

觀測機器

1 超精密加工による近赤外線面分光装置の開発

河野 志洋 (東京大学天文学教室 M2)

我々の研究グループでは東京大学アタカマ天文台 (TAO) プロジェクトがチリのチャナントール山に建設、計画中の 6.5m 赤外線望遠鏡に、第 1 期装置として搭載する近赤外線撮像分光装置 SWIMS を開発している。SWIMS は $\phi 9$ 分角の広い視野を持つ上、 $0.9\sim 1.4\mu\text{m}$ 、 $1.4\sim 2.5\mu\text{m}$ の二つの波長帯について同時に撮像、多天体分光を行うことができるユニークな観測装置である。また、SWIMS は十数種類の多天体分光用のマスクをカルーセル内に格納しており、マスクを切り替えることで様々な観測天体に対応することができる。我々は、このカルーセル内に面分光観測用モジュールを格納することで、観測計画に応じた多天体分光モードと面分光モードの容易な切り替えを可能にすることを計画している。

我々が採用しているイメージライザー型の面分光装置では複雑な形状を有したミラーアレイが必要となる上、それらに対して非常に高い要求精度 (形状誤差 100 nm P-V, 表面粗さ 10 nm RMS) が求められる。通常、鏡面は研磨加工によって製作されるが、形状の複雑さから本装置の鏡面を研磨加工で製作することは難しい。そこで、我々は自由度の高い超精密加工機を用いた切削加工による鏡面の製作を試みている。本講演ではボールエンドミルを用いた曲面鏡の試験加工の結果を報告する。また、本加工に向けた現在の開発状況も報告する。

1. Kitagawa, Y., et al. Proc. of SPIE 9151, 91514P (2014)
2. Kitagawa, Y., et al. Proc. of SPIE 9912, 991225 (2016)

2 近赤外線撮像分光装置 SWIMS とその多天体分光用マスク設計

櫛引 洸佑 (東京大学 天文学教育研究センター M1)

SWIMS は東京大学がチリのアタカマ高地にあるチャナントール山に建設中の TAO6.5m 赤外線望遠鏡に搭載される近赤外線観測装置である。SWIMS は広い視野にわたって、近赤外線の二つの波長域を同時に撮像もしくは分光できるという特徴を持ち、撮像、多天体分光、面分光観測ができる仕様になっている。望遠鏡建設地は非常に乾燥しており、近赤外線域において連続的な大気の窓が得られるという強みも持っている。これらを生かし、銀河の形成進化の謎に迫ることが SWIMS の科学目標である。

SWIMS は近赤外装置であり、観測装置自体からの輻射をなくすために装置全体を 100K 前後にまで冷却する必要がある。したがって、冷却した際に設計通りになるように熱収縮を考慮しなければならない。冷却されて収縮してしまうものとして、多天体分光用マスクがある。多天体分光用マスクは多天体分光を行う際に対称の天体に対してスリットを合わせるために必要な

ものである。多天体分光用マスクは焦点面に導入され、およそ 150K 程度にまで冷却される。多天体分光を行う際には正確に天体をスリットに合わせる必要があるが、そのためにまず正確に多天体分光用マスクを設計する必要がある。設計の際には熱収縮を考慮し拡大して設計しなければならない、その拡大率はあらかじめ把握しておく必要がある。今回、マスク設計のための多天体分光用マスクの熱収縮測定実験を行った。実験では実際の SWIMS 焦点面を模した環境を構築し、熱収支計算から多天体分光用マスクが SWIMS での実働温度程度まで冷えるように熱パスを調整した。その結果、多天体分光用マスクは想定通りの温度まで冷え、全体的に一律な収縮を示した。また、今後の多天体分光用マスクの設計のために熱収縮曲線を描いた。今後 SWIMS 本体での試験観測ではこの値を用いて設計を行う予定である。

3 シャックハルトマン波面センサーを用いた大気シンチレーション測定

大金 原 (東北大学 天文学専攻 M1)

我々は、すばる望遠鏡での可視・近赤外線観測のための新しい補償光学装置を開発している。レーザートモグラフィ補償光学と呼ばれるこの新しいシステムは、観測天体の付近にレーザーガイド星を複数打ち上げ、それらからやってくる光の波面を観測し、大気乱流の 3 次元的な分布を推定することでより精度の良い補償を実現する。しかし、大気の状態は非常に小さな角度スケールで変化するため複数のレーザーガイド星は観測天体のすぐ近くに打ち上げる必要があり、この角度は 10 秒角程度である。天体から 10 秒角離れたレーザーガイド星を複数観測し、そこから大気乱流の 3 次元的な分布を得るためには悪条件の逆問題を解く必要があり、そのためには事前情報としてある程度の 3 次元分布を与える必要がある。そこで、補償光学系を用いて大まかな大気乱流の高さ分布を求められないかということを考えている。

大気乱流の高さ分布を求める方法としては MASS (Multi Aperture Scintillation Sensor) と呼ばれる方法がある。この方法は天体からの光の瞬き (シンチレーション) から大気乱流の強度を推定するものであり、マウナケアでの上空大気の乱流強度の測定や新しい望遠鏡の設置サイトの調査などに実際に使われている。私は、補償光学で用いられるシャックハルトマン波面センサーでこの手法を実践するための研究を行っている。実際に、シャックハルトマン波面センサーを含む光学系を東北大学 51cm 望遠鏡に取り付けて天体を観測しシンチレーションのデータを取得した。現在、それらのデータから大気乱流の強度分布の情報を得るためにデータの解析を進めているところである。本講演では、これまでの解析結果と今後の研究の展望について報告する。

4 極限補償光学実験用シャックハルトマン波面センサの開発

津久井 遼 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

太陽系外惑星の大気組成や表面温度などを探査するため、惑星からの光を直接捉える観測が必要である。しかし地上からの観測では、地球大気の揺らぎにより星像が肥大して、惑星の光が主星の光に埋もれることが問題となる。そこで、補償光学と呼ばれる装置を用いて星像の乱れを補正する。補償光学は可変形鏡・波面センサ・制御装置からなり、大気揺らぎに起因する波面の乱れを計測・補正する装置である。

我々は、せいめい望遠鏡 (京大岡山 3.8m 望遠鏡) を用いて、太陽系外にある木星型惑星を直接撮像することを目指している。このための観測装置として、補償光学を備えた撮像装置 SEICA (Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao) を開発している。本装置の補償光学は極限補償光学と呼ばれ、補正によりストレール比 0.9 という鋭い星像を得ることを目指す。このために、従来よりも多点かつ高頻度で波面の計測・補正を行う。ここでは波面センサとして新方式の PDI (Point-Diffraction Interferometer) 波面センサ、制御装置として FPGA (Field-Programmable Gate Array) を用いて、多点で高頻度な計測・制御を実現する。

極限補償光学の開発に当たって、FPGA に可変形鏡と波面センサを接続して制御実験を行う。ただし、PDI 波面センサは現在原理実証の段階にあるため、制御実験に用いることはできない。そこで、信頼性の高いシャックハルトマン式の波面センサを開発して代用する。本波面センサは、シャックハルトマン式としては比較的多数となる 500 個程度の測定点を持ち、測定精度も高い。講演では、この実験用シャックハルトマン波面センサとそれを用いた研究の現状について述べる。

5 1.85m 電波望遠鏡による超広帯域観測の実現

上田 翔汰 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M2) 星間分子雲から原始星誕生までの星形成過程を解明する上で一酸化炭素の同位体 ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O の分子輝線の観測を行うことはたいへん重要である。我々大阪府立大学では口径が 1.85m の電波望遠鏡を独自開発しており、230 GHz 帯に存在する $\text{CO}(J=2-1)$ の 3 輝線で銀河面や主要な星形成領域の観測を勢力的に行って来た。さらに近年、ALMA を初めとする電波望遠鏡による観測で、CO 以外の分子が、分子雲コアのみならず広域に広がって分布していることが指摘されつつある。つまり、分子雲の全貌を明らかにする上で、CO だけでなくその他の多様な分子を観測することが重要視されるようになってきた。このような観測を実現するには、広帯域受信可能な望遠鏡システムが必要となる。

そこで我々は、 $\text{CO}(J=2-1)$ 同位体 3 輝線に加えて SO_2 , CH_3OH , HNC などの多様な分子の輝線の同時観測が可能な

広帯域受信機を開発した。本受信機には従来のサイドバンド分離方式とは異なり、チューニングが容易でサイドバンド分離比が格段に良い導波管型周波数分離フィルタを採用している。この受信機は偏波ごとに、周波数特性の異なる周波数分離フィルタを用いることで広帯域受信を実現している。昨年度、本受信機を 1.85m 鏡に搭載し、星形成領域の観測を行ったところ、1.85m 鏡のビームサイズ (3 分角) に対して、CO 以外の分子が十分に広がって分布している様子が捕らえられた。我々は、この受信機をさらに広帯域化することで 300 GHz 帯の $\text{CO}(J=3-2)$ や、さらに多くの分子輝線の同時観測が可能な受信機システムの構想を練っている。このシステムの実現ができれば、分子雲のより高密度な領域の正確な物理量から、分子雲全体に広がっている多様な分子の状態まで、同時に得ることがができる。本公演では、1.85m 電波望遠鏡のこれまでの成果と将来構想について発表する。

1. Onishi, T., et al. 2013, PASJ 65(4),78(1-13)
2. Hasegawa, Y., et al. 2017, PASJ 69, 91
3. Tosaki, T., et al. 2017, 69(2), 18(1-25)

6 ミリ波補償光学における波面センサ制御システムの開発

上田 哲太郎 (名古屋大学 天体物理学研究室 (A 研) M1)

