

2019 年度 第 49 回 天文・天体物理 若手夏の学校
観測機器分科会 アブストラクト

金子 大輔 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構) 7月31日 17:00–18:00 B会場

宇宙マイクロ波背景放射観測の現状

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) はその発見以降宇宙論上の重要な情報を与え続けている。近年はインフレーション宇宙の証拠となる B モード偏光の検出を目指して国際共同実験間の競争が繰り広げられている。講演では CMB の物理と観測の歴史の紹介ののち、現在と近い将来行われる実験の状況を紹介する。特に講師が参加する POLARBEAR 実験に関しては現地での体験も含め詳しく説明する。

高田 淳史 (京都大学 理学研究科 宇宙線研究室) 8月1日 14:30–15:30 B会場

MeV ガンマ線天文学の現状と SMILE 計画

数百 keV から数十 MeV にかけての MeV ガンマ線領域では、原子核の脱励起に伴うガンマ線放射を直接観測できる唯一の帯域である為、元素合成の現場や銀河系内の物質拡散のプロブとして期待されている。これまでに、COMPTEL や SPI/INTEGRAL による観測が行われており、銀河面に広がる ^{26}Al や SN2014J に伴う $^{56}\text{Ni}/^{56}\text{Co}$ のラインガンマ線が検出されている一方で、検出感度は低く検出された天体数は数十と非常に少ない。本講演では MeV ガンマ線の観測で見えてきたものと現状観測の問題点、及び将来計画として進めている SMILE 計画について 2018 年の豪州気球実験の最新結果と合わせて紹介する。

観測 a1 HiZ-GUNDAM 搭載次世代 CMOS 検出器の分光性能および放射線耐性の評価 荻野 直樹 (金沢大学 宇宙物理学研究室 M1)

現在、赤方偏移 $z > 7$ の宇宙の物理状態についてはほとんど理解されていない。ガンマ線バースト (Gamma-ray Burst: GRB) は 10^{53} erg ものエネルギーをガンマ線として放射する宇宙最大の爆発現象であり、初期宇宙を探る有力なプローブとして利用されている。HiZ-GUNDAM は、軟 X 線帯 (0.4–4 keV) での突発天体観測を用いた初期宇宙・極限時空探査計画である。特に時間変動の短い GRB の検出および位置同定を主目的としており、0.1 秒程度の時間分解能と ~ 5 分角の精度の撮像性能が要求される。これらを同時に満足する検出器として Lobster-eye-optics と呼ばれる特殊な X 線光学系と CMOS イメージセンサー (以下、CMOS) を組み合わせた次世代 X 線検出器の開発を進めている。

CMOS のノイズレベルは ~ 0.2 keV @ -20 °C で HiZ-GUNDAM の要求性能を満たす有力なセンサーの候補である。そこで、真空環境下で CMOS を動作させ、低エネルギーの X 線を照射する実験を進めている。その結果、Al の蛍光 X 線 (1.49 keV) はシングルピクセルイベントとして十分に検出可能であることを示した。また、強力な ^{60}Co を用いた TID 実験では 30 krad 照射後も露光時間 0.1 s で動作させることによってダークノイズの影響を抑えることができ、HiZ-GUNDAM の要求を満足することがわかった。現在は 100 MeV の陽子線を 5 krad 照射することにより、粒子線への耐性を評価しておりその結果について報告する。

1. 吉田和輝, 第 44 回 天文・天体物理若手夏の学校, 最遠方 GRB 観測を目指した X 線撮像検出器の開発 (2014)
2. ニコラスツルファニディス, 放射線計測の理論と演習 (上) 基礎編 (1993)

観測 a2 超小型衛星搭載広視野 X 線撮像検出器の熱設計と性能評価 Kim seonyong (金沢大学 宇宙物理学研究室 M1)

2017 年 8 月 17 日、重力波干渉計により中性子星連星の衝突・合体に伴う重力波の放出が観測され、重力波天文学が大変注目されている。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ため、電磁波観測との連携が必要とされる。そこで、金沢大学では重力波観測と同時に放出されると考えられる SGRB の観測を行うために、広視野 X 線撮像検出器を搭載した超小型衛星を開発している。この検出器は観測エネルギー帯域 2-20keV、視野 1 ステラジアン以上、角度分解能 15 分角を実現し X 線突発天体の発生方向・発生時刻を特定することを目標としている。広視野 X 線撮像検出器は方向決定にはランダムな開口パターンをもつコーデッドマスク、ストリップ型シリコン半導体検出器 (SSD)、複数チャンネルの信号を読み

出す高利得アナログ集積回路、そしてデータ処理を行う FPGA から構成されている。この検出器の最適動作温度は -20 °C ~ -10 °C であり、この温度を達成するために熱環境の構築を行った。宇宙空間を模擬した熱真空チャンバーによる実験と、熱数学モデルを用いたシミュレーションの両面から最適動作温度を達成する検出器筐体の設計をした。この結果を用いて、 -10 °C の環境下でフライトモデルの検出器の性能評価を行った。シリコン半導体の空乏層の厚みの測定では、 ^{57}Co や ^{109}Cd を用いて検出器の効率を求め、厚みを算出した。その結果、SSD の空乏層の厚みは約 $410\mu\text{m}$ であったため、十分な検出効率であることを確認した。本講演では金沢大学衛星の科学目標及び検出器の熱環境構築、SSD の空乏層測定実験、そして現在行っているフライトモデルの性能評価実験の結果を報告する。

1. Abbott et al, 2016, Phys.Rev.Lett, Vol. 116, p. 061102
2. Abbott et al, 2016, Phys.Rev.Lett, Vol. 119, p. 161101

観測 a3 X 線 SOI ピクセル検出器の軟 X 線性能評価 児玉 涼太 (京都大学 理学研究科 宇宙線研究室 M1)

2020 年代の打ち上げを目指す次世代天文衛星「FORCE」は、1-80 keV の広帯域において優れた時間分解能・エネルギー分解能で過去にない精密撮像を実現する。我々は、この衛星の 1-20 keV を担当する、SOI (Silicon On Insulator) 技術を用いた X 線ピクセル検出器「XRPIX」を開発している [1]。従来の X 線天文衛星の主検出器である CCD (Charge Coupled Device) はエネルギー分解能・位置分解能共に優れているが、時間分解能は数 s 程度と悪く高速現象の観測に適さない。対して XRPIX はヒットしたピクセルのみの読み出しを可能にするトリガ回路の実装により、 $10\mu\text{s}$ という高時間分解能を実現する。したがって、検出器の周りをアクティブシールドで覆うことで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行うことができる。その結果、20 keV まで低バックグラウンドでの硬 X 線撮像を可能にする。

XRPIX は 6 keV 以上において、要求される分光性能を実現しつつある。一方で軟 X 線は表面照射すると回路層に吸収されるため、裏面 (センサー側) から照射する必要があるが、薄い不感層・高い分光性能を同時に達成する裏面構造は開発途上にある。そこで本研究ではその第一歩として、軟 X 線における性能評価を行う。まず、読み出せる X 線エネルギーの下限を調べる必要がある。トリガ閾値を下げると暗電流やトリガ回路起因のノイズを拾うようになり、検出効率が大幅に落ちてしまう [2]。本研究では、F-K α (0.68 keV)、Al-K α (1.49 keV) 等の X 線に対して、トリガ閾値に対する検出効率を測定する。さらに、下限付近での単色 X 線に対する分光性能 (エネルギー分解能、テール構造など) を調べる。エネルギーや吸収位置に対する依存性を考察し、必要であれば裏面構造の改良を検討する。本講演では以上の計測により軟 X 線性能を評価した結果と考察を発

表する。

1. T.G.Tsuru, et al., Development and performance of Kyoto X-ray astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor, Proc. SPIE9144 (2014) 914412.
2. 奥野 智行, 京都大学, 2019, 修士論文.

