領域があり、特にカスプは視野 1 つ分外側に地球が位置する。よってカスプ観測の際、昼側の地球からの太陽 X 線散乱の迷光を気にする必要がある。昼地球の X 線フラックスは明るい X 線源として知られる Crab Nebula の約 10 倍であり、無視できない。

そこで望遠鏡前にコリメータを設置することで迷光を遮ることを検討している。曲面微細穴の加工技術を応用し、Si 基板に穴を開けた平板の板をコリメータとして利用する。[2] そこでまず光線追跡シミュレーションを用いてコリメータ透過率の角度依存性を見積もった。厚み 300 μm 、穴幅 30 μm 、梁幅 10 μm の穴とするとコリメータ角度は約 6 deg となる。このコリメータを導入すれば、予定している軌道で離角 7° で S/N 比が 10 以上を確保できるため、迷光対策に有効だと分かった。

そこで我々は実際にコリメータの試作を企業と共に行った。更に製作したコリメータの X 線評価を宇宙科学研究所 5 m ビームラインにて実施した。結果、コリメータに対して垂直に入射した際に透過光強度は最大となり、コリメータをビームに対して回転すると透過光が弱くなって、約 5.8 deg でコリメートされるプロファイルが得られた。本講演では、これらのコリメータの設計と製作、評価について報告する。

1. Y.Ezoe, et al., 2018 J.Astron.Telescope Instrum, 4 046001
2. K.Ishikawa, et al. 2022, Proc. SPIE, in press

可視光測光望遠鏡 CAT を利用した増光検知システムの構築

根本 登 (中央大学 M1)

中央大学では恒星で起こるフレア現象、特に恒星で生じる最も規模の大きいフレアがどのような構造で如何に起こるかについて研究している。恒星フレアでは太陽の様にイメージングが行えないため、多波長による状況証拠でイメージングに近いレベルのデータを得る必要がある。そのために我々は中央大学後楽園キャンパスに中央大学天文台 CHAO を設置し、全天 X 線観測装置 MAXI による観測であらかじめ大きなフレアを起こすとわかった天体に対して多波長でのモニター観測を行っている。中央大学天文台 CHAO ではフレアの発生機構に迫るため可視光測光望遠鏡 CAT、可視光分光望遠鏡 SCAT、可視光測光分光望遠鏡 PHAST の 3 台の望遠鏡を運用している。CAT は市販の 2.6 m ドームと口径 26 cm、焦点距離 3000 mm の望遠鏡で構成され、現在は B,V,R,I フィルター、冷却 CCD カメラを用いて可視光測光観測を行っている。視野は 50x35 分角程度で、限界等級は 15-16 等級程度である。これを利用しモニター観測中にフレアが生じた場合に最短 3 分で他の望遠鏡と連携し、同時に測光観測と分光観測を行うことを考えている。そのために CAT での観測直後にリアルタイムで解析を行い、増光を判断し即座にアラートを発信するシステムを構築することを考えている。現在は全自動で FITS ファイルの新規作成を検知し、検知後 40 秒以内にアストロメトリ、サチレーション確認、一次処理、開口測光、等級計算までを行うシステムの構築までが完了している。今後は即時解析の結果から増光を判断するシステムと増光時にメールで知らせるシステムを作成することで、他の観測装置からも即座に追観測を行う予定である。また、CHAO 内の望遠鏡全てに同様に増光検知システムを設けることで、CHAO 内の望遠鏡において相互に追観測を行えるシステムを構築していく予定である。

南極テラヘルツ強度干渉計の試験観測に向けた 1.5 THz 光子検出器の開発

丹羽 綾子 (筑波大学/国立天文台 D1)

現在、電波天文学における高分解能観測ではヘテロダイン干渉計が大きな成果を挙げているが、1 THz 以上の高周波帯域では未だ現実のものとなっていない。その主な理由は、水蒸気による大気透過率の低下と、ミキサ素子の感度低下の 2 点である。我々は 1 THz 以上の帯域で高感度を発揮するテラヘルツ強度干渉計による高分解能観測を提案し、スペースでの実現も視野に開発を進めている。その初運用として、本研究では 1.5 THz に大気の窓が確認されている [1] 南極新ドームふじ基地でのテラヘルツ強度干渉計の試験観測を目指して光子検出器の開発を行う。