大型電波望遠鏡の主鏡面精度の低下は大きな問題である。そこで、我々はこの問題を実時間で補償する光学システム「ミリ波補償光学 (MAO; Millimetric Adaptive Optics)」の創出を目指している。MAO の要素技術は波面計測技術と鏡面制御技術に大別され、このうち後者は光赤外補償光学技術の応用が可能である。そこで、電波の波面を実時間で計測する波面センサの開発を推進している。この波面センサの動作原理は、① 信号発生器で参照信号を発生させ、望遠鏡主鏡面に設置した複数の送信機で送信する ② その信号を受信機で「観測」する ③ 相関器を用いて参照信号と受信信号の間の位相差 (光路長の差分) を測定し、波面を計測・再構築する、というものである。本波面センサの要求性能は、大型電波望遠鏡の主鏡面を 100 ms 間隔で 40 μm r.m.s. の精度で計測することである。

本波面センサは、3つのサブシステム (送信機系, 受信機系, 相関器系) で構成され、これらをまとめて制御する Linux/Python ベースのシステムを開発している。各サブシステムの制御機能は、デバイスの切り替えや機能変更時の利便性を考慮し、モジュール化する。またこの制御システムの根幹は、送信系と相関器系を μs の精度で時刻同期させることである。これは、両サブシステムに共通の 1PPS 信号を入力し、その信号で全てのデバイスをトリガすることで、システム全体の時刻同期が実現する。

本講演では、MAO の概要と波面センサの開発進捗、および波面センサ制御システムについて述べる。

7 NANTEN2 新制御システム NECST の開発進捗

塩谷 一樹 (名古屋大学 天体物理学研究室 (A 研) M1)

我々はチリ・アタカマ高地に設置された NANTEN2 望遠鏡を用いた超広域の CO 分子雲サーベイである NASCO (NANTEN2 Super CO Survey as Legacy) 計画を推進している。NASCO で受信機をマルチビーム化することに伴い、望遠鏡制御システムには増大するデータレートの処理、多機能な観測システムが要求される。そこで我々は 2004 年以來使用してきた計算機をリプレイスし、Linux/Python ベースで新制御システム NECST を構築してきた。

2017 年度は、NECST にロボット開発で用いられる ROS (Robot Operating System) を導入した。ROS は最も開発が盛んなオープンソースのロボットプログラミングのフレームワークである。ROS ではセンサー読み取り・演算処理等をノード単位で分け、そのノードを組み合わせることで一つの複雑なシステムを構築する。NECST では各装置の制御・座標計算などをノード単位に分け、複数の計算機にノードを分散させた。これによりシステムをノード単位で取り扱うことができるため、システムの変更が容易になった。また装置の制御を行うノードをダミー化することでシミュレータ環境を構築することができた。このシミュレータは実環境と近いので、シミュレータ上で開発したものをそのまま実環境に移行できる。

NECST では、ポジションスイッチや OTF マッピングなどの主要な動作の実装は完了している。昨年度末の動作試験では、NASCO で要求される精度の駆動が可能であることを確認した。現在は、(1) 効率の良いスキャンモードの検討、(2) クラウドサービスを利用したデータベースの開発、(3) 観測者の負担軽減を目的とした自動観測機能の実装、(4) 観測データの保存・解析ソフトの開発、(5) 観測モニターの作成、などを進めている。今後は、2018 年秋に現行のシングルビーム受信機で試験観測を行い NECST で科学観測可能であることを確認し、その後、新マルチビーム受信機での試験観測を行う予定である。

本講演では NECST の概要とこれまでの進捗及び今後の開発について報告する。

8 NANTEN2 の指向精度と NASCO 受信機のビームパターン測定

逆井 啓佑 (名古屋大学 天体物理学研究室 (A 研) M1)

我々は、チリ・アタカマにある 4m サブミリ波望遠鏡 NANTEN2 を用いて、様々な星間現象について解明を進めてきた。現在、NANTEN2 では、全天の約 70% をカバーする超広域 CO 分子雲サーベイ NASCO (NANTEN Super-CO Survey as Legacy) 計画を推進している。この計画の主要な領域 (全天の約 37%) のサーベイを約 2 年で実現するために、新たに 115GHz 帯受信機 4 ビームと 230GHz 帯受信機 1 ビームを組

み合わせたマルチビーム受信機を開発中である。NASCO 受信機では光学系設計・ミラーの製作が完了しており、各ビームに対して開口能率は約 67% 以上を達成し、天球面上でのビームパターンのモデルがシミュレーションされた。しかし実際の光学系では、ホーンやミラーの設置誤差等により、開口能率の低下やビームパターンの変化が予想される。

ナイフエッジ法を用いた、近傍界でのビームパターン測定システムを開発し、ビーム測定をした。これにより、開口能率の低下に影響の大きい冷却光学系の設置誤差が、ビームサイズや光軸のズレに及ぼす影響を実測することができる。200GHz 帯受信機のビームパターン測定では、光軸の傾きが測定され、実際にホーンが 1° 程度傾いていることを確認し、傾きを抑える保持機構を製作中である。このようにビーム測定結果を光学系にフィードバックすることに成功している。

また、現在 NANTEN2 では、建設当初はなかった一部の方向でポインティングが合わない問題を抱えている。これは観測効率の低下につながり、NASCO 計画においても深刻な問題である。そこで、高分解能の傾斜計を導入して、アンテナの様々な部分に取り付けて傾斜データを取得した。測定結果から器差モデルに含まれない、軸の歳差運動などが明らかになってきている。これらを解析することにより、アンテナの傾きをモデル化しポインティングを補正する他、傾斜データからリアルタイムに観測データを補正する方法を検討しており、観測効率の向上を目指している。

本講演では、上述した評価の詳細や、評価結果を報告する。

9 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星 LiteBIRD のための反射防止微細構造の開発

高久 諒太 (国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 M1)

極初期の宇宙が指数関数的に膨張したとするインフレーションでは、その時期に発生する原始重力波の影響により、現在観測可能な宇宙最古の光である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) に B-mode と呼ばれる特殊な偏光パターンを刻んだとされる。そこで 2025 年に LiteBIRD という衛星を打ち上げ、世界初となる B-mode を観測し、インフレーションを検証する計画が進んでいる [1]。LiteBIRD では様々な要因によるシステムティック誤差を低減するため、光学系に直径 40cm の半波長板を導入する [2]。半波長板の素材は様々な観点からサファイアが適しているが、屈折率が 3 程度と高く、約 50% の信号を宇宙に反射してしまう。また CMB の観測領域も 34~270GHz と広帯域なので、この帯域で 90% 以上の透過率を得る反射防止膜が要求される。そこで生体模写の視点からヒントを得て、広帯域の反射防止として蛾の目の構造 (モスアイ構造) を半波長板の両面に施すことを考えた。モスアイ構造の原理は、入射波長が構造周期よりも大きい時、構造部分を屈折率が徐々に変化する素材として扱えるというものである。つまり表面反射を極限まで抑えられるので、たった一つの素材で広帯域かつ高性能な反射防

止を実現できる [3]。さらにモスアイ構造は幾何学パラメータを調整すれば様々な帯域に応用でき、汎用性にも優れている。私は、モスアイ構造により必要な透過率と受光面の大きさを満たす反射防止膜を実現する方法を研究している。レーザー加工でサンプルを試作し、これまで困難とされていた高アスペクト比の構造形成に成功した。また、サンプルの形状を測定し、電磁界解析シミュレータを使って透過率を予測するとともに、測定も行った。モスアイの突起形状の微妙な違いにより、透過率の周波数依存性が変わることを見出し、特定の形状であれば透過率要求を満たせることがわかった。現在の装置ではモスアイ構造の形成に時間がかかるため、直径 40cm の反射防止膜を現実的な時間で作成する手法を考案する必要がある。

1. M. Hazumi et al., Proc. of SPIE Vol. 8442 844219-1 (2012)
2. A. Kusaka et al., arXiv:1310.3711 [astro-ph.IM] (2014)
3. V. Schutz et al., JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 11, No. 2 (2016)

10 DESHIMA: 超伝導フィルターバンク型分光器とデータ解析パッケージ DE:CODE の開発

鈴木 向陽 (名古屋大学 天体物理学研究室 (A 研) M2)

我々は、超伝導フィルターバンクを用いた、同時観測帯域 240–720 GHz のミリ波サブミリ波分光器である DESHIMA (Deep Spectroscopic High-redshift MApper) の開発を推進している。分光機能と検出機能を一つのチップ上に集積した超伝導オンチップ・フィルターバンクは、帯域が狭いという既存の分光観測機器の弱点を打開し、数 100 GHz の超広帯域の分光を可能とする新技術である。我々は 2017 年 10–11 月に、帯域 330–370 GHz の試作型チップを搭載した DESHIMA を ASTE 望遠鏡に搭載し、同技術を用いた天体スペクトルの検出に世界で初めて成功した。また DESHIMA のデータ解析ソフトウェアである Python パッケージ DE:CODE の開発を行っている。

今回、試験搭載の観測データを DE:CODE を用いて解析し、DESHIMA および DE:CODE の性能評価を行なった。その結果、DE:CODE に実装されている、(1) 観測結果の可視化、(2) 10 Hz 周期で回転するチョッパー・ホイールを用いた逐次的なゲイン補正および大気吸収補正計算、(3) 主成分分析 (PCA) を応用した大気の変動モードを推定する機能などが正常に動作していることがわかった。特に (3) では、通常のチョッパー・ホイール法で取り除くことが不可能な大気成分を取り除くことができ、少なくとも 200 s の時間安定性を保証することがわかった。本講演では、DESHIMA, DE:CODE の概要および試験観測データを用いた評価について報告し、今後の DESHIMA の展望について述べる。