観測 a4 CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD の偏光変調器に向けた広帯域反射防止構造のレーザー加工技術開発とその光学評価

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 M2)

宇宙開闢を記述するインフレーション理論は原始密度揺らぎと原始重力波を予言し、原始密度揺らぎは宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度異方性観測から証明された。原始重力波は現在未発見だが、CMB に B-mode という偏光パターンを生成した。そこで科学衛星 LiteBIRD では原始重力波由来の B-mode を観測し、インフレーション理論を検証する [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 45 cm 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、信号の 5 割ほどを反射してしまう。また CMB の観測帯域も 34~161 GHz と広帯域なので、この帯域で 9 割以上の透過率を得る反射防止膜が要求される。そこで生体模倣を利用して蛾の目の構造 (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媒質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。LiteBIRD 用にスケールすると、構造ピッチ 0.54 mm 以下、構造高さ 2 mm 以上の構造を直径 45 cm サファイア基板の表面に作製しなければならない。私は超短パルスレーザーを用いた加工と新たな加工法の開発により、大面積カバー法と加工時間、加工時の構造破壊、広帯域反射として最適な構造の形成法といった問題を一挙に解決した。加工時間ではこれまで 45 cm 径内を加工するのに 2.33 年かかる予測だったが、2.5 ヶ月まで短縮可能になった。また透過率測定では、40~181GHz の帯域で 9 割以上の透過率を得られることを証明した。今後はより低周波側の改善のためのパラメータ最適化とともに、LiteBIRD 実機サイズのサンプルを実際に作製するための準備を進めていく。

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)

観測 a5 CMB 偏光観測に用いる TES 性能評価における環境・手法の開発

西ノ宮 ゆめ (東京大学 理学系研究科物理学専攻 日下研究室 M1)

初期宇宙や宇宙進化の理解を深めるために、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) の B モードの偏光観測が進められている。全天からほぼ等方的に観測される CMB の無偏光成分のスペクトルは 2.7 K の黒体輻射と良く一致しているが、数度の角度スケールに見られる CMB の偏光成分の揺らぎは数十 μ K と非常に小さい。この揺らぎの起源は、量子揺らぎがインフレーションによって引き延ばされた宇宙の初期揺らぎであると考えられている。CMB の揺らぎを精密に測定する目的で、CMB 観測の望遠鏡には超伝導転移端センサー (Transition Edge Sensor; TES) が多数使用されている。このセンサーは、超伝導の転移温度付近における急峻な温度抵抗値変化を読むことによって微量の熱を検出するマイクロカロリメータであり、光を吸収すると温度が上がるボロメータ内の温度計として用いられている。我々のグループは、チリのアタカマ砂漠に建設中である地上望遠鏡 Simons Observatory (SO) の開発に取り組んでいる。SO などの次世代実験のために開発された TES の性能評価を行って感度を精密に測定することは、CMB 偏光の系統誤差を見積もるのにとっても重要である。そこで、TES の性能の評価環境や評価手法を考え、望遠鏡の運転温度である 0.1 K 付近で TES の温度依存性を調べた。本講演では、TES の動作原理を紹介し、性能の測定状況について報告する。

観測 a6 Simons Observatory CMB 偏光測定実験に向けたスパースワイヤーを用いた偏光校正装置の開発

村田 雅彬 (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 日下研究室 M1)

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic microwave background :CMB) は E モードと B モードと呼ばれる 2 種類の偏光を持っている。E モード偏光は宇宙初期の密度ゆらぎによって生成され、B モード偏光は原始重力波によって生成される。そのため、B モード偏光はインフレーション期の情報を含んでいる。しかし、その偏光の期待される温度は $O(10^{-2})\mu$ K 程度であり、E モード偏光の温度 $O(1)\mu$ K と比べてとても小さい。また、偏光角の同定ができていない場合、E モード偏光は B モード偏光のように見えてしまう。したがって、B モード偏光を測定するためには偏光検出器の校正が極めて重要となる。Simons Observatory (SO) 実験では、直径 6m の大口径望遠鏡 1 台と直径 42cm の小口径望遠鏡 3 台を用いて CMB の観測を行う。特に数角度スケールでの CMB 偏光の測定は小口径望遠鏡を用いて行われる。小口径望遠鏡の焦点面には 1 台あたり約 10,000 個の偏光検出器が並んでおり、これら検出器間の相対的な偏光角と感度を校正する必要がある。今回、SO 実験で焦点面に並ん

だ検出器間の相対的な偏光角と感度を同時に校正する装置を設計した。校正器はワイヤーを柵状に張ったもので、望遠鏡の前方に置き回転させる。光がワイヤーで反射されると偏光され、それを後方の検出器で読み取り校正を行う。この装置は SO 実験での小口径望遠鏡の主要な偏光角・感度校正装置となる。

観測 a7 広視野 X 線集光系の開発

小笠原 健也 (青山学院大学大学院理工学研究科理工学専攻 M1)

現在、連続的に全天を観測できるような衛星として国際宇宙ステーション (ISS) に取り付けられている MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) がある。広範囲を監視することは突発的に変化するような天体の観測に有効であり、今後発展していく重力波天文学に対しても重力波天体の電磁波対応天体の観測のために必要だと言える。しかし、現在の MAXI についている検出器 (GSC と SSC) ではバックグラウンドを低減するために、有効面積が比較的小さく抑えられており、光子統計が足りずに捉えきれないイベントがある。

先行研究では 2017 年 8 月 17 日に起きた重力波イベントの Short-GRB の残光に対して、GSC の感度では、もし発生直後にその方向を見ていたとしても検出できていなかった可能性が高いと考えられている。

そこで我々は、MAXI のように広い視野を持ちつつもより暗い天体を検出可能とするために、広視野を維持したまま X 線を集光することができるような光学系の開発を目指している。

X 線は屈折率が 1 よりわずかに小さいため、屈折系での集光ができない。そこで全反射を用いて集光する必要がある。また、全反射の臨界角も 1° 程度と小さいため X 線の入射角を浅くする必要がある。反射面の物質によってエネルギー毎の反射率も異なるので素材の選定も重要である。

本研究では、Geant4 を用いて X 線集光系のシミュレーションを行っている。まずは、X 線の全反射過程が Geant4 上で正しく行われているかを確かめるためシンプルなモデルでシミュレーションを行った。また表面粗さを考慮する計算モデルが 2 つあり、どちらを採用するか決定するため、タングステン薄膜ミラーに対する X 線反射率を測定する実験を行った。

本発表ではシミュレーションの設定、結果及び実測値との比較結果について発表する。

1. Sugita et al.(2018) MAXI upper limits of the electromagnetic counterpart of GW170817

観測 a8 湾曲 Si 結晶を用いたブラッグ反射型偏光計の性能評価

芳野 史弥 (中央大学 天体物理学研究室 M1)

X 線天文観測において、撮像、測光、分光観測の性能は飛躍的に向上されてきたが、偏光の観測機器の開発は、その波長の短さ故に技術的に難しく、今も試行錯誤が続いている。X 線偏

光観測が行えるようになると、ブラックホール近傍の幾何などの解明に繋がると期待されている。我々は、鉄輝線が含まれる帯域の X 線偏光を高いエネルギー分解能で測定すべく、ブラッグ反射の原理を利用した、湾曲した Si(100) 結晶と炭素繊維強化プラスチック (CFRP) から成る回転放物面形状の反射鏡と、中央に配置した X 線 CCD カメラによる、5.5 - 8.0 keV に偏光感度と X 線カロリメータ程度の高いエネルギー分解能を持つ新たな X 線偏光計の開発を行っている。

我々は回転放物面反射鏡の 1 象限を作成し、偏光性能評価を行った。偏光性能の指標であるモジュレーションファクター (M 値) は、鏡に反射した偏光光のカウント数の最大値と最小値から算出される。偏光光のカウント数の最大値と最小値を求めるには、2 象限分の鏡が必要になるため、足りない領域は sin カーブによるフィッティングで補った。その結果、M 値は 89.9% 以上と得られた。

M 値をより正確に求めるためには、偏光光のカウント数の最大値と最小値を実測する必要がある。そこで、偏光方向を回転させられる偏光光を 1 象限の鏡に照射することで擬似的に実測する実験を行う。中央大学には、偏光方向を回転させられる二結晶分光器を搭載したビームラインがあるため、このビームラインを用いて実験を行っている。

本公演では、これまでの結果と、今後の実験方法について発表する。

観測 a9 1.85m 電波望遠鏡 新光学系の開発進捗 山崎 康正 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

星形成過程を解明する上で、その母体である分子雲を観測することは非常に重要である。分子雲を構成する最も基本的な分子の一つである CO 分子からは、温度や密度など物理状態の分布を探ることが出来る。我々大阪府立大学は口径 1.85m の電波望遠鏡を国立天文台野辺山宇宙電波観測所に所有しており、これまで 230GHz 帯に存在する CO 同位体 ($J = 2 - 1$) の 3 輝線同時観測を実施してきた。現在、さらに詳細な分子雲の物理状態を調べるべく、本望遠鏡を南米のチリへ移設し、これまで観測してきた輝線に加え、300GHz 帯の CO ($J = 3 - 2$) の合計 6 輝線同時観測を実現する計画が推進されている。そのためには望遠鏡システム全体を広帯域化する必要があり、私は受信機システムの一部である光学系の広帯域化に取り組んでいる。