テラヘルツ強度干渉計は、光子を高速で読み出すことで得られる光子バンチの情報から遅延時間を測定し、開口合成を行う。よって、1 GHz での読み出しに向け、応答速度の速い SIS を直接検出器として使用する。SIS は厚さ 10 nm 程度の薄い絶縁膜を超伝導体で挟んだ構造のジョセフソン接合で、本研究では Nb/Al/AlO_x/Al/Nb の組み合わせで使用する。ここで問題となるのは、SIS の絶縁膜を通るリーク電流である。光子バンチの測定は光子電流の微小な強度ゆらぎの測定によって行われるため、リーク電流は 1 pA 以下に抑えなければならない。そのため、本検出器は SIS を直径 1 μm と非常に小さくし、波長程度の大きさの平面アンテナに結合して使用する。平面アンテナや、

それと SIS を繋ぐ伝送線路を形成するグラウンドプレーンは、SIS の超伝導体と同じ金属で作られることがほとんどである。しかし、ギャップエネルギーより高い周波数では伝送線路でのクーパー対破壊による損失が大きく、アンテナ結合型の SIS による光子検出の例はまだない。本研究では、抵抗率の低い Al をグラウンドプレーンに使用し、Nb のギャップエネルギーよりも高い周波数である 1.5 THz での光子検出を試みる。本発表では、検出器の製作に向けて行ったアンテナや伝送線路の設計と、SIS 接合の試作結果について報告する。

1. Hiroshi Matsuo et al., *Advances in Polar Science* 30, 76, 2019.

太陽アクシオン探査に向けた TES カロリメータの開発と評価 太田 瞭 (東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻 M1)

宇宙物質の 85% を占め、宇宙の大規模構造形成に関与しているダークマターの候補がアクシオンである。アクシオンは磁気双極子遷移をもつ ^{57}Fe の共鳴吸収により反応することが提唱されている [1]。

そこで我々は太陽アクシオン観測を目指して、 ^{57}Fe を吸収体とする超伝導転移端型 (TES: Transition Edge Sensor) マイクロカロリメータ (TES カロリメータ)[2] の開発を行っている。TES カロリメータは、数 100 μm 角の ^{57}Fe 吸収体+TES を 100 mK 程度に冷却し、小さな熱入力を温度上昇として検出する。TES カロリメータ自体は Si ウェハ上に Ti/Au 二層の 100 nm 程度の薄膜を成膜し、マイクロプロセスで配線等を形成し、 ^{57}Fe は電析で成膜する。素子の評価は、膜厚の測定と、チップを 100 mK 以下に冷却し抵抗値の温度依存性から超伝導転移温度を測ることで行っている。TES カロリメータの動作温度は TES の転移温度によって決まるため、より低雑音となる低い温度で転移する TES の製作を短期的な目標としている。TES の転移温度は、超伝導金属に対する常伝導金属の膜厚比に依存して転移温度が低下する近接効果により制御が可能となる。我々の研究グループでは、Ti に対し Au の膜厚を変えることで転移温度を制御している。しかし昨年度導入した TES 成膜用の蒸着装置において、チャンバーの真空度、蒸着ターゲットの量や状態、その他未知の条件により、Ti/Au の膜厚及びそれに伴う転移温度が大きく変化するため制御が難航している。再現性のある安定した高分解能性能を持つ素子を開発するため、この原因の究明と対応を様々な条件を評価することで行っている。本講演では、太陽アクシオン探査に向けた TES カロリメータの開発と評価の現状について詳説する。

1. Moriyama, S., 1995, *Phys. Rev. Lett.*, 75. 3222-3225.
2. Konno, R., et al. 2019, *Journal of Low Temperature Physics*, 199:654-662.

X線イベント検出シミュレーターを用いた検出器内処理・解析処理による時刻解析への影響の見積もり

塩入 匠 (埼玉大学宇宙物理実験研究室 M1)

天文学がターゲットにしている天体の中には、中性子星パルサーのように、変光の周期といった時間的情報が天体の性質に直結し、正確な時系列解析が求められているものがある。特に、ミリ秒パルサーなどのような非常に速い明滅をする天体の観測も科学目標に置く X 線衛星には、非常に高い時刻決定精度が要求されている。

天体の時系列解析に影響を与える要素には、デッドタイム等の搭載機器に起因するものと、地食や SAA 削除等のオフライン解析で生じるものなど様々ある。検出器の設計段階における時刻精度要求の確認や、稼働後の時刻較正による精度向上には、これらの要因を定量化することは重要である。しかし、これらを実験的に見積もるのは、現実的には非常に困難である。