1. Endo et al. 2012, JLTP, vol. 167, issue 3-4, pp. 341

2. Endo et al. 2012, SPIE, vol. 8452, pp. 15

11 モンテカルロ数値計算による Suzaku/HXD-WAM 単独でのガンマ線バースト位置決定法の改良

Miwa Yuya (埼玉大学 田代・寺田研究室 M1)

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) とは、宇宙最大の爆発現象であり、莫大なエネルギーが数ミリ秒から数百秒という短い時間に放射される現象のことである。X 線天文衛星「すざく」には、広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor: WAM) と呼ばれる検出器があり、50 keV から 2 MeV 帯域のエネルギースペクトルを取得できるうえに、全天のほぼ半分を大きな有効面積 ($800 \text{ cm}^2 @100 \text{ keV}$) で監視できる。そのため WAM は、GRB モニタとして使用されており、約 10 年間の稼働期間で 1284 の GRB を観測してきた。WAM は撮像機能を持たないため、単独では光子到来方向がわからず、光子の到来方向に依存するエネルギー応答関数が作成できない。よってスペクトル解析できる GRB は、他衛星によって発生位置が決定された約 15 % の GRB に限られる。そこで先行研究では、残りのイベントをスペクトル解析するために、Geant4 ツールキットと「すざく」衛星のマスモデルを用いた数値計算を行い、およそその GRB 光子到来位置とエネルギー応答関数を作成する手法が確立された。しかし、この手法では WAM の結晶を束ねた面ごとの情報しか用いられていないために、検出器の幾何学配置の対称性から到来方向の 2 方向までしか絞れない弱点があった。そこで本研究では 2 方向から 1 方向に定めることを目標に、WAM を面よりも細かい単位である Unit ごとの情報を用いて、位置推定を行なった。これによりバックグラウンド除去、gain 補正などに Unit ごとの個性が取り込まれる。情報量を増やすことで検出器の幾何学配置の対称性を壊し、位置推定が改善できないか模索した。結果、1 方向に定まることはなかったが、2 方向のうち正しく予想できた推定位置の精度が約 3° 向上した。

12 超小型衛星搭載に向けたガンマ線検出器の開発

渡辺 彰汰 (金沢大学 宇宙物理学研究室 M1)

ガンマ線バーストは、数秒間に 10^{52} erg ものガンマ線が観測される宇宙最大の爆発現象である。2017 年 8 月 17 日、中性子星連星の合体による重力波が LIGO 及び、VIRGO によって観測された。その観測時間から 1.7 秒遅れて、フェルミガンマ線望遠鏡のガンマ線バーストモニターが、連星合体による短時間ガンマ線バースト (SGRB) らしき天体現象を観測した。これは、初めての重力波と電磁波の同時観測であり、SGRB の発生過程を解明するための貴重な情報である。

金沢大学では、更なる重力波と電磁波の同時観測を目的とし、超小型衛星を用いた X 線 γ 線観測を計画している。我々の研究室では、SGRB の到来時刻を 10 ミリ秒より高い精度で決定

するためにガンマ線検出器の開発をしている。

本研究では、ガンマ線検出器のエネルギー較正、温度較正を目標とした実験を行った。CsI シンチレーターと光子計測半導体素子 (MPPC) を組み合わせ、マイクロコンピュータでガンマ線のエネルギーを読み出す電気回路の自作とソフトウェアの作成、並びに評価を行った。その結果、59.5 keV ガンマ線に対して 10.4% のエネルギー分解能 (半値全幅) を達成した。続いて、MPPC は電子を増倍する機能があるが、温度によって増倍率が変化してしまう。そのため、温度センサーのフィードバックをかけることで MPPC にかかる高圧電源を制御し、MPPC の増倍率を保つソフトウェアの作成、評価を行った。以上の 2 つの結果について報告する。

13 超小型衛星搭載広視野 X 線撮像検出器の性能評価

宮尾 耕河 (金沢大学 宇宙物理学研究室 M1)

2017 年 8 月 17 日、アメリカの重力波干渉計 LIGO と、ヨーロッパの重力波干渉計 Virgo で、中性子星連星の合体による重力波が検出された。高密度天体連星の衝突時には r 過程が起こるとされており、重力波源の周囲の環境を電磁波で追観測することで、重元素生成の過程を解明することができる。しかし重力波観測のみでは、10-100 平方度と方向決定精度が悪い。そこで Short Gamma-Ray Burst (SGRB) に注目する。SGRB は中性子星連星が衝突・合体する際に重力波とともに発生すると考えられている、X 線やガンマ線の強力な放出現象である。

金沢大学では重力波観測と同期した電磁波観測を行うために、超小型衛星を開発している。金沢大学衛星に搭載される広視野 X 線撮像検出器は、X 線突発天体からの電磁波を検出し、その発生方向を特定するものである。観測エネルギー帯域 1-20keV、視野 1 ステラジアン以上、角度分解能 15 分角を目標としている。方向決定にはコーデッドマスクとストリップ型シリコン半導体検出器 (SSD) を用いており、1 次元の方向決定能力を持つ基板を 2 枚組み合わせることで到来方向を決定している。SSD からの信号の読み出しは、低エネルギーの読み出しに特化した高利得アナログ集積回路 (ASIC) で行う。本研究では実際の衛星運用時に想定される環境下 (真空、温度-20°C 程度) での、広視野 X 線撮像検出器の性能を評価した。複数の線源を用いて測定を行い、4.5keV の X 線に対して、FWHM 換算で <2keV の分解能を達成していることを確認した。また、8 チップの ASIC のそれぞれ 64 チャンネルに対して、入力されるエネルギーと AD 変換をして得られたデジタル値との応答関数を求めて、チャンネルごとの特性を求めた。本講演では金沢大学衛星の科学目標及び、広視野 X 線撮像検出器の性能について報告する。

14 Kanazawa – SAT³ 搭載広視野 X 線撮像検出器の撮像性能評価

鈴木 大智 (金沢大学 宇宙物理学研究室 M1)

2017 年 8 月、初めて中性子星連星の衝突・合体を重力波で検出した。この際発生したマクロノヴァは r-過程元素合成により加熱された物質からの放射によるものだと考えられており、重元素生成を理解するために母銀河の同定や周囲の環境の観測が必要である。しかし、重力波干渉計での方向決定精度は 10-100 平方度と非常に粗く、電磁波での追観測が困難である。一方、ブラックホール・中性子星連星や中性子星連星は、衝突・合体時に重力波だけでなく短時間ガンマ線バースト (SGRB) も発生させるとされているため、電磁波による方向特定が可能な天体である。

金沢大学では、重力波と同時に発生する SGRB やその他の X 線・ガンマ線突発天体を観測する超小型衛星 Kanazawa – SAT³ を独自に開発している。搭載する広視野 X 線撮像検出器により検出・方向決定を行う。SGRB の初期放射やそれに付随する軟 X 線帯域の放射を主なターゲットとするため 1-20 keV の観測帯域を持つ。方向決定は 1 次元符号化マスクとシリコンストリップセンサー (SSD) により行う。

本研究では、マスクの設計や撮像性能についてのシミュレーションを行った。方向はマスクの開口パターンと SSD の X 線強度分布とで自己相関を取る (イメージング) により決定する。そこでまずイメージングとライトカーブの 2 つの観点から理論を考え、マスクの開口率を決定した。次に、イメージングの際に 2 つ以上のピークが現れないよう、乱数を用いてマスクを 50000 パターン作成し、自己相関の S/N 比が大きいかつ擬似天体の S/N 比が小さい最適なマスクを選んだ。また、Geant4 を使い実際のマスクや SSD を模擬した環境を構築し放射線を入射させた場合に期待される撮像性能が得られるかについてシミュレーションを行った。

15 電荷収集効率の改善を目指した X 線 SOI-CMOS 素子の性能評価実験

行元 雅貴 (宮崎大学 M1)

我々は、次世代の X 線天文衛星「FORCE」への搭載を目指した X 線半導体検出器として「XRPIX」を開発している。XRPIX は SOI (Silicon On Insulator) 技術を用いることで、機械的接合をせずに検出部と読み出し回路部の一体化を実現している [1]。これにより各ピクセルにヒットタイミングと位置情報を出力させるイベントトリガー機能を実装でき、10 μ s の時間分解能を実現できる。これは現在の主力 X 線検出器である X 線 CCD (Charge Coupled Device) の時間分解能である数 s を上回り、X 線 CCD で問題となる高エネルギー粒子による非 X 線バックグラウンドを反同時計数法で除去できる。そのため X 線 CCD より広帯域で X 線の観測が可能になる。一方で、エネルギー分解能においては目標値である X 線 CCD と

同程度 140eV (FWHM at 5.9keV) に到達していない。先行研究より XRPIX では読み出し回路部、特にトランジスタの電位が検出部の電場構造に影響を及ぼすことがわかっている [2]。歪んだ電場構造に電荷が捕らわれることで電荷損失が起き、スペクトルのピークシフト、エネルギー分解能の低下を招く。これはエネルギー分解能向上のため、解決すべき問題である。先行研究では電場構造のシミュレーションと実験から 1 ピクセル内における電場構造変化の位置依存性を調査し、トランジスタの配置を改良することで問題を解決した [2]。その際に開発されたのが XRPIX2b である。我々は XRPIX2b で得られた結果を参考に更なる配置の改良を行った XRPIX6H を開発した。XRPIX6H では過去の素子を上回る電荷収集効率が期待されているが、実証はされていない。本研究では XRPIX6H を用いて X 線を検出し、スペクトル形状とエネルギー分解能の観点で電荷収集効率を評価した。本発表では、その評価結果を報告する。

1. Y. Arai, et al., Development of SOI pixel process technology, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 636 (2011) S31.
2. 松村英晃, 京都大学, 2015, 修士論文.