光学系とは自由空間を伝播する電波を受信機に導くビーム伝送系であり、一般にミラーとフィードホーンで構成される。本望遠鏡ではナスミス・カセグレン方式を採用し、パラボラ鏡から副鏡、平面鏡、楕円鏡を経てコルゲートホーンまでのビーム伝送系を組んでいる。本計画における光学系の開発項目は大きく 2 つある。1 つ目はビームの焦点の位置が周波数依存性を持ち、広帯域観測に適していないことである。そこで Frequency-Independent Matching 理論を適用させた光学系を設計し物理光学シミュレーションを行なった。その結果、210 *sim* 370GHz に渡って 70% 以上の開口能率が実現可能なこと

が分かった。2つ目は300GHz帯においてホーンの反射損失が大きく、望遠鏡の感度が落ちてしまうという点である。そこで溝の幅、深さを最適化することによって300GHz帯でも高い利得を得ることを目指した。その結果、比帯域55%の広帯域なコルゲートホーンをシミュレーション上で実現させた。本講演ではそれらの結果と今後の展望について報告する。

1. Onishi, T., et al. 2013, PASJ 65(4),78(1-13)
2. TA-SHING CHU., et al. 1983, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL.AP-31, NO. 4

観測 a10 マイクロマシン技術を用いた Lobster eye X 線光学系の試作

湯浅 辰哉 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

宇宙 X 線観測では天体の画像を取得し、集光するため望遠鏡を用いる。従来の衛星では、回転放物面と回転双曲面でそれぞれ1回の全反射によって集光結像する WolterI 型が広く用いられてきた。相補的な手法として、甲殻類の目のような四角穴が格子状に並んだ構造で垂直な壁での2回反射で集光結像する Lobster eye 光学系が近年、注目されている。側壁での1回反射の影響で Wolter I 型に比べて、集光像が1点ではなく十字を作るが、広視野を実現しやすい利点を持つ。

そこで私はマイクロマシン技術を用いた Lobster eye 光学系の試作を行った。これまで我々のグループでは同じ製作技術を用いて WolterI 型光学系を開発してきた。Si 基板にドライエッチングで微細穴を開け、高温アニールで側壁の平滑化を行った上で、高温塑性変形で球面状に変形する。同じプロセスを用いることで、原理的に Lobster eye 光学系の試作が可能である。一方で、Lobster eye 光学系は WolterI 型光学系と比べて、穴が四角穴であり、円周状でないことから、エッチング条件が異なる。また穴構造が異なることによって変形条件も異なることから試作による条件出しが必要となる。

私はドライエッチングと変形の条件出しを行い、直径4インチのSi基板に、穴幅30 μ m、壁厚10 μ m、深さ300 μ mの格子状微細穴をエッチングで形成し、曲率半径1045mmの球面変形に成功した。そして製作した Lobster eye 光学系に対して JAXA 宇宙科学研究本部の30mビームラインにて Al K α 1.49 keV の X 線を照射し、十字型の集光像を確認した。本発表では、製作原理と実験結果、性能向上への課題について発表する。

1. Ezoe et al. 2010, Microsys. Tech., 16,1633
2. J. R. P. Angel, "Lobster eye as X-ray telescopes", 1979

観測 a11 電鍍技術を用いた飛翔体搭載用 X 線望遠鏡開発

竹原 佑亮 (名古屋大学 X 線グループ (Ux 研) M1)

宇宙 X 線は宇宙に多く見られる高温・高エネルギーのプラズマを観測する手段として用いられ、X 線結像系は観測感度向上のため開発が進められてきた。X 線結像系には直入射システムの利用が難しく、1度以下の非常に小さな角度で入射させる斜入射光学系が用いられる。これまで日本の X 線望遠鏡はアルミニウムを基板とした多数の薄板反射鏡を同心円状に配置した多重薄板型を用いてきた。これは大きな有効面積を持つが1枚の反射鏡が薄く軟らかいため反射鏡面の形状が悪く、結像性能は分角程度に限られてきた。

我々は高い結像性能の実現のため電鍍技術に着目した。電鍍は原盤に金属をメッキし分離させる方法で、ナノレベルの高い転写性を持つため、高精度形状が期待できる。これまで我々は高精度原盤の製作を目指した切削・研磨工程、高精度原盤から電鍍鏡を脱型するまでの電鍍工程の条件出しを進めてきた。高精度電鍍原盤として実績のある NiP に加えて脱型工程を省略できるポリメタクリル酸樹脂を原盤材質として選定した。単結晶ダイヤモンドを用いた切削に通常研磨を行なったところ、表面粗さは NiP で1 μ mスケールで1-3 nm(rms)を達成したが、100 nmスケールで切削痕が見られ、X 線照射試験により結像性能の劣化を招いていることが分かった。この切削痕改善のため NiP に磁気粘弾性流体を用いた研磨を行い、切削痕の除去に成功し、30 μ mスケールにて表面粗さ0.6 nmを達成した。また、電鍍工程では両原盤を用いて全周2段1体型の Wolter-I 型反射鏡製作には成功したものの端面の真円からのズレが200 μ mと大きいため、さらなる条件出しが必要となっている。

1. 大塚修論 2018

観測 a12 IACT における機械学習を用いたガンマ線とハドロンイベントの弁別

立石 大 (埼玉大学 宇宙物理実験研究室 M1)

20 MeV 以上のエネルギーを持つガンマ線が大気に侵入すると、電子と陽電子を対生成し、大気シャワーを発生させる。この電子・陽電子の持つ速度が大気中の光速を超えることによってチェレンコフ光を発生させる。GeV 帯域以上の超高エネルギーガンマ線の観測では、このチェレンコフ光を撮像することによってガンマ線の到来方向とそのエネルギーを決定する方法が有効である。この方法には解像型大気チェレンコフ光望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope: IACT) が使用される。一方で、主にハドロンによって組成される高エネルギー宇宙線が大気中に侵入した際にも、大気中の原子核との相互作用によって大気シャワーを引き起こし、ノイズとなるチェレンコフ光を放射する。宇宙線はガンマ線より1000倍多く到来することから、IACT を用いて精度良くガンマ線の観測を行うためには、宇宙線由来の大気シャワーイベントを除外する必要がある。ガンマ線とハドロン由来のシャワーでは、大気シャ

ワウの幾何学構造が異なることから、撮像されるチェレンコフ光の形状にも差異が生じる。これらを弁別するに当たっては、最近では機械学習を用いることが一般的である。現在、多数の学習手法が日々研究開発されており、IACTの感度を上昇させるためには、学習手法毎の特性を考慮して適切な学習方法を選択する必要がある。本発表では、IACTを利用した観測にてガンマ線とバックグラウンドとなるハドロン由来のイベントでのシャワー構造の違いを紹介した後、機械学習を使用したガンマ線とハドロン由来のイベントの弁別について説明する。また、複数の先行研究の結果から学習手法を変化させたときの弁別能力の差異について議論し、現在建設が進められている次世代ガンマ線観測望遠鏡群である Cherenkov Telescope Array (CTA) 実験において、感度を上昇させるために最適な学習方法について検討する。

観測 a13 放送静止衛星を用いた BS アンテナのビームパターンの測定

政井 崇帆 (国立天文台 M1)

近年、天文教育などで BS アンテナを用いた太陽電波の観測など、天体の電波観測が行われている。そのほとんどは市販の BS アンテナを使用している。電波観測を行う際、アンテナの受信ビームパターンを含め、多くのパラメータが観測の精度に影響を与える。しかし、市販の BS アンテナは、本来強い電波源からの電波を受信するためビームパターンにはほぼよらず、問題なく使用できる。そのため、ビームパターンを精密に測定していないことが多い。BS アンテナを天体観測に用いる場合、天体の信号が衛星電波よりも弱く、かつ点源ではなく、構造を持っている場合がある。この時、天体の電波分布とアンテナのビームパターンがカプリングをするためビームパターンを理解する必要がある。

アンテナパラメータの測定に衛星電波を用いた測定があり、ビームパターンや反射鏡の表面誤差などの測定が可能である。衛星電波を用いる利点として、アンテナ直径に比べて衛星までの距離が十分遠く、多くの場合点源とみなせる。また、衛星軌道は精密に計算されており、静止衛星の場合、位置が変わることがなく、衛星を基準にアンテナを振って電波を受信することができる。