そこで本研究では、検出器や解析時の時刻処理を忠実に再現する光子イベントシミュレーターを新規に開発し、これらの効果を定量化した。

本講演では、本研究で作成したシミュレーターの仕様とその結果、及び今後の展望について述べる。

弾性体モデルを用いた画像データ同士の滑らかで高精度な接続手法の研究

杉津 萌 (京都大学 理学研究科 M1)

天文衛星による広域サーベイ画像や月面撮像画像などの天文画像の作成の際には、撮影領域をいくつかの小領域ごとに分けて撮影し、繋ぎ合わせて 1 枚の広範囲の画像を取得する。このとき取得された小領域の各画像データ (要素データ) 上には主に 3 種類の誤差が発生している。それは、(1) 観測機器の校正不足や測定方法のくせなどにより生じ、測定ごとに一定の傾向を持つ系統誤差、(2) 測定ごとに偶然に生じ、一定の傾向を持たない偶然誤差、(3) 測定の間温度や湿度などの環境が連続的に変化することにより生じるドリフト誤差、である。要素データ同士を接続する際には、従来、重複領域に対して加重平均をとる接続手法や、最小二乗法による接続手法がとられてきた。しかし、これらの手法ではドリフト誤差を処理しきれず、接続されて出来た画像データ (全体データ) には不自然な段差が生じる。

この問題点を解決するために、要素データ上に存在するドリフト誤差を、変形が可能な弾性体の梁または板としてモデル化した。そして、重複領域で要素データ同士の画素値が一致し、かつ変形による弾性体エネルギーが最小となるという条件の下で弾性体同士を接続し、ドリフト誤差を校正する手法を開発した。要素データ同士の接続計算の際には、梁モデルの場合には Euler-Bernoulli の梁理論に基づいた梁状のメッシュを、板モデルの場合には Kirchhoff-Love の仮定に基づいた板状のメッシュを要素データからそれぞれ作成し、有限要素法を用いて計算を行った。

結果として、梁モデルを用いて作成した全体データについて、加重平均をとり接続して作成した全体データと比較し、不自然な段差がなく滑らかに接続されることを確認した。また、板モデルによる接続手法の開発も現在行っている。本講演では上記のデータ接続手法の紹介と、いくつかの要

素データを用いた接続結果について議論する。

全天 MeV ガンマ線観測衛星 AMEGO におけるコンプトン再構成アルゴリズムの研究

末岡 耕平 (広島大学 先進理工系科学研究科 M2)

全天 MeV ガンマ線観測衛星 AMEGO は、2030 年頃の打ち上げを目指しており、2.5 sr の広い視野や数 100 keV から数 GeV の広いエネルギー帯域、高い偏光感度でガンマ線観測を行うことができる。そのため、AMEGO は極限宇宙現象の理解やマルチメッセンジャー天文学の進歩に大きく寄与することが期待されている。

AMEGO が数 100 keV から数 MeV のガンマ線観測を行う場合、両面シリコンストリップ検出器を 60 層に積み重ねた Tracker においてコンプトン散乱を生じさせ、散乱したガンマ線を CZT 半導体検出器からなる Calorimeter で捕獲する。そして、ガンマ線が検出器と反応する際に落としたエネルギーとその位置から、入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を求めることができ、この過程をコンプトン再構成と呼んでいる。

本研究では、AMEGO によるガンマ線バーストのガンマ線偏光観測を検討することを目的として、数 100 keV から 1 MeV における AMEGO のコンプトン再構成の検討を行っている。数 100 keV から 1 MeV で特に強い放射が生じるプロンプト放射のメカニズムは未だ解明されていないが、AMEGO の偏光観測により明らかになると考えられる。そこで、粒子と物質の相互作用をシミュレートするためのツールキットである Geant4 を用いてガンマ線と AMEGO 検出器の相互作用を模擬し、コンプトン再構成を行うためのアルゴリズムを「ひとみ」衛星 SGD の方法を参考にして構成しつつある。このとき、コンプトン散乱が複数回生じる場合についても考慮している。

現在は、コンプトン散乱が生じた際に検出器の外へ飛び出す入射ガンマ線や、発生する蛍光エックス線や電子の処理などを行うことによって、アルゴリズムの性能を向上させている。本講演では、コンプトン再構成アルゴリズムの現状について報告する。