16 マルチコリメータ実験による X 線 SOI 検出器の電荷収集時間のピクセル内での位置依存性

佳山 一帆 (京都大学 理学研究科 宇宙線研究室 M1)

我々は、2020 年代の打ち上げを目指している次世代 X 線天文衛星 FORCE に主検出器として搭載予定である X 線観測用 SOI 検出器 XRPIX を開発している [1]。従来の X 線天文衛星に搭載されている X 線検出器は主に CCD であり、これは高いエネルギー分解能・位置分解能を持つが、時間分解能が数 s 程度と低い。それに対し、我々が開発している XRPIX は各ピクセルにトリガ回路を実装することで、X 線 CCD を大きく上回る 10 μ s の時間分解能を実現した。この時間分解能の向上により、高エネルギー粒子起源の非 X 線バックグラウンドを除去する反同時計数処理を用いることができ、0.5–40 keV の広帯域撮像分光を実現する。これは X 線 CCD のエネルギー帯域 0.5–10 keV をはるかに上回っている。

最新の XRPIX 素子である XRPIX6E は、310 eV (FWHM) @ 6.4 keV と高いエネルギー分解能をもつ。しかし、分光性能が、トリガが出てから露光を止めるまでの時間に依存し、その時間が短いほど分光性能が劣化することがわかっている [2]。この原因は明らかになっておらず、我々は同じピクセル内でも照射位置によって電荷収集にかかる時間が異なると考えている。そのため、我々は XRPIX にマルチコリメータを用いて X 線を照射する実験を行い、電荷収集時間と照射位置の関係を調べた。マルチコリメータ実験では、4 μ m 径の穴が等間隔で空いたメッシュを素子の前に設置して X 線を照射する。マルチ

コリメータを用いることで、サブピクセル単位で素子上の X 線光子の照射位置を指定することができる [3]。そのため、1 ピクセル 36 μ m 角の素子に対してさらに細かいスケールで分光性能を評価することが可能となる。マルチコリメータを用いて XRPIX6E の分光性能などを計測し評価した結果や、分光性能が電荷収集時間に依存する原因についての考察を発表する。

1. T.G.Tsuru., et al., Development and performance of Kyoto Xray astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor, Proc. SPIE9144 (2014) 914412.
2. 林 秀輝, 京都大学, 2018, 修士論文.
3. J.Hiraga. Diagnostics of the X-ray CCD with Sub-pixel Resolution. Osaka Japan, Osaka University, 2002, Ph.D.thesis.

17 X 線天文衛星代替機 XARM 搭載軟 X 線撮像装置 Xtend に用いる CCD 素子の放射性耐性試験

金丸 善朗 (宮崎大学 M1)

X 線天文衛星代替機 (X-ray Astronomy Recovery Mission; XARM) は、2017 年 4 月に運用が終了した X 線天文衛星「ひとみ」の代替機として計画されている日本の次期 X 線天文衛星である。現在、我々は XARM に搭載予定の軟 X 線撮像装置 Xtend の開発を進めている。Xtend は軟 X 線反射鏡と軟 X 線 CCD カメラ (Soft X-ray Imager; SXI) から構成されており、0.4–13 keV の帯域で 38 分角平方の広視野を達成する。

SXI に対しては、XARM の目標寿命として設定されている打ち上げ後 3 年時点で、エネルギー分解能が 250 eV 以下であることが要求されている。入射した X 線を信号電荷へと変換し、各画素間を順次転送して読み出しを行う X 線 CCD の場合、軌道上でのエネルギー分解能の低下は電荷転送効率の劣化によって決まる。その主な原因は宇宙線による CCD 撮像領域の格子欠陥である。今回、我々は CCD 候補素子と同等の性能を持つ小型素子を作製して放射線損傷実験を行い、衛星搭載素子の放射線耐性を検証した。

本講演では、放射線医学総合研究所 HIMAC で行った小型素子に対する陽子線照射実験とその結果について報告する。今回、作製した素子には電荷転送路を狭めたノッチ構造を導入した。ノッチ構造の有無による放射線耐性の差異、また非一様な放射線損傷を受けた CCD の電荷転送効率を測定するための新しい手法についても紹介する。

18 宇宙 X 線望遠鏡の熱制御のためのサーマルシールドの開発

清水 貞行 (名古屋大学 X 線グループ (Ux 研) M1)

X 線天文衛星は軌道上で運用し、特にその望遠鏡は宇宙空間に直接晒される位置にあるため、そのままでは輻射によって熱が奪われ極めて低温となり、熱歪みで反射鏡の形状が歪んでし

まう。これを防ぐために、宇宙空間との輻射結合を切るためのサーマルシールドが用いられる。サーマルシールドの実体は、アルミ薄膜付きプラスチックフィルムであり、可視光や赤外線放射率を大幅に抑制し、望遠鏡内部の熱制御をするものである。

名古屋大学はこれまでに「あすか」、「すぎく」、「ひとみ」用にサーマルシールドの開発を行ってきた。現在我々は、NASA が 2021 年に打ち上げを予定している、X 線偏光観測衛星 IXPE 搭載用サーマルシールドを開発している。サーマルシールドには望遠鏡内部の熱制御以外に、ロケットでの打ち上げ時の振動に耐える機械強度や、空力加熱への熱耐性、観測効率を最大化するための高い X 線透過率などが要求される。特に、IXPE では低高度でのノーズフェアリングの開頭が予定されており、空力加熱による効果が無視できず、従来よりも高い熱耐性がサーマルシールドに求められる。そこで、IXPE 用のサーマルシールドはプラスチックフィルムに 1 μm 厚のポリイミドを採用した。また、打ち上げ時の環境耐性試験の 1 つとして加熱試験を行い、要求負荷に対する十分な耐性を確認した。

2018 年 5 月に、基本設計に基づく試験用のモデルを納品した。今後は本サーマルシールドを望遠鏡に取り付けての評価試験を実施し、衛星搭載品の設計、製作に取り掛かり、2019 年 4 月の納品予を目指す。

19 マイクロマシン技術を用いた Lobster eye X 線光学系の検討

大坪 亮太 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

宇宙 X 線は地球大気に吸収され地上での観測が困難である。そこで人工衛星を用いての観測が主となる。そこで X 線光子を効率よく集光し、結像するための X 線望遠鏡は必要不可欠である。我々はマイクロマシン (MEMS) 技術を複合的に用いた次世代の超軽量 X 線望遠鏡を開発している。薄い Si 基板に多数の微細穴を形成し、側壁を平滑化することで反射鏡として用いる。我々はインハウスで製作した光学系を使って、本手法で世界初となる X 線結像実証を達成してきた^[1]。従来より 1 桁以上軽量で短焦点距離でも使えることから、2020 年代初頭に打ち上げ予定のバイナリーブラックホール探査衛星 ORBIS や地球磁気圏可視化衛星 GEO-X への搭載を目指している。

従来の MEMS 方式の Wolter I 型望遠鏡に加えて、今回、私は Lobster eye 光学系に注目した。甲殻類のロブスターの目の形状を模擬した光学系であり、球面状に並んだ四角穴の内壁での 2 回反射を利用して集光結像する。Wolter I 型望遠鏡と比べて、1 段で実現が可能であり、原理的に広視野をより実現しやすい特徴を持つが、一方で集光像が十字に広がるため相補的である^[2]。私は全天モニターなどへの応用を考えて MEMS 技術を使った Lobster eye 光学系を検討した。まず MEMS Wolter I 型望遠鏡の光線追跡シミュレーション^[3]をベースに Lobster eye 光学系のシミュレーションを構築し、0.5 keV - 10 keV の

光子でシミュレーションを行った。その結果、Lobster eye 光学系では同口径・同焦点距離の Wolter I 型光学系に対して > 1 keV で 2 倍以上の視野を実現可能であり、また > 2 keV で有効面積が増えることが分かった。次に私は MEMS Lobster eye 光学系の製作に着手し、穴幅 30 μm ・深さ 300 μm 四角穴を 4 inch Si 基板に形成した。今後、球面変形まで行って完成した光学系の X 線照射に進みたいと考えている。本発表では光線追跡シミュレーションによる性能見積もりおよび光学系の基本設計と試作の現状を述べる。

1. Y.Ezoe et al. Opt. Letters, 2012, 37, 779-781
2. J. R. P. Angel, "Lobster eye as X-ray telescopes", 1979
3. I.Mitsuishi et al. "Ray-Tracing Simulations for the Ultra-Lightweight X-ray Optics toward a Future Jupiter Exploration Mission", 2015

20 太陽 Axion 探査に特化した吸収体をもつ TES 型 X 線マイクロカロリメータの設計

紺野 良平 (国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 M1)

暗黒物質が、現在の宇宙全体の 27% を占めていると様々な観測やモデルが示しているが、未だ正体が判明していない。暗黒物質は標準理論を超える未知粒子と考えられ、広い質量領域を持つ暗黒物質候補粒子として Axion がある。Axion の質量は μeV から keV 領域を持ち、探査方法には CAST 実験が代表的な、太陽中心で生成された Axion の検出が挙げられる [1]。太陽中心では磁気双極子遷移を持つ原子核に、そのエネルギー準位に等しい光子が入射し一定のエネルギーの Axion が作られる [2]。これは太陽でほとんど吸収されず、地上で同じ原子核に吸収された場合には、励起された原子核から観測可能な標準模型の粒子が放出される。