本研究では、市販の Offset feed 型の BS アンテナ (日本アンテナ CBS50A, 50cm) のビームパターンを測定した。放送静止衛星 BSAT を電波源 (RCP, 12GHz) とした簡易的なアンテナ受信ビームパターンの測定方法を確立した。観測に必要なアンテナ、駆動機構および受信感度を記録する環境を構築した。評価するために、測定したビームパターンから半値幅を求め、 $4.1 \pm 0.0 \pm 0.2$ 度となった。理論値の 3.4 度と比較すると 21% のずれが生じた。ずれの原因には測定系の誤差、Offset feed 型と受信機ビームパターンとのカプリングなどが考えられる。

本講演では、上記のビームパターンの測定手法と測定結果について発表を行う。

観測 a14 超小型衛星搭載用中性子・ガンマ線検出器の開発

野橋 大輝 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M1)

我々が住む地球には宇宙から粒子が日々降り注いでおり、それらを総称して宇宙線と呼ばれている。宇宙線の発生源の中でも最も地球に近い天体として太陽が挙げられ、フレアによる粒子加速機構の解明のために太陽中性子を対象とした観測が地上の中性子モニターで行われてきた。中性子は太陽表面、太陽地球間の磁場に影響せず観測することができるが、地球大気中で相互作用してしまい減衰してしまうため地上での検出が困難であり、これまでの検出数は限られている。そこで我々の研究グループでは宇宙空間と地上からの太陽中性子同時観測観測を行うための超小型衛星搭載用中性子・ガンマ線検出器の開発を行っている。

検出器は、多層プラスチックシンチレータバーと GAGG シンチレータアレイで構成され、宇宙線が入射した時の飛跡を 3 次元的に捉えることができ、特に中性子とガンマ線を観測対象としている。プラスチックシンチレータバーのサイズは $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 64\text{mm}$ であり、これを 16 本 1 層として互い違いに 1 層ずつ組むことで計 256 本の $64\text{mm} \times 64\text{mm} \times 64\text{mm}$ の中性子検出器を構成し、GAGG シンチレータ 12×12 アレイの上部に配置する。またセンサ部には光電子増倍管とほぼ同等な機能を持つコンパクトな MPPC と呼ばれるシリコン半導体光センサーを利用し、シンチレータバーの両端から読み出すことにより長さ方向に位置分解能を持たせることができる。約 670 にも及ぶ系統のセンサの読み出しは、低消費電力の集積回路 (ASIC) で行われ、ASIC からのデジタル化された信号は FPGA で処理される。現在、ASIC と FPGA を搭載した信号処理ボードの要素試作モデル (BBM) を製作し、試験中である。本講演では、我々のプロジェクトの概要を解説するとともに、プラスチックシンチレータや GAGG シンチレータを信号処理 BBM で読み出した時の性能評価結果を報告する。

1. Yu, X. X., H. Lu, G. T. Chen, X. Q. Li, J. K. Shi, and C. M. Tan (2015), Detection of solar neutron events and their theoretical approach, New Astron.
2. Watanabe, K. Solar neutron events associated with large solar flares in solar cycle 23. Nagoya, University of Nagoya, 2005, Ph.D. thesis.

観測 a15 雷由来のショートバースト解明に向けた DAQ システムのアナログ回路部の高速化と MPPC の応用検討の研究

久富 章平 (名古屋大学 X線グループ (Ux研) M1)

自然現象である雷は、天然の粒子加速器であり雲中で静電場加速された電子が制動放射することによってガンマ線が出ると言われている。Enoto et al 2017 より、雷由来のガンマ線には

1s 未満の減衰時間のショートバーストがあり、これは雷放電に同期した減衰時間が 1ms 未満の突発的な 10MeV ガンマ線と、それが大気中の分子と光核反応を起こし、発生した中性子が中性子捕獲された際に放射される即発ガンマ線 (50 ms 程度) からなると分かった。冒頭の突発ガンマ線は、人工衛星から観測されている地球ガンマ線フラッシュ (TGF) と同種の放射が地上に向かっていていると考えられる。この場合その減衰時間が 100 μ s と短く、GROWTH 実験に使用された ADC では、遅すぎて有効に観測できない。本研究では、GROWTH 実験での DAQ システムのアナログ回路部を高速化改修することにより、カウントできる電気信号の数を増やしかつパイルアップによるスペクトルの乱れを防ぐことを目的とした。また、光電子増倍管に代わり、小型 (~ 6 mm) で動作電圧が小さく (~ 40 V) で増倍率 ($10^5 \sim 10^6$) が高く時間分解能も高い優れた光子計数デバイスである MPPC (Multi-Pixel-Photon-Counter) の利用したさらなる多チャンネルの高速検出器の開発も検討している。将来的には超小型衛星を用いた宇宙からの TGF からの多点観測にもチャレンジしたいと考えており、その検討状況を報告する。

1. Enoto et.al, Nature volume 551, pages 481-484 (23 November 2017)

観測 a16 せいめい望遠鏡における SHWFS を用いたシーイング評価

円尾 芽衣 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

我々の研究グループは、口径 3.8 m のせいめい望遠鏡の開発・建設を行ってきた。国内という立地と東アジア最大の口径とを生かして、せいめい望遠鏡は系外惑星の直接撮像などを目指している。系外惑星の直接撮像のためには補償光学を用いるが、その装置開発のためには、観測所のシーイングを高精度で求めることが重要である [1]。

従来シーイングは Differential Imaging Motion Monitor (DIMM) 装置での測定結果とコルモゴロフ乱流の理論モデルとから測定される。DIMM は一定間距離を開けた二つの望遠鏡に見立てた開口からなる。ここに同一天体光を入射させ、星像の重心から大気の変動による揺らぎを計算できる。しかし DIMM の開口間距離が固定であり、コルモゴロフ乱流だと近似的に仮定するしかない点が問題である [2]。

一方 Shack-Hartmann 波面センサ (SHWFS) 装置を用いると、コルモゴロフ乱流の仮定を置かなくてよいため、より高精度でシーイングを測定できると考えた。SHWFS はまず平行光を稠密に設置したマイクロレンズアレイ (MLA) へ導く。MLA により入射した光の波面はそれぞれ検出器上に結像するため、これを DIMM の開口が一定間隔にたくさんある状態のものに見立てると、複数の開口間距離での揺らぎを求めることができるため、コルモゴロフ乱流を仮定しなくともシーイングを測定できる。

本研究では SHWFS 装置を用いて、せいめい望遠鏡のシーイングの測定を計画・実行し、得られた結果を従来の方式と比較検討した。結果、SHWFS を用いたシーイング測定では従来の方式とほぼ同じ 1.5 秒角となった。本講演では SHWFS を用いたシーイングの測定方法、および測定精度のコルモゴロフ乱流を仮定した場合との比較について発表する。

1. Martinez, P., Kolb, J., Sarazin, M., & Navarrete, J. RAS, 421, 3019 (2012)
2. Yong Zhang, Dehua Yang, and Xiangqun Cui, Appl. Opt. 43, 729-734 (2004)

観測 a17 太陽アクシオン探索のための TES 型 X 線マイクロカロリメータの特性評価 八木 雄大 (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)

宇宙に広がる暗黒物質の存在はさまざまな観測結果から示唆されているが正体は解明されていない。暗黒物質の候補として、量子色力学により存在が期待されている未知の粒子アクシオンが挙げられており、我々はなかでも太陽内部で生成される太陽アクシオンの探索を目的としている。太陽から放出されたアクシオンが ^{57}Fe に衝突し 14.4 keV の γ 線を放射するであろうことを利用し [1]、吸収体に ^{57}Fe を用いた超伝導遷移端温度計 (Transition Edge Sensor; TES 型) X 線マイクロカロリメータの開発を進めている。TES 型カロリメータは吸収体に入射した光子のエネルギーを熱に変換し、その際の急激な抵抗変化として測定する検出器である。従来の半導体検出器では自己吸収などにより検出効率が数 % 程度と極めて低く、またバックグラウンドの影響により検出感度も悪かった [2]。一方、TES 型カロリメータは自己吸収した熱を検出するため検出効率を 87% まであげ、高いエネルギー分解能により検出感度も大幅にあがると考えられる。 γ 線の吸収効率を向上させるためには吸収体の量を多くする必要があるが、量を多くするとエネルギー分解能の劣化に繋がる。また、超伝導薄膜を用いているため、強磁性体である ^{57}Fe の磁化により遷移温度や分光性能などに影響を与える可能性がある。そこで我々は構造の最適化および磁化の影響を検討するため、熱および磁気シミュレーションをおこない適切な基礎設計を構築した。その結果、 $100 \times 100 \times 5 \mu\text{m}^3$ の大きさの吸収体を用い、従来では TES に直接取り付けられていた吸収体を、TES 本体から横へ 30 μm 以上離して取り付けることで、エネルギー分解能を劣化させず磁化の影響を排除できることがわかった [3]。このような TES 型カロリメータの製作は初めてのため、実物の特性を評価する必要がある。我々は実際に素子を作成し、超伝導遷移端における抵抗と温度の特性を測定した。本発表ではその結果について議論する。

1. S. Moriyama. Proposal to Search for a Monochromatic Component of Solar Axions Using ^{57}Fe . Physical Review Letters, 75:3222-3225, October 1995.