GEO-X 衛星に向けた MEMS X 線望遠鏡への原子層堆積法を用いた Pt 成膜 辻 雪音 (東京都立大学 理学研究科物理学専攻 M1)

我々は MEMS 技術を用いた X 線望遠鏡の開発を進めている。直径 10 cm、厚さ 300-500 μm の Si 基板にドライエッチングで微細穴を開け、側壁を反射面とする。反射面を平滑化し、両端の盛り上がり研削研磨で取り除いた後、高温塑性変形により基板全体を球面にする。その後 Pt の薄膜を付け、反射率を向上する [1]。これまで、原子層堆積法 (ALD : Atomic Layer Deposition) を用いた曲板 MEMS X 線光学系の反射面全面への Pt 成膜に成功した [2]。ALD は異なる気体を交互に導入することで原子層 1 層ずつの成膜を行う手法である。なかでも PEALD (Plasma Enhanced ALD) はプラズマ状態とすることで反応性を高め、平滑性の良い膜が成膜できる [2]。

我々は本望遠鏡を 2020 年代前半の打ち上げを目指す地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X に向けて開発しており、新たに望遠鏡となるフルウェハに PEALD による Pt 成膜を行った。膜はバッ

ファー層となる Al_2O_3 10 nm 厚の上に Pt 膜 20 nm を積んだものであった。原子間力顕微鏡の評価より表面粗さは 1 nm rms @ 10 μm と見積もられ目標を満たす平滑な成膜ができた。一方で、望遠鏡の鏡となる Si 微細穴の側壁の一部にはしみのような構造が見られた。このしみ状構造は、その形状からおそらく望遠鏡基板上のフォトレジストの除去に用いるアッシングプロセスで、微細穴の壁同士が張り付くことで生じていると予想しており、プロセス時間の分割で対応可能である。我々は現在、透過型顕微鏡とイオンビームによる検査を予定しており、膜の付き方を確かめて対策を講じる。

本講演では、MEMS 望遠鏡への原子層堆積法を用いた成膜と膜質向上に向けた開発について報告する。

1. Ezoe et al.,2010,MST,16,1633
2. Ishi et al.,2020,APEX,13,087001

中央大学 40cm 可視光望遠鏡の恒星フレア自動追観測システムと分光性能 浦部 蒼太 (中央大学 M1)

太陽フレアは磁力線の再結合によるエネルギーの解放現象であると考えられている。太陽以外の恒星では、放射エネルギーが太陽フレアよりも桁違いに大きいフレア (巨大恒星フレア) が検出されているが、それらが太陽と同様のモデルで説明できるかは明らかでない。太陽ではフレアのごく初期、ガスの運動に由来する彩層輝線のドップラーシフトや可視連続光の増光が観測されている。巨大恒星フレアにおいても、発生初期における彩層輝線や可視連続光の描像を捉えることが、大規模なフレアがどのように発生するかを理解する上で重要である。しかし、突発現象であるフレアの観測は偶然に頼る部分が大きく、発生頻度の低い巨大恒星フレアを発生初期から観測することはなおさら困難であった。

そこで我々は、サーベイ観測を行う装置と連携してフレアの追観測を行い、効率よく分光データと測光データを収集することを考えた。

そのために我々は、中央大学後楽園キャンパス屋上に 40 cm 可視光測光・分光望遠鏡 PHAST(PHOTometric And Spectroscopic Telescope) を設置し、全天 X 線監視装置 MAXI が巨大恒星フレアを検出した旨のメールをトリガーとして自動追観測を開始するシステムを構築した。これにより、メール受信後 2 分以内の撮像開始が可能となった。測光観測には U、B、V、R、I バンドのフィルターと Ximea 社の CMOS カメラ MJ042MR-GP-P11-BSI を使用している。分光観測には Shelya 社の高分散分光器 LHIRES III と、ATIK CAMERAS 社の冷却 CCD カメラ ATIK 460EX を使用している。また、分光性能の評価を行い、 $\text{H}\alpha$ 線付近の波長分解能は 19000 で、波長決定精度が 0.2 Å であると分かった。

MEMS 技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発

山口 和馬 (東京都立大 理・物理 M1)