従来の太陽 Axion 探査では、生成された Axion を地上の 57Fe で吸収し、その際放出される 14.4keV の γ 線を半導体検出器を用いて捉えようと試みた [3]。しかし、放出される大半は conversion 電子と低エネルギーの X 線で、 γ 線の検出効率は自己吸収も含めて 1% 程度である。さらに宇宙線バックグラウンドも高く検出感が悪かった。

そこで我々は、超伝導遷移端 (TES) 型 X 線カロリメータを用いた Axion 探査を考案した。TES は超伝導-常伝導遷移端の抵抗変化を利用した温度計を利用した放射線検出器で、従来の Si 半導体検出器よりも分光性能 $E/\Delta E$ が 20 倍以上向上する。線スペクトルの数を S、その領域のバックグラウンドが一定とすると、 $S/N \propto 1/\sqrt{\Delta E}$ になるので、SN 比をよくすることが出来る。さらに 57Fe を TES カロリメータの吸収体に使う事で、自己吸収される電子や X 線、14.4 keV の γ 線の全てを捉え、87% の高い検出効率を達成可能である。

しかし、強磁性体である 57Fe で発生する磁場が TES の超伝導遷移特性や分光性能を劣化させる可能性がある。そのため、

TES と吸収体の配置、熱伝導パスに従来と異なる構造設計が必要であり、さらに、その構造で熱検出器が機能するか確認したのちに製作を行う。

本発表では、TES カロリメータの設計の最適化を行うために磁気・熱シミュレーションを行なった結果を報告し、期待される Axion 検出実験のセットアップと感度を議論する。

1. Search for 14.4 keV solar axions emitted in the M1-transition of 57Fe nuclei with CAST
2. Moriyama et al., 1995
3. Namba et al., 2007

21 湾曲結晶を用いたブラッグ反射型 X 線偏光計の改良

塚田 晃大 (中央大学 天体物理学研究室 M2)

近年、X 線天文観測において、撮像、測光、分光観測に加えて、偏光の観測機器の開発が行われてきている。X 線偏光観測が行えるようになると、他波長では見ることでできない極限状態の天体の偏光情報が得られるようになるため、ブラックホールの降着円盤の構造や、近傍の強重力場などを解明することができると期待されている。我々は、偏光 X 線を観測するための光学系の開発を行なっている。X 線を集める反射鏡に結晶を用い、ブラッグ反射の原理を利用することで偏光を捉えようというものである。X 線天文学において特に重要とされている鉄輝線 (6.4keV 付近) に着目し、Si(100) 結晶を採用している。ブラッグ反射では X 線の入射角によってエネルギーが制限されてしまうが、エネルギーに幅をもたせるため結晶を湾曲させる工夫をしている。これによって反射した X 線を集光することができ、オフフォーカスで観測することで分光観測と偏光観測を同時に行うことができる。

先行研究では、Si を回転放物面形状に湾曲させる手法を確立し、実際に反射鏡の作成を行なった。作成した反射鏡の形状測定を行なった結果、鏡の Si には放物線方向に波長 2mm 振幅 $2.5 \mu\text{m}$ の凹凸があることがわかった。反射鏡作成時に用いた金型の形状測定により、同様の凹凸が見られたことから反射鏡の凹凸は金型の影響であると考えた。反射鏡を用いて X 線集光実験を行なった結果、1 点に集光するはずの像が 2 つの像に分かれた。これは反射鏡の凹凸の影響によるものであると考える。そこで、先行研究で用いた反射鏡より表面精度が優れた反射鏡の作成を金型の新規作成から行なった。新たに作成した反射鏡の形状測定を行なった結果、波長 8mm 振幅 $1.3 \mu\text{m}$ の凹凸の金型の作成に成功した。これは先行研究で用いた反射鏡の 8 倍の表面精度である。本講演では作成方法と解析結果の詳細について報告する。

22 MeV ガンマ線天体観測を目指したオーストラリア気球実験:SMILE-2+

阿部 光 (京都大学 理学研究科 宇宙線研究室 M1)

宇宙 MeV ガンマ線の観測から、元素合成プロセスや粒子加速機構の解明、ブラックホール近傍の強い重力場など数多くの現象への理解が期待されている。

MeV ガンマ線は屈折、反射を使った集光が難しい。加えて、物質との相互作用はコンプトン散乱が優勢なので、散乱ガンマ線は検出器外に逃げるため、X 線 (光電吸収が優勢) や GeV ガンマ線 (対生成が優勢) に比べても検出器の阻止能は悪い。他波長とは異なる撮像原理が必要となる。

そこで、コンプトン散乱での運動学から到来方向を推測するコンプトン法を用いた望遠鏡 COMPTEL/CGRO が打ち上げられたが、恒常天体は 10 年の観測で 32 天体しか発見できず、それ以降 MeV 帯域で大きな進展はない。これは、宇宙空間の高い線量や観測機器を構成する原子核と宇宙線が相互作用して生じるガンマ線などがつくる高雑音環境に加え、従来のコンプトン法では電子の反跳方向を測定しないため散乱平面がわからず、一意に到来方向を決定できないことに理由がある。

この現状を打破すべく、我々は独自の電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) を開発している。ETCC は反跳電子の飛跡をガス飛跡検出器で観測することで、事象ごとに到来方向を一意に再構成できる。これにより、観測目標以外からのノイズを大幅に抑制、またガス中の飛跡のエネルギー損失率から粒子識別ができ、ETCC は高い雑音除去能力をもつ。

将来、我々は ETCC を衛星搭載し COMPTEL の 100 倍の感度で全天観測することを目標に、気球実験や地上実験で ETCC の能力の実証を行う SMILE 計画を推進させている。2018 年 4 月オーストラリア・アリススプリングスにて、銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線とくに星雲の観測による ETCC の天体観測能力の実証を目的とした気球実験 SMILE-2+ を放球した。本講演では、SMILE-2+ の放球について報告を行う。

1. V.Schonfelder *et al.*, A&AS, 143 (2000), p.145
2. T.Tanimori *et al.*, Sci. Rep., 7 (2017), p.41511

b 講演 (b1-4)

23 将来衛星に向けた MEMS 技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の製作プロセスの改善

福島 碧都 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

我々は微細加工技術である MEMS の製作技術を応用した新しい超軽量 X 線望遠鏡の開発を行っている。薄い Si 基板に微細穴をドライエッチングで開けて、側壁を全反射鏡として利用するために高温アニールで平滑化し、平行光を集光するために基板を曲げ、さらに反射率を上げるために原子層堆積法で重金属

を膜付けして、最後に2段に重ねて完成する。基板が薄いため、従来の方式よりも1桁以上軽量となる。我々のグループではインハウスで製作した光学系を用いて、本手法で世界初のX線反射結像を実証してきた。

本講演では本方式で課題となってきた側壁の平坦化のための超長時間アニール、鏡配置精度を決める変形の新たな条件出し、側壁の端に存在しX線を遮蔽するバリの除去のための化学機械研磨といった新たなプロセス改善と将来の衛星応用について紹介する。

1. Ezoe et al. 2010, Microsys. Tech.
2. Ogawa et al. 2013, Appl. Opt.
3. Ishikawa et al. 2017, Microsys. Tech.

24 「なゆた望遠鏡」の可視光分光器 MALLS に取り付ける新 CCD カメラの開発

杉江 祐介 (兵庫県立大学大学院光学赤外線天文学研究室 M2)

なゆた望遠鏡に搭載された MALLS は、可視光の中・低分散ロングスリット分光器である。MALLS には FLI 社の CCD カメラ (PL23042-1-B) が搭載されており、使用されている CCD 素子は 2000 times 2000 ピクセルの e2V 社製 230-42 である。

我々は MALLS にエッセル回折格子を組み込み、波長分解能が 50000 程度の高分散分光観測ができるように改良を進めている。このためには広い波長範囲で高い量子効率を持った大フォーマットの CCD 素子が必要である。そこで我々は e2V 社の新しい CCD 素子 (型番: CCD261-84) を購入した。この素子は 2000 times 4000 ピクセルの画素数を持ち、波長 400 nm から 900 nm に渡って 80 % 以上の量子効率を実現している。

今までにこの CCD 素子を収納するカメラ容器を製作し、真空・冷却試験を行った。デュワー容器への冷凍機の取り付け方法は、東京大学の観測装置 LISS を参考にした。真空試験では、当初十分な真空度が得られなかったが、O リングや真空バルブ等のデュワー容器の構成部品の見直しを行い、冷却時に 1.57×10^{-6} Torr の真空度を達成した。また、冷却時の温度は CCD チップの搭載場所で約 -100°C を目標としているが、現時点では約 -70°C までしか冷えない。これに関しては熱パスの部品構成を再検討することで改善を試みている。CCD の駆動回路と読み出し回路は MESSIA6+Mfront2 を使用する予定である。

本講演では、これまでに製作した真空デュワー容器の詳細、および読み出し回路の開発について述べる。

25 装置偏光とシグナルの漏れ込みによる系統誤差ゼロを実現したマーチン・パレット型フーリエ分光器の開発

官野 史靖 (東北大学 天文学専攻 M2)
宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Back-

ground: CMB) の B モードと呼ばれる特殊な偏光シグナルは、インフレーション理論の重要な証拠である、原始重力波の情報を刻んでいる。そのため、CMB の B モード偏光初検出に向けて、現在様々な研究チームが観測実験を行っている。