2. T. Namba. Results of a search for monochromatic solar axions using ^{57}Fe . Physics Letters B, 645:398-401, February 2007.
3. 前久景星. 太陽アクシオン探査をめざした TES 型マイクロカロリメータの基礎的研究, 修士論文, 東京大学, 2018.

観測 a18 X 線マイクロカロリメータ動作のための極低温環境と読み出し系の構築 清水 里紗 (埼玉大学 宇宙物理実験研究室 M1)

我々は次世代 X 線天文衛星搭載に向けた X 線マイクロカロリメータの開発を行っている。X 線マイクロカロリメータは、入射した光子 1 つ 1 つのエネルギーをセンサー素子の温度上昇として計測する「温度計」であり、高い分光能力 ($E/\Delta E \geq 1000$) を持つ。特に、広がった天体に対しても性能が劣化しないことから、将来の X 線分光検出器の中でも注目されている。

カロリメータの分光能力は動作温度に強く依存し、安定した極低温環境下 (~ 100 mK) で動作させることが必須である。我々は、宇宙の微小重力環境下で安定した極低温環境を作るために断熱消磁冷凍機 (ADR) の開発を行なっている。ADR は磁性体に磁場を印加してエントロピーを下げ、断熱状態にした後に磁場を取りさって冷却を行う。我々は、ADR を自作し、安定な極低温環境の構築を目指している。センサー素子として、超伝導と常伝導間の遷移端での大きな抵抗変化を温度計として用いる TES 型を用いている。TES 型は、定電圧で動作させることにより、素子の抵抗変化を微小な電流変化として読み取ることができる。この微小な電流変化を読み出すため、電流計として超電導量子干渉計 (SQUID) を用いている。

我々は、自作した ADR の冷却性能の評価及び SQUID のノイズ評価を行った。冷却性能評価では、最低到達温度の設計値 ~ 250 mK には到達しなかったものの、500 mK までの冷却は可能となった。原因としては、極低温ステージへの熱流入が $0.6\sim 0.9$ mW と見積もり値よりも $15\sim 23$ 倍大きかったことが考えられる。4 K ステージ上に置かれた SQUID のノイズは $I_N = 1\sim 10$ nA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (周波数帯域 $10^2 \sim 10^5$ Hz において) となり、外部電源からのノイズが支配的であった。今後は、配線及び輻射による侵入熱の軽減や、外部電源を含めたグラウンド環境の整備を行なっていく予定である。

観測 a19 SXDB の銀河内未知線源解明に向けた半導体サーミスタ型 X 線マイクロカロリメータ読み出し系の改良 平野 航亮 (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 M1)

約 1keV 以下の X 線で見た宇宙背景放射 (SXDB) には、30 年以上も議論されているにも関わらず未解決の謎が存在する。X 線観測衛星の ROSAT で得られた SXDB のうち 0.4-1keV の M-band と呼ばれる帯域の強度は、活動銀河核などのローカルな構造を除くとほぼ一様である。しかし、M-band は銀河面

に存在する大量の中性物質により吸収され、1 kpc 程度しか透過できない。つまり、銀河面内の 1kpc 以内に M-band の強力な線源が遍在することになる [2]。従来の CCD を用いた観測では、エネルギー分解能が 120, eV と低く特性 X 線の特定が難しかった。

この問題に一石を投じたのが 1999 年に Wisconsin 大学の Dan McCammon 研究室でおこなわれた観測ロケット実験 [1] である。このロケットには半導体サーミスタ型 X 線マイクロカロリメータと呼ばれる検出器が搭載されている。これは X 線光子のもつエネルギーによる温度上昇を、半導体の大きな抵抗値変化として読み取る X 線分光検出器で、非常に高いエネルギー分解能を誇る。このロケット実験においても 5-12, eV という高解像度を叩き出した。そして得られた結果は、M-band のほとんどは酸素由来の輝線である、という革新的なものであった。

だが、視野の狭さや観測時間の短さ、そしてノイズにより具体的な天体の特定には至らなかった。同研究室では衛星搭載も視野に入れてカロリメータの抜本的な改良をおこなっている。

私は同研究室の研究員として、このカロリメータの改良に携わった。主に X 線信号を増幅する回路を改良し、製作やノイズ評価を担当した。これにより、得られる X 線シグナルが埋もれないために要請される低雑音を達成できることが分かった。

本発表では、現在 SXDB の解明のために進行しているプロジェクトについて紹介するとともに、具体的な改良内容とその意義について概説する。

1. MCCAMMON, Dan, et al., The Astrophysical Journal, 2002, 576.1: 188.
2. COX, Donald P., Annu. Rev. Astron. Astrophys., 2005, 43: 337-385.

観測 b1 1.85m 電波望遠鏡搭載に向けた局部発振器系による中間周波数帯への影響調査 横山 航希 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

我々、大阪府立大学宇宙物理学研究室は長野県野辺山の国立天文台宇宙電波観測所に設置されている口径 1.85m 電波望遠鏡を開発・運用している。主に星形成の母体となる分子雲をトレースする基本的な分子である一酸化炭素の同位体 ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O ($J = 2 - 1$) の 3 輝線で、銀河面や主要な星形成領域の観測を精力的に行ってきた。現在、我々の望遠鏡をチリへ移設する計画が進行中であり、 CO ($J = 2 - 1$) に加えて CO ($J = 3 - 2$) の輝線やその他の微量分子を同時観測する、広帯域な受信機を開発を進めている。この広帯域同時観測により、分子雲が高密度な領域で CO の 2 つの励起線から、温度などの物理量の解析誤差を減少させることができる。さらに、近年の観測で分子雲の広域に分布されていることが指摘されつつある微量分子の状態まで同時に観測することが可能となる。

現在の受信機では IF 帯域が 4 - 8GHz と狭帯域であるが、近年の開発により IF 帯域が 4 - 21 と広帯域化されており、広

帯域受信機ではこれを取り入れる (Kojima et al. 2017)。これによって、多輝線を同時に観測することが可能となるが、LO 信号が IF 帯域に混入してしまうことが懸念される。例えば、225GHz の LO 信号を出力する場合、6 x 3 通倍の系を用いると、SG から $225\text{GHz}/18 = 12.5\text{GHz}$ の信号を出力する必要があるが、IF 信号には 225GHz から 12.5GHz 離れた部分にスプリアスが発生する可能性がある。このスプリアスを確認するために、広帯域な常温評価系を用いて測定を行なったところ、6 通倍器でこれを確認することができた。現在は低雑音で広帯域な SIS 受信機を用いた 200GHz 帯の冷却評価系で IF 帯域に混入するスプリアスを調査するとともに、対策案の検討を進めている。本講演では、1.85m 電波望遠鏡のチリ移設計画の概要と、LO 信号が IF 帯域に混入して発生するスプリアスの調査の経過を報告する。

1. T. Onishi et al. 2013, PASJ, 65, 78
2. T. Kojima et al. 2017, IEEE, vol. 7, No. 6

観測 b2 Small-JASMINE の星像の end-to-end シミュレーション

桶屋 誠人 (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)

小型衛星 Small-JASMINE とは国立天文台が中心となって 2024 年の打ち上げを目指している主鏡口径 30, *mathrmcm* 級、質量 400, *mathrmkg* 程度の赤外線位置観測衛星である。Small-JASMINE のミッションの概要としては主に、(1) 可視光では観測困難であり未解決なことが多い銀河系中心核バルジ領域に対して、バルジ星およびディスクの星の視差と固有運動を測定、(2) 位置天文パラメータをカタログとして世界同時公開、(3) 銀河系探求を通じての銀河の形成と進化の解明である。またハビタブルゾーンの系外惑星の探査への利用も検討されている。