我々は次世代の X 線天文衛星や惑星探査衛星を目指して独自の超軽量 X 線望遠鏡を開発している。X 線は地球大気で吸収されるため衛星観測が基本となる。従来の望遠鏡は角度分解量と重量においてトレードオフ関係があった。これに対して我々はマイクロマシン (MEMS) 製作技術を用いて、薄い Si 基板に微細穴を開け、側壁を様々な手段で平滑させ、全反射鏡として利用する。基板は高温塑性変形で球面に曲げて集光系とし、側壁には原子層堆積法で Pt 等を膜付けして反射率を高める。本手法は我々独自のものであり、原理的に世界最軽量となる。我々は、インハウスにより製作した試作品で世界初の反射結像に成功してきた (Ezoe et al. 2010 *Microsys. Tech.*, Ishi, et al. 2020 *APEX*, Fukushima, et al. 2022 *Opt. Express* など)[]。本望遠鏡は原理的に高角度分解能で世界最軽量を實現でき、2 枚の基板を重ねることで Wolter I 型の斜入射光学系となる。その軽量性から JAXA 宇宙科学技術ロードマップの「獲得すべきキー技術」にも選出された。本講演では X 線望遠鏡の原理及び開発の現状について紹介する。

1. Y. Ezoe, et al., *Microsys. Tech.*, 16, 1633, 2010
2. D. Ishi, et al., *Appl. Phys. Express*, 13, 087001, 2020
3. A. Fukushima, et al., *Opt. Express*, in press

水チェレンコフ検出器アレイによる最高エネルギー宇宙線観測

難波宏樹 (京都大学宇宙線研究室 M1)

我々の目標は宇宙から飛来する宇宙線の起源を探ることだ。この目標を達成するために我々は宇宙線、なかでも高エネルギーがゆえに磁場による影響を受けづらく地球へほぼ一直線で飛来する最高エネルギー宇宙線に焦点を当てて観測を進めている。しかし、これまでの観測では最高エネルギー宇宙線は到来数が少なく、十分な統計量が得られていないという問題点がある。統計量を増やすために 3000 km² の面積を持つアルゼンチンのピエールオージェ観測所を中心に観測が進んでいる。ピエールオージェ観測所では 1.5 km 間隔で 1600 個配置された水チェレンコフ表面検出器及び空気シャワーで発生する蛍光を観測する大気蛍光望遠鏡のハイブリッド観測を行っている [1]。現在ではケンタウルス座 A といった近傍の活動銀河核や星形成が非常に活発な銀河などが、宇宙線過剰領域と重なっているため到来起源候補に挙がっているが、統計量不足のために解析がそれほど進んでいない段階であり、これからの観測データの解析による新発見や新たな解析の余地が多く残されている。本講演では、ピエールオージェ観測所における最新の成果について報告し、さらには検出器アレイの動作原理の理解のために自作した水チェレンコフ検出器による測定結果についても補足する。

1. A. Coleman et al, Ultra-High-Energy Cosmic Rays: The Intersection of the Cosmic and Energy Frontiers, arXiv:2205.05845, 2022

ミリ波補償光学 (MAO) の実現に向けた波面センサの開発と実証

中野 覚矢 (名古屋大学 博士前期課程 2 年)

本研究では、ミリ波補償光学 (MAO) のために開発したプロトタイプ波面センサの性能評価の結果を報告する。MAO は Large Submillimeter Telescope (LST) [1] や Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope (AtLAST) [2] といった次世代の大口徑電波望遠鏡を実現させる上で重要な要素の 1 つである。しかし、 $\sim 10 \mu\text{m}$ の精度でアンテナの変形をリアルタイムで検出する技術は確立されておらず、MAO 実現の障害となっている。そこで、我々はアンテナ主鏡面上の 1 点から望遠鏡の受信機までの電波経路長を測定する波面センサを開発した [3]。2 素子のプロトタイプ波面センサを野辺山 45 m 電波望遠鏡に搭載し、実証実験を行った。実験では鏡面中央 (アンテナ中心から 5 m) と鏡面端 (アンテナ中心から 16 m) に波面センサを取り付けた。鏡面中央-受信機間と鏡面端-受信機間の電波経路長を 20 Hz 間隔で交互に測定し、両者の差を取ることで超過経路長 (EPL) を得た。EPL のパワースペクトル密度からアンテナの変形成分を分類すると、低周波数領域で卓越する $1/f^n$ に比例する成分、特定周波数にピークを持つ振動成分、白色雑音の 3 つに分けられた。また、強風時に白色雑音に対する $1/f^n$ 成分・振動成分の強度が増加するため、これらは風による変形に由来する成分だと考えられる。そして、白色雑音からは超過経路長の統計誤差は $\sim 8 \mu\text{m}$ と得られた。8 μm は LST や AtLAST で目標とする鏡面精度 ($\sim 20\text{--}40 \mu\text{m}$ r.m.s.) に対しても有意な値であり、MAO における我々の波面センサの実用性を実証した。