現在の CMB 偏光実験における最大の課題の一つに、観測データにおける、銀河系内シンクロトロン放射や星間ダストからの熱放射といった前景放射と、CMB との成分分離が挙げられる。CMB と前景放射との分離は、成分間にあるスペクトルの違いを拠り所としているので、それらの分離精度は、検出器の周波数および偏光特性の校正精度に大きく左右される。CMB 実験で用いられる検出器の周波数特性の測定には、フーリエ分光器が用いられる。これまでのフーリエ分光器では、鏡での反射の際に生じる擬似的な偏光や、ワイヤグリッドによるシグナルの分割・合成の際に生じるシグナルの漏れこみ等による装置偏光が生じてしまう。このためフーリエ分光器の使用した検出器周波数および偏光特性校正精度には 0.1% 以上の系統誤差の混入が避けられない。これは、CMB 強度の 10^{-9} 程度と予測される超微弱な B モード偏光シグナルの検出を目指した観測において、無視出来ない大きな系統誤差である。そこで我々は、光学系に工夫を施すことで、擬似偏光、シグナルの漏れこみを原理的に 0 にする独創的な光学系を考案した。このことにより、装置由来の系統誤差を基本 0 に抑えることができる。

本発表では、擬似偏光をゼロに抑える工夫を施したミリ波フーリエ分光器について紹介する。また、このフーリエ分光器を活用した前景放射と CMB 成分の分離精度を飛躍的に向上させる超分解分光法についても概説する。

26 218–350 GHz 帯 超広帯域周波数分離フィルタの開発

増井 翔 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)
電波望遠鏡に搭載する受信機の性能向上を目指した開発は主に低雑音化と広帯域化等に分けられる。近年、この受信機感度に関しては既に量子限界に近い性能が達成されているため、観測周波数の広帯域化がより重要視されるようになってきた。観測周波数帯域を広げることができれば、より少ない回数でより多くの分子輝線の観測が可能になり、観測時間の大幅な削減が期待される。例えば、我々のグループでは星形成の母体となる分子雲をトレースする最も基本的な輝線である CO 分子の回転遷移 $J=3-2$ と $J=2-1$ の同時観測を視野に入れた、218–350 GHz 超広帯域受信機の開発を進めている。

さらに、我々はこの広帯域観測を従来 ALMA 等で用いられている標準的なサイドバンド分離方式ではなく、近年実用化された導波管型周波数分離フィルタで行うことを検討している (Hasegawa et al. 2017)。これは、従来型に比べて受信機チューニング等が容易になる点、高いサイドバンド分離比が実現できるなど複数の利点を有している。導波管型周波数分離フィルタは導波管の遮断波長 (カットオフ周波数) という特性を活かした High Pass Filter と、入射した電波に 90° の位相差

をつけ、強度を 50% ずつに 2 分配する Branch Line Coupler などのサブコンポーネントから成っており、広帯域で必要性能を達成するためには、電磁界解析による各部分の形状の最適化が鍵となる。先行研究で実用化されたものは、CO ($J=2-1$) 輝線に特化した比帯域 4.5% の非常に狭帯域のものであり、上記に述べた超広帯域観測を達成するためにはより精密なパラメータ調整が要求されていた。

私は、3次元高周波電磁界解析ソフト HFSS を用いて新しい周波数分離フィルタのシミュレーション解析を進めている。現在までに、218–350 GHz 帯域において、損失の少ない良好な特性を達成した。従来よりも約 10 倍の比帯域を持つ解析結果が得られた。本講演では、現在開発中の広帯域周波数分離フィルタの原理を紹介し、開発状況について報告を行う。

1. Observational demonstration of a high image rejection SIS mixer receiver using a new waveguide filter at 230 GHz, Y. Hasegawa et al. 2017, PASJ, 69, 91

c 講演 (c1–13)

27 積層配線 TES 型 X 線マイクロカロリメータの転移温度制御について

大井 かなえ (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

宇宙組成において、バリオンの占める割合はわずか 5 % である。

Super DIOS では、有効面積を大きくするため非常に大きな検出器アレイが必要となるが、アレイを大型化すると基板上の配線スペース不足や、配線間クロストークの問題が生じる。そこで我々はこれらの問題を克服することができる積層配線 TES カロリメータを産総研と共同でインハウス製作している (Ezoe et al. 2015 IEEE TAS)。我々は Ti と Au の二層薄膜を用いた 20×20 ピクセルの積層配線 TES カロリメータの開発を行っている。これまで、正常な超伝導転移を実現し、現在この転移温度の制御を目指している。転移温度は基本的に Ti と Au の膜厚比で決定されるが、Ti の膜厚が大きすぎると近接効果が効きにくくなり転移温度を下げるのが難しい。今後は TES の制作プロセスにおける転移温度の変化なども測定し、測定環境に合わせた転移温度を決定する。本講演では、これら開発状況について報告する。

28 ひとみ衛星搭載 SXS 波形弁別機能の軌道上検証

安田 仰 (埼玉大学 田代・寺田研究室 M1)

X 線天文衛星「ひとみ」は、2016 年 2 月 17 日に打ち上げられた日本で 6 番目の X 線天文衛星である。ひとみ衛星に搭載されている 4 つの検出器のうちのひとつ軟 X 線分光検出器 (Soft X-ray Spectrometer ; SXS) は、入射 X 線の光子エネルギーを吸収体の温度上昇として測定する X 線マイクロカロリメータを受光部にもつ。SXS では受光部を 50 mK という極低温下

で動作させることにより、6 keV 帯域において、5 eV の高エネルギー分解能を実現した。

SXS における一連の信号処理部のうち、デジタルデータを扱う部分は Pulse Shape Processor (PSP) と呼ばれる。PSP はデジタル変換された温度変化の波形データをテンプレート波形を用いた最適フィルタ処理をすることで、入射光子のエネルギーを 1/1200 の精度で求めることができる。

しかし、検出されたイベントの中には複数のイベントの重畳や、ピクセル外への X 線の入射、熱的・電氣的な混線による非正規イベントなど、正確なデータ解析のために除去すべきものが含まれる。先行研究 (加藤修士論文、高橋卒業研究) では 2015 年 5 月に筑波宇宙センターで行われた 熱真空試験時で得たデータを用い、上述のような特徴をもつ非正規イベント群を確認し、それらが実装された波形識別フラグによって除去できることを検証した。

本研究では、宇宙線等の影響が考えられる実際の軌道上のデータを用いて、(1) 先行研究である地上試験での非正規イベントの弁別方法の有効性を検証し、さらに、(2) 軌道上でのみ確認された新たな非正規イベントの検証を行った。特に (2) については、その事象の特定の時間に集中するという特徴的な性質と、そこから考えられる原因について議論する。

1. M.Tsujimoto and M.Tashiro, 「Pulse Shape Processor (PSP) Description Document」, 2016
2. 加藤 優花, 修士論文「ひとみ衛星搭載 X 線マイクロカロリメータ用 波形処理装置による光子弁別の検証」, 2017
3. 高橋海斗, 卒業論文「ひとみ衛星搭載波形処理装置における波形信号の弁別検証」, 2017

29 チェレンコフ望遠鏡と CTA 計画

Kobayashi Yukiho (東京大学 宇宙線研究所 M1)

超新星残骸での粒子加速やガンマ線バーストなど、宇宙には様々な高エネルギー現象が満ちている。これらの現象に伴う高エネルギーガンマ線を地上で観測するのが解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) である。IACT が検出対象とする高エネルギーガンマ線は、地球大気に入射すると大気中の原子核と相互作用して、電子陽電子からなるシャワーを生成する。シャワー中の粒子は空気中の光速を超えるため、チェレンコフ光を放射する。IACT の各望遠鏡は反射鏡を持っており、そこに入射したチェレンコフ光は集光され、焦点面の PMT カメラでイメージングされる。複数の望遠鏡で得られたイメージを組み合わせることで、ガンマ線の到来方向を高い精度で再構成するとともに、その光量からエネルギーを推定することができる。ガンマ線以外の宇宙線もバックグラウンドとして観測されるが、チェレンコフ光のイメージを解析することで 99.9 % 以上取り除くことが可能である。カメラで得られる信号は後段の電子学

で処理されるが、チェレンコフ光の信号は数ナノ秒と短く、また夜光バックグラウンドの影響を抑える必要もあるため、高速の読み出し回路が求められ、エレクトロニクスにも工夫が凝らされている。また突発天体に対応するため、望遠鏡の向きを素早く変えられるドライビングシステムや反射鏡の調整機構が開発されている。 IACT はこれまでに多様なガンマ線源を検出したが、検出された天体数は限られており、粒子加速のメカニズム等の多くの問題は未解決である。現在建設中の次世代 IACT である Cherenkov Telescope Array (CTA) は既存の IACT の感度を一桁向上させるとともに、大中小口径の望遠鏡を適切に配置することで 20GeV 300TeV の広いエネルギー帯域をカバーする。CTA が完成すれば、1000 以上の高エネルギーガンマ線源が見つかることとされ、ガンマ線天文学におけるブレイクスルーが期待されている。本講演では以上のような IACT の観測技術を概説するとともに、CTA について紹介する。

1. CTA-Japan Consortium Cherenkov Telescope Array 計画書 (2014)

30 すばる望遠鏡のレーザートモグラフィ補償光学装置のためのソフトウェア開発

櫻井 大樹 (東北大学 天文学専攻 M2)