Small-JASMINE では、指向観測での撮像を繰り返すことによる位置天文観測を行う。位置天文学とは星の撮像観測を行い、その観測で得た天体の天球面上での位置の時間変動 (時系列データ) とそこから導かれる年周視差と固有運動等の位置天文パラメータを供出する天文学の一分野である。しかし実際の星の年周視差の大きさは非常に小さいため、いかに高精度で測定できるのかが鍵となる (最終的に 20, *mathrm, muas* の精度を目標としている)。そのためには、衛星の歪みや不安定性などについて何がどれだけ問題になるかをシミュレーションで検討しなければならない。その一部を担当すべく私は望遠鏡が歪んでいる時にどのような PSF ができるのか、つまり衛星で天体を見ようとした時にどのように像がブレるのかの計算をおこなっている。本講演では理想的なレンズの場合と鏡に製造誤差、指向のゆらぎがある場合について行ったシミュレーションの結果を報告する。今後は温度ゆらぎなどの条件も検討しシミュレーションを行う予定である。

観測 b3 赤外線高分散分光器 VINROUGE : セラミック製軸外し非球面ミラーの開発

木村 成美 (京都産業大学 M1)

京都産業大学の神山天文台では、宇宙の分子形成史を紐解き生命の起源を明らかにする上で重要な微弱な星間有機分子を高感度で検出することを目指した赤外線高分散分光器 “VINROUGE” の開発を進めている。^[1] VINROUGE は波長域 2.1~5.3 μm のスペクトルを最大波長分解能 80,000 とこれまでにない高スループット 38% で取得可能な観測装置である。同装置の光学系は、極低温環境下 ($T\sim 35\text{K}$) において準回折限界の高い光学性能が要求されるが、一般に高精度の光学性能を実現するには、冷却時の温度環境によるミスアライメントや光学部材の熱歪等の影響を補償するための多くの時間と費用を要する。そうした問題を回避するため、我々は光学ミラー/ホルダー/光学定盤のすべてをゼロ膨張材であるセラミック材・コーズライトを用いるモノリシック反射光学系を同装置に適用することを提案している。その光学系の実現に向けて、発表者はロボット研磨法^[2]による高精度の軸外し非球面ミラーの製造技術の開発と製作した非球面ミラーの測定系の開発を行っている。ロボット研磨とは産業用ロボットを応用した研磨方法で、軸外し非球面も含む高精度自由曲面ミラーを球面ミラーと同コストで研磨できるという利点がある。まず、ロボット研磨の適用性を確認すべく、球面ミラー (R609.6mm, $\phi 76.2\text{mm}$) の修正研磨を試験的に実施したところ、約 20 分間の研磨で面精度 85.4nm (PV 値) を達成し、構造関数においても空間周波数 0.5~100 nm^{-1} の範囲で 2.8~18nm (rms) (目標値は < 9~27nm (rms)) に収まる研磨が実現できていることが分かった。測定系の開発においては、大型ミラーを市販の干渉計に取り付けて測定可能にする干渉システムの開発を行っている。ミラーの自重による重力変形を避けるために縦型のタワー構造を基本とし、度々問題となる振動の防止機構や、あらゆる焦点距離のミラーが測定できるように分解・伸縮が可能な機能を有している。発表では、研磨試験の詳細結果と測定タワーの特徴および性能評価結果までを紹介する。

1. Sarugaku, Y. et al. (2018), Proc. SPIE, 10706, 107063P
2. Tonnellier, X. et al. (2013), Proc of LAMDMAP

観測 b4 超長時間滞空気球に搭載する広視野ガンマ線イメージャの開発

峰 海里 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M1)

我々は超長時間滞空気球に搭載する広視野ガンマ線イメージャを開発している。

宇宙 X 線・ガンマ線は地球大気により吸収されてしまうため、観測装置は人工衛星や気球に乗せて高い高度へ運ぶ必要がある。気球はコストの低さ、準備期間の短さ、回収・改良の容易さの点で人工衛星に優っている。我々は NASA で開発された

超長時間滞空気球の技術を用いて高度 30km で 1 ヶ月の飛翔観測を行うことを想定している。

この気球に搭載するガンマ線イメージャは、CdTe-DSD、その上に配置するコーデッドマスク、それらを囲むシールドで構成される。CdTe-DSD は縦 32mm, 横 32mm, 厚さ 0.75mm の CdTe 半導体の両面に、幅 0.2mm の Al と Pt のストリップ電極が直交するように 0.25mm ピッチで 128 本ずつ配置したもので、16384pixel を持つ。CdTe はバンドギャップが 1.44eV と比較的大きく、大規模な冷却機構を必要としない。コーデッドマスクは半数のガンマ線を透過させ、残りを遮蔽するような穴が空いており、検出器の像とマスクパターンの相関を計算することで、より高精度の位置特定を可能にする。シールドは宇宙空間を飛び交う高エネルギー陽子、背景放射、大気で生成された 2 次ガンマ線等によるノイズを除去するためのもので、今回は鉛等の原子番号の大きい物質で検出器を囲うことにした。シールドの厚みがあるほどノイズの遮蔽効果は大きくなるが、気球への積載重量・体積に制限があるため、できる限り軽量化・コンパクト化する必要がある。

我々はモンテカルロ法を用いて、気球への搭載条件という制約の下、高い分解能が得られるようなコーデッドマスクの位置・シールドの形状・配置の計算を行いながら、そのような検出器を製作中である。さらにその性能評価のため、検出器から離れた位置に数 10keV の強度の異なるガンマ線を放射する非密封線源を複数配置し、そのイメージを撮影することで線源をどの程度分離できるのか確認することを計画している。

今回は装置製作の詳細及び性能評価の詳細について述べる。

観測 c1 ペルチェ素子を用いた X 線 CCD 冷却システムの構築

鎌田 恭彰 (関西学院大学 M1)

我々は、超小型衛星 ORBIS 搭載される CCD 素子冷却システムの開発を行っている。

現在、宇宙には他の銀河と衝突を繰り返すことによってあらゆる大きさに成長してきた銀河が存在している。しかしこの成長のメカニズムは現代物理学では説明できない部分が存在し、その一例に 銀河中心に存在すると言われる大質量ブラックホール (BH) の衝突合体がある。このメカニズムを解明するために超小型衛星 ORBIS の開発が首都大学東京を中心に行われている。ORBIS の目的は 2 つの BH が連星を成し回転している状態にあるバイナリブラックホール (BBH) と呼ばれる天体の探査である。ORBIS の観測対象波長域は X 線であり、観測機器として X 線 CCD が用いられる。しかし、X 線 CCD には X 線が入射していない状態でも流れてしまう温度依存性を持つ電流が流れる。よって、精度の高い観測を行うには CCD の冷却は不可欠である。本衛星の素子の冷却には小型衛星ゆえの電力の制限を考慮し、ペルチェ素子を用いる。

本研究では、衛星搭載レベルの冷却システムの構築を目的とした実験を行った。本実験では 10 - 3Pa 程度の真空に引いた

チェンバー内にヒートシンクを設置し、その上にペルチェ素子、アルミブロック、CCD の順で設置し冷却を行った。ヒートシンクには、チラーで外部から -20 °C の冷却水を循環させ、温度測定には K 熱電対を用いた。ペルチェ素子は FerroTec 社製の 2 段式ペルチェ素子 2020/157/070B を用いた。ペルチェに 72W の電力を与えることで CCD 上面の最高到達温度 -74.6 °C を達成し、測定環境の改善により目標温度 -80 °C を達成する見通しがたった。

観測 c2 CMOS イメージセンサの X 線分光性能評価 由比 大斗 (関西学院大学 M1)

はじめに現在から 56 年前に日本の「あすか」衛星で初めて X 線 CCD による撮像分光が実現して以降、X 線 CCD は X 線天文分野において標準検出器となっている。しかし X 線 CCD は信号電荷を転送するのに数 sec 程要するため、時間分解能に乏しく、非常に明るい天体を見ることはできない。そこで、X 線 CCD と同等の空間分解能を持ち、また X 線 CCD に比べて 1000 倍程度良い時間分解能を持つ可視光用の CMOS イメージセンサに注目した。近年、読み出しノイズが 1 2e- と非常に低ノイズな CMOS イメージセンサが開発された。本研究では可視光用 CMOS イメージセンサのエネルギー分解能と検出効率を調べ、X 線 CCD に代わる観測装置としての可能性を検証する。実験と解析実験は Andor 社製の ZylasCMOS を用いて行なった。線源は、Fe55(Mn-K α , Mn-K β)、Co57(Fe-K α , Fe-K β)、Cd109(Ag-L α , Ag-K α) を使用した (括弧内は線源から放出される X 線の種類)。線源は受光面から約 0.5cm 離れた場所に設置し、露光時間 0.05s、フレームレート 1fps で 97 フレームのデータを取得した。取得したデータを Python を用いて分析し、スペクトルを作成し、エネルギー分解能を求めた。また、イベント数から、検出効率も求めた。