1. Kawabe et al., SPIE, **9906**, 990626, 2016
2. Klaassen et al., SPIE, **11445**, 114452F, 2020
3. Tamura et al., SPIE, **11445**, 114451N, 2020

6.5–12.5 GHz 帯同軸導波管変換の開発と TRL 校正

抱江 柊利 (大阪公立大学大学院 電波天文学研究室 修士 1 年)

同軸導波管変換器とは、伝搬モードが異なる同軸線路と導波管をそれぞれの適切な伝搬モードに変換する接続回路素子のことを指す。ゆえに伝送経路である同軸線路と導波管では、それぞれの特性インピーダンス Z が異なるため両者の整合を取る必要がある。そこで導波管内に同軸線路の芯線をプローブとして挿入し電磁界を誘起させ、また導波管内にリッジ構造を作ることで導波管 ($Z \approx 300 \Omega$) から同軸 ($Z = 50 \Omega$) へのインピーダンスの整合を行う工夫が取り入れられている。現在、茨城大学が整備・運用を行なっている 2 台の日立・高萩 32 m 電波望遠鏡では、6.7 GHz メタノールレーザーの観測が行われている。近年、新しく 6.2、7.6、7.8、12.2 GHz メタノールレーザーが初観測された。[1] ここで上記レーザーの同時観測にあたって、受信機を広帯域化する必要があり、それに伴い、比帯域限界の 66% に近い 6.5–12.5 GHz (比帯域 : 63%) で、規格サイズではない導波管の広帯域同軸導波管変換の製作を試みた。導波管内にあるリッジは、インピーダンス整合において重要な役割を果たすため、各段の長さや幅、高さを調節する必要があった。また特にリッジの背面と導波管との間の構造では特性が変化しやすく、損失を少なく同軸モードに変換しなければならない

ので、10 μm 単位で調節する必要があった。結果、反射損失として 6.47–12.93 GHz(比帯域 :66.5%) において、-30 dB 程度の結果を得ることができた。また、これを用いた TRL 校正にて位相遅延器の実測をおこなった。TRL 法では、反射板とラインのみで測定できるが、SOLT 法ではそれらに加えて終端が必要となる。今回の導波管は規格外なので、TRL 法を用いれば終端を新たに作る必要がないという利点がある。講演では、同軸導波管変換のシミュレーション、並びに実測との比較、また TRL 校正を用いた位相遅延器の実測とシミュレーションとの比較、SOLT 校正との比較についても述べる (本研究は JSPS 科研費 JP21H01120 の助成を受けたものである)。

1. Breen et al. 2019, MacLeod et al. 2019

水沢 VERA20 m 望遠鏡への搭載に向けた 90° Hybrid Coupler・Power Divider の開発

亀山 晃 (大阪公立大学 修士 1 年)

東アジア VLBI ネットワーク (The East Asian VLBI Network; 通称 EAVN) は、日本・韓国・中国を初めとする東アジア各国の約 20 局の電波望遠鏡を合成し、この地域で一つの巨大な VLBI ネットワークを構築する国際プロジェクトであり、最大直径 5,100 km に及ぶ世界最大級の電波望遠鏡ネットワークである。86 GHz 帯は M87 をはじめとする近傍の活動銀河ジェット天体において、ブラックホールシャドウに迫るスケールでジェットの付け根を観測するのに最適な周波数領域と考えられている。