我々のグループではすばる望遠鏡の補償光学のアップグレードを目的とした、4つのレーザーガイド星を用いたトモグラフィ補償光学装置 (LTAO) の開発を行なっている。すばる望遠鏡には AO188 と呼ばれる 1つのレーザーガイド星を使った補償光学が実装されているが LTAO が実装されると AO188 では補正しきれなかった可視光領域まで補正をかけることが可能になる。補償光学では 1つのレーザーガイド星から光を波面センサーを用いて波面測定を行い波面の情報から補正を行っている。LTAO の波面センサーには CMOS カメラが使用されるが CMOS カメラにはローリングシャッターと呼ばれる CMOS 特有の読み出しモードが採用されている。このモードでは露光と読み出しを 1行ごとに行うため、一枚の画像の中で行ごとに時間軸は異なる。我々が現在開発している補償光学装置に使用する CMOS カメラでは 256 × 256 のフレームで最大 1.2448ms の露光時間軸のずれが実験から測定されている。LTAO では 700Hz から 1kHz の周波数で補正を行うためローリングシャッターによる 1フレーム内の時間軸のズレが補正エラーに影響することが考えられる。本発表ではローリングシャッターの影響と、その影響を補正するアルゴリズムについて紹介し、我々が開発を行っている LTAO 装置のソフトウェア開発の現在の状況について報告する。

31 銀河構造の進化にせまるすばる望遠鏡トモグラフィ補償光学

大本 薫 (東北大学 天文学専攻 M1)

地上からの観測の空間分解能は地球大気のゆらぎによって大

きく制限されており、天体から望遠鏡への入射光の波面の乱れをリアルタイムに補正することにより、地球大気のゆらぎの影響を補正し、望遠鏡の回折限界を達成する技術を補償光学という。レーザーガイド星補償光学を現状よりもより短い波長域である可視光でも実現し、より高い空間分解能を実現するために、我々の研究室ではすばる望遠鏡トモグラフィ補償光学の開発を進めている。銀河の形態の確立過程を調べるため赤方偏移 1 付近までの銀河について高い空間分解能で内部の星の運動状態を明らかにすることを計画している。本発表ではトモグラフィ補償光学で予想される観測性能についてまとめ、現在の開発状況と今後の展望について報告する。また銀河進化研究会での議論において触れられた様々なサイエンスケースへの応用についても紹介する。

32 機械学習を用いた突発天体の選択

浜崎 凌 (甲南大学 M1)

超新星のような突発天体や明るさが変動する星のような変動天体、小惑星のような移動天体は発生する以前の画像では検出されていないが新規画像には天体が現れているので、新規画像から以前の画像を差し引くことで検出する。この差分画像法で得られた天体画像には、天体だけでなく宇宙線や明るい星周りのスパイク、不正確な天体の位置合わせや不正確な画像畳み込みによる偽検出が数多く含まれている。1.77 平方度の広い視野をもつ、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いて 2014 年 3 月から始まった Strategic Survey Program (SSP) では、このような偽検出の混ざった突発天体の候補数が 10^8 にも達すると予想されている。数時間から数日のタイムスケールの突発天体の一例である、超新星のショックブレイクアウトが放つ可視光の閃光の時間変化は、一夜間の観測中に検出される。このような突発天体の初期段階を見つける機会を高めるには、このような偽検出の中から本物の天体現象を正確かつ迅速に選択することが重要である。そこで HSC-SSP サーベイにおいては、突発天体を選択するために機械学習の技術を導入している。本発表では、機械学習によって突発天体の選択を行い、性能を評価した参考文献に示した論文のレビューを行う。この論文では、機械学習の手法としては AUC Boosting、Random Forest、Deep Neural Network を用いており、これらを組み合わせて用いることで、観測条件の変化に対してロバストであることを報告している。

1. Mikio Morii, et al., Machine-learning Selection of Optical Transients in Subaru/Hyper Suprime-Cam Survey (2016)

33 せいめい望遠鏡の分割主鏡制御に用いる波面センサーの開発

鈴木 教真 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

近年、TMT（口径 30m）のような大型の望遠鏡の開発が進んでいる。望遠鏡の主鏡は、口径が大きいほど集光力が増して空間分解能も高くなるが、10m を超えるような巨大な鏡は製作や輸送が非常に困難であるため、大型望遠鏡では、複数の鏡を組み合わせて使う分割主鏡型が主流となっている。現在我々京都大学が岡山に建設中の、せいめい 3.8m 望遠鏡も分割主鏡型である。分割鏡の場合、個々の鏡の大きさは 1~2m であり比較的容易に製作可能であるが、架台に配置したときに隣同士の鏡の間に段差や傾斜が存在し、また、分割鏡自体の熱変形や重力変形により、形状が歪んでしまうため、各分割鏡の理想位置・形状からのズレを検出し、補正するシステムが必要となる。一般的には、分割鏡を 1 枚の巨大な鏡として機能させるためには、分割鏡の位置・形状を波長の 1/10 程度で制御する必要がある。

せいめい望遠鏡の主鏡制御に用いる波面センサは、分解能 $\pm 0''.11$ 、測定レンジ $\pm 1200''$ を必要とする。すなわち、ダイナミックレンジが 5 桁にも及ぶため、単一の光学系では実現が困難である。そこで我々は測定の流れを、広域モード、詳細モード、多点モードという 3 つのモードに分け、低次から高次の波面傾斜へと段階的に補正していく方針を取っている。広域モードではディフレクトメトリ方式の一種を、詳細・多点モードではマイクロレンズアレイを用いたシャックハルトマン方式を採用しており、いずれのモードでも、光源の像の重心の理想位置からのズレを測定し、それをもとに波面傾斜を算出および補正する。また、多点モードでは分割鏡の形状の測定も行う。本研究では、広域モード用のセンサと詳細・多点モード用のセンサの開発およびそれらの性能評価を行った。

本講演ではせいめい望遠鏡についての概要を述べた後、分割鏡の傾斜・形状測定の方法および測定の精度について発表する。

34 太陽上空磁場測定のための近赤外線偏光観測用カメラの冷却システムの開発

石塚 典義 (国立天文台 M2)

太陽上空の磁場を測定するための、近赤外偏光観測用のカメラシステムの開発を行っている。Teledyne 社の HAWAII-2RG を用いて、高速 (35fps)、大フォーマット (2k×2k)、低ノイズなカメラを目指している。観測波長は、HeI の $1.083\mu\text{m}$ や FeI の $1.6\mu\text{m}$ であり、そのため、カットオフ波長 $1.7\mu\text{m}$ の素子を利用する。冷却システムへの要求は、(1) 暗電流を抑えるため -110°C 以下に冷却することと、(2) 検出器の破損を防ぐため冷却時や昇温時の温度変化を 1 分あたり 1°C 以内に抑えること、である。そこで、スターリング冷凍機を用い、冷凍機への供給電力を制御して、この 2 つの要求を満たすように検出器の冷却・昇温を行うシステムの製作を行った。

まず、冷凍機を最大出力で動かして、冷凍システムの到達可能温度を測定したところ、 -135°C となった。また、検出器からの熱 1W を模擬してヒーターで加熱すると、温度が 13°C 程度上昇した。よって、検出器を搭載して動作させたとしても、 -120°C を達成できることがわかった。なお、検出器からの熱 1W に

は検出器が動作することによる発熱と、検出器読み出し回路からケーブルを通して伝導する熱や、熱吸収率が上昇することによって窓などからの放射から追加で受け取る熱を含んでいる。一方、1 分間に最大で 8.4°C 下がり、昇温時は 1 分間に最大 3.0°C 上昇した。よって、温度制御が必要となった。次に、冷却時にえられた温度情報から、真空容器内での熱流量の計算を行い、それを実証するための実験を行なった。その結果、内部の温度計やヒーターと接続している導線からの熱伝導と、窓からの熱放射が、支配的な熱流入となり、熱流入の合計は 0.8W となった。さらに、温度計からの情報を自動で取り込み、制御を行うプログラムを作成した。これを用いて実験したところ、冷却、昇温を安全な温度変化の範囲内で行うことに成功した。このとき、 -130°C への冷却に 3 時間半かかった。昇温時は、 0°C になるのに約 3 時間、 15°C になるのに約 4 時間かかった。

35 野辺山 45m 電波望遠鏡用電波カメラの超伝導検出器 MKID の雑音評価

小野 雄太 (筑波大学 宇宙観測研究室 M1)

銀河の形成、進化過程を調べるには近傍の銀河の観測に加え、遠方にある銀河の観測が重要である。遠方の銀河は可視光での観測は困難であるが、覆われているダストからの放射が赤方偏移によって長波長側にシフトしたミリ波、サブミリ波と呼ばれる周波数領域で効率よく観測することができる。また、天空のどの位置にあるのか分からない遠方銀河を検出するために重要な観測装置が一度に広い視野を観測できる多素子電波カメラである。さらに、高感度なカメラを開発することができればより遠くの銀河が観測可能になる。

そこで遠方銀河の広視野、高感度での観測を実現するために、野辺山 45m 電波望遠鏡に搭載する 100 GHz 帯超伝導電波カメラの開発を進めている。電波カメラの検出器には、Microwave Kinetic Inductance Detector : MKID と呼ばれるマイクロ波帯で動作する超伝導共振器を開発している。本研究では開発した MKID について感度の指標となる Noise Equivalent Power : NEP の測定からダーク環境での雑音性能の評価を行った。MKID の超伝導体にはアルミニウム (Al) を用いており、3 インチシリコンウェハ上にアレイ化された 109 素子のうち 18 素子の測定を行った。MKID を高感度で動作させるために 0.1 K 以下へ冷却する必要がある。そこで国立天文台先端技術センターの 0.1 K 希釈冷凍機を用いて冷却し、NEP の導出で必要となる Q 値、MKID の応答性、準粒子寿命、共振周波数での雑音の測定を行った。