観測 c3 太陽観測ロケット実験 FOXSI-3 用両面ストリップ CdTe 検出器の性能評価 長澤 俊作 (東京大学 カブリ数物連携宇宙機構 M1)

太陽、それは地球から最も近い恒星であるが、依然として謎も多い。例えば光球の表面温度 6000 K に比べ太陽コロナは 100 万 K とはるかに高温であるが、現在観測されている全てのフレアのエネルギーではコロナの加熱に必要なエネルギーの一部しか説明できていない。しかし、これまでの観測感度以下のナノフレアが高頻度で発生していれば、これを説明できる可能性がある。

そこで、硬 X 線帯域においてかつてない感度で太陽を観測し、ナノフレアの痕跡を探し出すことを目指したのが FOXSI(Focusing Optics X-ray Solar Imager) ロケット実験であり、これまで 2012 年、2014 年、2018 年と 3 回の打ち上げに成功している。この 2018 年の FOXSI-3 実験のために、我々の研究室では、これまでで最も微細な 60 μm のストリップピッチを持つテルル化カドミウム半導体の両面ストリップ検出器

(CdTe-DSD) を新たに開発・性能評価を行った。その結果 60 keV のピークで半値幅 1.2 keV と高いエネルギー分解能を実現した。また、複数のストリップにまたぐイベントの処理によってピッチ幅以下 50 μm 程度の位置分解能を確認した。その一方でこれまでは見えてこなかった検出器の新たな性質が発見された。CdTe 半導体では電子・ホール移動度が低いために電荷収集効率に深き依存性が現れるが、それでは説明出来ない陽極における低エネルギー側へのテール構造が見られたのである。また、原因不明のカウント数、エネルギー分解能の低下が認められるピクセルの存在も明らかとなった。以上の性質を説明できるモデルを構築し、検出器応答関数として反映することが重要である。

本講演では FOXSI-3 実験、CdTe-DSD の概要に加え、新たなモデル構築のために進んでいる解析の現状について述べる。また、100 μm 程度の微細な pinhole を使った追加撮像能力試験を実施し、その結果についても述べたい。

1. E. N. Parker. Nanoflares and the solar x-ray corona. The Astrophysical Journal, Vol.330 (1988)
2. S. Krucker et al. The Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI) :instrument and first flight. Proc.SPIE, Vol. 8862 (2013)
3. K. Furukawa et al. Development of 60 μm pitch CdTe double-sided strip detectors for the FOXSI-3 sounding rocket experiment. Nucl Instrum Methods Phys Res A, Vol. 924, (2018)

観測 c4 JAXA54m アンテナ用 20GHz 帯 ヘテロダイン受信機の周波数 利得 雑音設計 高比良 拓馬 (関西学院大学 M1)

20GHz 帯では水メーザー (22.235GHz) やアンモニア (23.695GHz-25.056GHz 帯) の分子スペクトル線を観測することができる。活動銀河核 (AGN Active Galactic Nuclei) の水メーザーの分子スペクトル線から銀河間の距離を決定し、ハッブル定数を求める事が主な目的である。またブラックホールの質量、AGN の構造もわかる。本研究では 2017 年度まで国土地理院が保有していた、つくば 32m 望遠鏡の 20GHz 帯受信機を解体し、関西学院大学で再設計し再構築したものを 2020 年度に JAXA54m アンテナ (GREAT) に搭載し、試験観測を開始する予定である。そこに至るに当たって、受信機の再設計が必要であり、本研究のヘテロダイン受信機の役割は天体からの電波の増幅 周波数変換 分光解析である。これまでにこれら 3 つのプロトタイプ的设计と開発を行った。これらの概説と今後、搭載に向けた課題の報告を行う。

1. 粉川慶太 筑波大学博士前期課程修士論文 (2010)
2. 中井直正 坪井真人 福井康雄 宇宙の観 II-電波天文学 シリーズ現代の天文学 第 16 巻 (2009)
3. 深宇宙探査用地上局プロジェクト GREAT PROJECT

観測 c5 LiteBIRD 衛星に搭載する超伝導検出器の試験システム開発

加藤 晶大 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科 M1)

宇宙初期を記述するインフレーション理論を検証するために原始重力波を観測しようとする野心的プロジェクトが複数存在している。インフレーション理論が正しいとすると、原始重力波による時空のゆがみによって宇宙マイクロ波背景放射 (CMB: Cosmic Microwave Background) に B-mode 偏光が生じる。この B-mode 偏光の観測が、最も感度の高い原始重力波の検出方法である。地上でも CMB の観測実験は行われているが、大気によるノイズや大気中の水蒸気が CMB を吸収してしまうこと等の困難がある。そこで、より高感度な CMB 観測のために観測衛星 LiteBIRD が提案された。LiteBIRD は宇宙科学研究所により戦略的中型 2 号機に選定され、2027 年頃の打ち上げを予定している。

LiteBIRD に搭載する予定の超伝導転移端センサー (TES) ボロメータは、宇宙線の入射による影響を受ける。これをできるだけ低減する特別なデザインのセンサーが現在日米の共同で開発されつつある。実験室で宇宙線の影響を直接評価することは頻度が少なすぎて現実的ではない。そこで、レーザーを照射するシステムを考え、その開発を行なっている。本講演では、開発するシステムの概要と、開発の初期段階として実施する常温で動作するシリコンストリップ検出器を用いた性能試験について報告する。

観測 c6 画像認識を用いた超新星の検出 浜崎 凌 (甲南大学 宇宙理論研究室 M2)

超新星爆発の瞬間を観測する超高視野突発天体サーベイのプロジェクトが、20[deg²] の視野をもつ木曾観測所の Tomo-e Gozen カメラを用いて行われる。そのプロジェクトの一環として、毎晩数時間おきに夜空を巡回して観測し超新星爆発の瞬間を捉えようとしている。撮影された画像に対して以前撮影された同じ領域の画像との差分をとることで、その時刻間で発生した超新星を迅速に見つけ出すことができる。しかし実際には、差分処理がうまくできなかった天体や宇宙線などの Artifact 天体も写ってしまい、超新星を含めたこれらの天体の数は一夜あたり 2×10^4 天体も見つかる。これらの候補の中から人の目による超新星の発見をサポートするために、画像認識を用いて超新星の候補を選出する開発を進めている。画像認識を行うためには学習器に学習させる超新星の画像データを数万天体用意する必要がある。そこで、試験観測された大量の恒星の画像から得た統計的な光の拡がりや元を人工的な超新星の画像データを作成し学習データとした。Tomo-e Gozen カメラは、84 チップの CMOS センサーで構成されており、画像内の天体の写り方などの検出特性がそれぞれの chip で異なる。そこで特

性を考慮するために、各 chip ごとに学習器の作成を行った。学習を行いテストデータによる評価を行ったところ、最大で $AUC = 0.994$, $TPR = 97.2[\%]$ のとき $FPR = 1.2[\%]$ という結果を得ることができたことにより、一夜あたり 2×10^4 から $\sim 10^2$ 天体まで候補を絞ることを可能にすることができた。

1. Mikio Morii, et al., Machine-learning Selection of Optical Transients in Subaru/Hyper Suprime-Cam Survey (2016)
2. Guillermo Cabrera-Vives, et al., Deep-HITS: Rotation Invariant Convolutional Neural Network for Transient Detection (2017)

観測 c7 補償光学系を用いた大気ゆらぎの高さ分布推定法の開発

大金 原 (東北大学 天文学専攻 M2)