現在、我々は水沢 VERA20 m 望遠鏡に搭載する 86 GHz 帯の受信機開発を進めている。搭載する受信機は、Low Noise Factory 社の冷却アンプを用いた 67-116 GHz 帯の円偏波受信機を検討している。本研究では 67-116 GHz 帯の信号をダウンコンバートする常温 2 side band (2SB) Mixer の開発を進めている。2SB Mixer は、RF 信号と LO 信号を DSB Mixer に入力することで、LO 信号より低周波側 Lower Side Band(LSB) と高周波側 Upper side Band(USB) の 2 つの帯域に分離することができる受信方式である [1]。近年開発されている常温 Mixer の IF では、25 GHz を超える IF を出力することから 67-116 GHz の信号を一度の観測で取得できる可能性がある。これらの検証を行うために、2SB 回路の RF 系・LO 系の 2 分配化に使用する導波管型の 90° Hybrid Coupler、同位相 Power Divider の開発を進めている。この開発により、86 GHz 帯でモニター可能な高感度・高解像度 VLBI アレイの構築を EAVN で実現できる。そして、ジェット生成における最重要パラメータ (初速度、加速度、磁場、スピン) を決定し、駆動理論が確かめられる [2] 本講演では、2SB mixer を構成する 90° Hybrid Coupler と Power Divider の設計について述べる。

1. P.Yagoubov et.al., "Wideband 67-116 GHz receiver development for ALMA Band 2", Astronomy Astrophysics, vol.634 A46, 2020
2. 秦 和弘, 超高解像度電波観測で探る巨大ブラックホールジェット, 天文月報, 第 110 巻 第 11 号 771 ページ, 2017 年

次世代 X 線天文衛星用 SOI ピクセル検出器の評価システムの構築

河邊 圭寿 (近畿大学 M1)

我々は、次世代 X 線天文衛星 FORCE の搭載に向けて X 線ピクセル検出器「XRPIX」の開発を行っている。「XRPIX」は、SOI (Silicon-on-insulator) 技術を用いて、X 線に感度を持つ Si センサ層・絶縁層・信号電荷を読み出す Si 回路層を一体化させた X 線 CMOS イメージセンサである。近畿大学で「XRPIX」の評価実験を行うため、我々は実験システムを構築した。実験中、XRPIX に正常に電圧がかからない不具合が発生したが、これは素子の取り扱いの問題でボンディングワイヤ同士の接触や断線が起きていたためだった。素子の扱い方を見直し、手順書などを確立した。また、ノイズが時間変動していることを確認したため、ノイズカットトランスを導入した。さらに動作条件の最適化も行なった。「XRPIX」では、X 線光子の入射で生成されるアナログ信号が前段アンプを経て、ADC(Analog-to-Digital-Converter) でデジタル信号へと変換される。前段アンプと ADC の出力オフセット電圧はそれぞれの可変抵抗を用いて調整する。出力オフセット電圧は「XRPIX」素子のエネルギー分解能に影響を与えることがわかった。そこで可変抵抗値を調整し、エネルギー分解能が最も良くなる動作条件を調査した。

45m 電波望遠鏡搭載観測用準光学型周波数フィルターの開発

野曾原千晟 (大阪公立大学修士課程 1 年)

長野県野辺山には口径 45m の電波望遠鏡が設置されている。その望遠鏡では 43/86GHz 帯の電波を同時観測するシステムが採用されており、そのシステムを達成する上で重要な役割を担っているのが周波数分離フィルターだ。電波が反射される過程で周波数分離フィルターによって各々の周波数帯に分けられ、受信機に送信されることで、異なる周波数帯を同時観測することが可能となっている。我々は野辺山 45m 電波望遠鏡において 22、43、86 GHz 帯 VLBI 同時観測システムを構築すべく、22/43 GHz 帯及び 43/86 GHz 帯準光学型周波数分離フィルタの開発を行ってきた。[1] 22/43 GHz 帯分離フィルタの電気的性能については設計通りの結果が得られており、45m 電波望遠鏡単体での観測に成功している。

しかしそのスケールモデルである 43/86 GHz 帯分離フィルタについての性能評価は未完了であった。そこで本研究では、67–117 GHz 帯フリースペース測定を構築し、シミュレーションとの比較を行った。

本フィルタで特に重要となるパラメータは、斜入射における透過特性である。なぜなら 86 GHz 帯受信機の雑音上昇に大きく起因するからである。そこで電磁界解析ソフトを用いて、周期的境界条件を仮定した単位構造に平面波を 30° で入射した時の透過特性を計算した結果、80–90 GHz において -0.2 dB 以上という結果が得られた。この結果と比較するために、VNA、Extender、コルゲートホーン、誘電体レンズで構築されるフリースペース測定系を構築した。ビームウェストにフィルタを設置し、入射角 30° での状態で透過特性を測定した。本講演では上記の詳細な結果について報告し、シミュレーションとの相違について議論する。

1. 岡田他、2018 春季天文年会