まず、得られた Q 値は 83 mK にて $1.6 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$ となった。検出器温度を $100\text{ mK} \sim 340\text{ mK}$ まで変化させ各温度での共振周波数を測定することで MKID の応答性を調べた。また、準粒子寿命の測定には宇宙線を利用し $206 \pm 26\ \mu\text{s}$ となった。これらの結果から導出したダーク環境における 100 Hz での 18 素子の強度読み出しの NEP は $6.6 \times 10^{-17} \sim 4.8 \times 10^{-16}\text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、位相読み出しの NEP は $4.4 \times 10^{-17} \sim 6.6 \times 10^{-16}$

W/\sqrt{Hz} となった。実際の観測では大気の雑音の限界である $10^{-16} W/\sqrt{Hz}$ 以下の NEP が求められるが今回得られたダーク環境の結果では要求値に近い値を得ることができた。

1. 中井直正, 坪井昌人, 福井康雄. 宇宙の観測 II-電波天文学, シリーズ現代の天文学, 第 16 巻. 日本評論社, 2009.
2. 久松俊輔. 野辺山 45m 電波望遠鏡搭載用超伝導電波カメラの観測システムの開発. 修士論文, 2016
3. J.Baselmans, S.J.C.Yates, R.Barends, Y.J.Y.Lankwarden, J.R.Gao, H.Hoevers, T.M.Klapwijk. Noise and Sensitivity of Aluminum Kinetic Inductance Detectors for Sub-mm Astronomy. J Low Temp Phys (2008) 151: 524-529

36 NANTEN2 におけるマルチビームシステムの開発

奥田 想 (名古屋大学 天体物理学研究室 (A 研 M1))

我々は、全天 70% の領域をカバーする超広域 CO 分子サーベイである NASCO (NANTEN2 Super CO survey as legacy) 計画を推進している。シングルビーム受信機での観測は、NASCO 計画の目的である全天観測するには時間がかかりすぎてしまう。そのため、マルチビーム受信機の導入と効率化のための高速スキャンモードの検討を進めている。また、それに対応した新システムの開発が要求される。全天データを扱うために開発されたデータ形式である、HEALPix を導入した。HEALPix では天球をひし形のマップで分割しており、それぞれのマップの面積が等しく、歪みが出ないこと、座標系に直交しないことが大きな特徴である。([1], 2005, p.5-7) このひし形を 1 つのマップとしスキャンパターンを検討する。また、マルチビーム受信機で観測すると、ローテータがないことによる視野の回転や、ビームパターン、ビームスクイントが原因で生まれる歪なマップののりしろが形成される。のりしろを考察することは、マップを連結していく上で重要なポイントである。以上の点から、新たなスキャンパターンの検討をした。HEALPix を導入することで、これまでの駆動とは異なる駆動を要求される。ひし形に分割したマップは座標系と直交しないため、駆動の際加速と減速を細かく繰り返す必要があり、負担が大きくなる。これに対応したシステムの開発を行なっている。また、マルチビームを導入するとローテータがないため、全てのビームが同じ場所を見る。そのため 1 秒あたりの積分時間が減り、データレートが大幅に増大する。このデータの増加に対応するため ODA (Optical Disk Archive) でのデータ保存に変更し、NASCO のデータレートに対応できることを確認した。

本講演では、新たなスキャンモードを含めたマルチビームシステム開発について報告する。

1. K. M. Gorski, E. Hivon, A. J. Banday, B. D. Wandelt, F. K. Hansen, M. Reinecke, and M. Bartelmann, HEALPix:

A た FRAMEWORK FOR HIGH-RESOLUTION DISCRETIZATION AND FAST ANALYSIS OF DATA DISTRIBUTED ON THE SPHERE, The Astrophysical Journal, 622:759-771, 2005 April 1

37 電波領域の点回折干渉計による新しい波面測定法

奥村 大志 (筑波大学 宇宙観測研究室 D2)

本発表では電波望遠鏡における新しい鏡面測定の方法として、点回折干渉計 (PDI) を用いた波面測定法を提案する。

PDI は一般に光路中に入射波面を乱さない程度に十分小さな回折体を置くことで構成され、回折体によって生じる球面波は入射波面の情報を持たないきれいな波 (参照波) となり、入射波面の情報を保持した波 (試験波) との干渉像を得る。参照波の位相を変調することで数通りの干渉像を得て、これらの干渉像を演算することで波面情報を引き出す。可視赤外線分野では、中心に周辺部とは偏光特性が異なるピンホールを持つ偏光ビームスプリッタ (PPBS) により参照波と試験波を同一光学系内に伝搬させ、さらに検出器直前で異なる位相の干渉像を空間的に並べて作る光学素子 (フェイズマスク) を利用した PDI ([1]) や、PPBS の透過と反射の両方を利用し、サバル板等の光学素子を用いて干渉像を作り出す PDI ([2],[3]) が提案されている。

本発表では、既に提案されている PPBS を用い、受信機内部で位相変調や干渉を行わせる、新しい電波領域の PDI を提案する。電波領域の強みとして位相変調や干渉を回路上の信号処理として行うことが出来るため、使用する光学素子を PPBS とレンズ 1 枚のみとした非常に簡素な光学で波面測定を実現できる利点がある。さらに本研究では、既存では提案されていなかった焦点面における波面測定に注目した。波面測定には瞳面と言われる光学的に決まる位置の波面情報が必要なため、既存の PDI では瞳面に検出器を置き干渉像の測定を行っている。焦点面と瞳面の複素電場分布 (強度 + 位相) はフーリエ変換の関係にあることから焦点面での測定から波面の推定が可能であり、実質 PPBS の入れ替えのみで観測と波面測定の入れ替えが可能であると考えられる。

1. J. Millerd, N. Brock, J. Hayes, M. N. Morris, M. Novak and J. Wyant.
2. H. Imada, T. Matsuo, K. Yamamoto and M. Kino.
3. K. Yamamoto, T. Matsuo, H. Imada and M. Kino.

38 COMING 自動データリダクションシステムの開発

田中 隆広 (筑波大学 宇宙観測研究室 D2)

銀河の進化を星形成の観点から理解する場合、星の材料である分子ガスの分布や総量、物理的性質を理解することは極めて重要である。しかし銀河全体の分子ガスについての撮像観測はサンプル数が少なく、系統的な議論をするには不十分である

という状況が続いていた。そこで、COMING(CO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies) プロジェクトは野辺山 45m 電波望遠鏡に搭載された FOREST 受信機 [1] を用いて、130 個を超える近傍銀河について一酸化炭素分子輝線 ($^{12}\text{CO}(1-0)$, $^{13}\text{CO}(1-0)$, $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$) の大規模な撮像観測を行った。同様なサーベイプロジェクトと比較して、観測された天体数は単一のプロジェクトとして過去最大である。このような単一鏡を用いた銀河の撮像観測では、1 天体あたり数万～数十万個のスペクトルを足し合わせることで電波写真が作られる。ただし、観測で得られたスペクトルデータの中には大気の変動やその他の要因による質の悪いデータが含まれており、それらを除去しなければ信頼度の高い観測結果は得られない。質の悪いデータを取り除くことをフラグと言ひ、従来ではデータの良し悪しを人間の目によって判断していた。このフラグ作業は解析者個人の経験や判断基準によるためデータの均質性及び再現性を担保できず、加えて多大な時間と労力を要するという問題があった。従来のような少ないサンプル数ではフラグの試行錯誤でデータの質を高めることに注力され上記の問題点の解決は先送りになっていたが、大規模サンプルのサーベイを遂行するにはこれらの問題が大きな障壁となる。そこで本プロジェクトは、この問題を解決するために、解析者の主観によらない定量的な判断基準を設けることで自動的にフラグを行い電波写真を生成する手法を開発した。

1. Minamidani et al. 2016, Proc. SPIE 9914, 99141Z

39 CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD の光学系の測定

高倉 隼人 (国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 M1)

インフレーション仮説は宇宙の誕生直後に指数関数的な膨張が生じたとする説であり、標準宇宙論では説明できない種々の問題を解決する有力な理論である。同仮説では、膨張前に存在したごく僅かな時空の揺らぎが引き延ばされて原始重力波を生じ、この影響を受けた光子が宇宙マイクロ波背景放射中 (CMB) に特殊な偏光パターン (B モード偏光) を作る事が予測されている。

LiteBIRD は、CMB を精密に観測して B モード偏光を探索することで同仮説の検証を目指す衛星であり、宇宙科学研究所の次期戦略的中型計画の候補に選定されている。CMB の精密観測には広帯域での観測が不可欠である一方、銀河面からの放射の影響を減らすため、望遠鏡のサイドローブレベルを十分小さく抑えることが要求される。私たちのグループはこれらを両立する光学系の開発に取り組んでおり、検証試験ではサイドローブレベルを正確に測定することが重要となる。

私は当面の研究課題として、望遠鏡のスケールモデルのサイドローブレベル測定に取り組んでいる。測定では、フィードホーンの位置を変えながら光学系へミリ波を入射させ、ビームパターンを得ればよい。この際、フィードホーンの電気特性が

測定精度に影響するため、内側に多数の溝を設けることで広帯域にわたり良好な振幅・位相特性を実現した、コルゲートホーンを用いる予定である。

現在は測定の準備段階にあり、測定精度向上を目指してホーンの改良に取り組んでいるほか、測定結果として期待されるビームパターンのシミュレーションを行っている。今回の発表では、望遠鏡のビームパターンや改良したホーンの特性について、電磁解析ソフトウェアを用いてシミュレーションを行った結果について報告する。

1. M. Hazumi et al. LiteBIRD: A small satellite for the studies of B-mode polarization and inflation from cosmic background radiation detection, Proc. SPIE 8442, 2012