我々はすばる望遠鏡において、レーザートモグラフィ補償光学 (Laser Tomography Adaptive Optics; LTAO) と呼ばれる補償光学を採用することで可視光領域 (波長 700nm) での補償光学を実現する計画を進めている。可視光領域で高い空間分解能が得られるようになることで、 $z \sim 1$ 付近の銀河の面分光観測を、強い吸収線を用いて行うことができるようになり、星形成銀河における薄い円盤形成の現場や AGN によるガスのアウトフローの観測が可能となる。LTAO では、複数のレーザーガイド星を用いることでこれまでの単一のレーザーガイド星では測定することのできない大気ゆらぎの影響を測定し、大気ゆらぎの高さ分解 (トモグラフィ推定) をすることで、波面測定精度を向上させ可視光領域での補償を可能にする。しかし、補償光学におけるトモグラフィ推定は、数十秒角という小さな離角で打ち上げられた 3-4 個のレーザー星の情報から大気構造を推定する必要があるため、情報の縮退度が大きな、悪条件の逆問題となる。そこで、大まかな大気ゆらぎの高さ分布の情報を取得して先験情報として与えることがトモグラフィ推定にとって重要となる (Neichel et al. 2009)。

Tokovinin (1998) において提案された、MASS (Multi Aperture Scintillation Sensor) と呼ばれる方法では、1 つのレーザー星の明るさ変動 (瞬き、シンチレーション) を 1kHz 程の高い時間サンプリングで、複数の開口形状で観測することで大気ゆらぎの高さ分布を推定できる。これまでは専用の小型望遠鏡 (直径 15-20cm) で実践されてきたこの手法を、大型望遠鏡の補償光学系に搭載されているシャックハルトマン型波面センサーを使って実践することにより、補償光学を用いた観測と同じ方向の大気ゆらぎの高さ分布を取得できると考え、手法の開発を行っている。本ポスターでは手法の開発状況を報告する。

観測 c8 補償光学装置における Tip-Tilt mirror 制御の評価

飯塚 悠太 (東北大学 天文学専攻 M1)

地上の望遠鏡にとどく天体からの光は、地球表面を覆う大気層のゆらぎの影響を受け、像がぼやけてしまう。その影響を除去し、シャープな星像を得るのが補償光学装置の役目である。補償光学装置では、ガイド星からの光の波面を高速の波面センサーで計測し、大気ゆらぎの変動がないとみなせるタイムスケールのうちに、光路中の tip-tilt mirror (TTM) や可変形鏡を作動させ補償を行う。現在稼働中の補償光学システムのほとんどが近赤外線観測に特化しているが、我々は、可視光領域での補償光学を狙っている。本研究では、補正システムの内、TTM ループに関してどれだけ高速の補償が可能かを調べるためにボード線図を用いて評価を行った。

大気ゆらぎの変動の速さは、ゆらぎの平均的な大気流速 v (風速) が、フリード長 r_0 (その範囲内で地上に到達した波面は平面波とみなせる範囲) を通過する時間 $\tau = r_0/v$ で表現される。また、フリード長は $r_0 \propto \lambda^{1.2}$ という波長依存性がある。TT mirror は大気ゆらぎでぼやけてしまう像の低次の補償を担っており、波面補正の精度にも影響を与える。TT mirror の制御は $1/\tau$ [Hz]、つまり λ の 1.2 乗に反比例する速度で制御のループを回す必要がある。補償光学が適用できる波長範囲を可視領域に広げるためには、より高速にループを回すことが重要である。

観測 c9 鹿児島大学 1m 望遠鏡用可視光 2 色同時撮像装置の開発

川本 莉奈 (鹿児島大学 M1)

我々は近赤外 3 色同時撮像装置 (以下、赤外カメラ) と併用できる、可視光 2 色同時撮像装置 (以下、可視カメラ) を開発している。

望遠鏡によって集光した光線を、ダイクロイックミラーを用いて赤外線と可視光線に分け、分けた光線のうち可視光線を可視カメラに入射させる。更に、可視カメラの中にもう 1 枚のダイクロイックミラーを配置し、光線を g' band (0.48 μm) と i' band (0.77 μm) に分け、2 台の CCD を用いて赤外カメラと同時に撮像する。

使用する CCD (1024 \times 1024 pixel) の 1 画素のサイズは 24 μm であり、赤外カメラと同等の視野 (10.5 分角) と、ピクセルスケール (0.62 秒角/pixel) を実現するためには、有効焦点距離を 1m 望遠鏡の本来の焦点距離 12 m から 8 m に変換する必要がある。また、リッチー・クレチアン光学系がもつ像面湾曲を補正し、視野全面においてシーイングリミットとなる空間解像度を実現する必要がある。

本研究では、ダイクロイックミラーによる非点収差が最小になるようなウェッジ角度や配置、及び、補正レンズ系の材質や形状、配置などの設計を行った。シミュレーションの結果、視野全面において g' band では RMSradius 7.40 μm (0.19 秒角)、 i' band では RMSradius 14.1 μm (0.36 秒角) のスポットが実現できている。今後、更により良い光学設計の探索、及び、外装

の機械設計、撮像素子冷却方法の検討などを行う予定である。

本講演では可視カメラの光学設計、及び光学性能の評価について報告する。

観測 c10 近赤外線撮像分光装置 SWIMS のための面分光ユニット SWIMS-IFU の開発

榎引 洸佑 (東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 M2)

SWIMS は東京大学がチリのアタカマ高地チャナントル山頂に建設中の TAO6.5m 赤外望遠鏡に搭載される近赤外線撮像分光装置である。近赤外線波長域 0.9~1.45、1.45~2.5 μm の二つの波長帯について二色同時に広い視野 (ϕ 9 分角) での撮像もしくは最大約 30 天体のスリット多天体分光ができる仕様で、昨年度国立天文台ハワイ観測所すばる望遠鏡で両モードのファーストライトを行った。

SWIMS-IFU はその焦点面に挿入することで面分光モードを追加する光学ユニットである。SWIMS 内での保管スペースやロボットアームでのハンドリングの観点から非常にコンパクト (170 × 220 × 60mm³) で軽量 (<900g) である必要があるため、非常に複雑で細かな形状の鏡面を製作しなければならない。さらに各鏡面について形状誤差 P-V=100nm、表面粗さ RMS=10nm という高い精度を達成する必要がある。そこで我々は近年精度が向上しナノメートルスケールでの制御が可能となった超精密切削加工に着目した。試験加工の結果、この手法で必要な平面、球面、楕円面鏡について要求精度が達成されることが確認されたので、今回光学素子の一つであるスリットミラーアレイの本加工を行った。本講演では製作が完了したスリットミラーアレイの評価結果と今後の計画を報告する。

1. Y. Kitagawa et al. Proc. of SPIE 9151 91514P (2014)
2. Y. Kitagawa et al. Proc of SPIE 9912 991225 (2016)
3. Y. Kono et al. Proc. of SPIE 10706 107063F (2018)

観測 c11 IACT におけるガンマ線観測のバックグラウンドとその物理過程

阿部 日向 (東京大学 宇宙線研究所 M1)

宇宙には熱的放射では説明できない GeV-TeV 領域のガンマ線を伴う高エネルギー現象が存在する。昨今の観測技術の発達により観測が可能になり、人類の新しい宇宙への扉が開かれようとしている。地上からガンマ線を観測する方法に解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) による観測がある。IACT は現行のもので MAGIC、HESS、VERITAS があり、2016 年より次世代型として CTA の建設が進められている。

宇宙から飛来したガンマ線が大気中の原子核と電磁相互作用をすることで、電子・陽電子対生成、制動放射によるガンマ線の放射が繰り返され、電磁シャワーを生じる。電子や陽電子が大気中の光速を超える場合にチェレンコフ光が放射される。IACT はこれを検出することによってガンマ線のエネルギーや到来

方向を推定する。IACT の観測においては陽子などのハドロンがバックグラウンドになる。高エネルギーのハドロンは大気に入射すると原子核との強い相互作用により中間子を生じる。特に、崩壊寿命が 10^{-16} 秒ほどである π^0 中間子は即座に崩壊してガンマ線を放射する。これも電磁シャワーを生成しチェレンコフ光として観測される。IACT でのハドロンの検出頻度はガンマ線の 1000 倍以上であるため、このバックグラウンドを精度良く除去することが重要である。ガンマ線とハドロンによるシャワー像の大きな違いはその広がりである。ガンマ線による電子対生成に比べてハドロンと原子核から生じる π^0 中間子の持つ横方向の運動量が大きいことからハドロンはガンマ線に比べて広がったシャワーを作る。この特徴を用いてガンマ線とハドロンを弁別することが可能になる。本発表ではガンマ線とハドロンが大気に入射してからチェレンコフ光を放射するまでの物理過程の違いを示した後、その違いがいかに観測されるチェレンコフ光像に違いを生むかについて定量的な議論を行う。

1. CTA-Japan Consortium. Cherenkov Telescope Array 計画書 (2014)
2. A.M.Hillas. Cherenkov light images of EAS produced by primary gamma rays and by nuclei(1985)