

## CMB 精密偏光観測 LiteBIRD に向けた偏光変調器のための広帯域反射防止モスアイ構造の開発 相澤 耕佑 (東京大学大学院/Kavli IPMU M1)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測は宇宙論における現在の標準理論である  $\Lambda$ CDM モデルを立証している。一方で、モノポール問題や地平線問題などの説明できない観測事実が残っており、インフレーション仮説はこれらを説明すべく提唱されている。この理論ではインフレーション時の時空の量子揺らぎにより原始重力波が生成され、宇宙の晴れ上がりと再電離の際にトムソン散乱を通じて CMB に B モードという特殊な偏光状態を刻むと言われている [1][2]。

インフレーション起源 B モードには角度スケール  $l$  について  $l \sim 90$  と  $l < 10$  の二つにピークを持つ。前者は赤方偏移で  $z \sim 1100$  である晴れ上がり、後者は  $z \sim 6 - 10$  である再電離の頃に CMB に刻まれたものであり、両者の角度スケール間で矛盾のない信号が検知されなくてはならない。そこで地上では到達できない  $l \leq 10$  を含めた観測を実現すべく、地球-太陽第二ラグランジュ点で全天観測をする衛星計画が LiteBIRD であり、テンソル・スカラー比の誤差  $\delta r < 10^{-3}$  の精度で測定することを目指す。

この感度を達成するために LiteBIRD 衛星の低周波望遠鏡に我々が開発している偏光変調器を搭載して CMB 偏光成分に変調をかけ、 $1/f$  ノイズ低減と系統誤差低減を行う。偏光変調器は入射偏波を変調することで観測装置由来の系統誤差の影響を低減することが可能となる。この偏光変調器を構成するサファイア半波長板の広帯域化は、半波長板表面に直接モスアイ構造を加工することで実現する。本講演ではそのモスアイ構造の設計状況と実現した透過率の周波数依存性、そして大面積化に向けた取り組みについて報告する。

1. U. Seljak and M. Zaldarriaga, Phys. Rev. Lett. **78** 2054 (1997)
2. M. Zaldarriaga and U. Seljak, Phys. Rev. D **55** 1830 (1997)

## X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載の X 線 CCD の軟 X 線帯域の検出効率の測定 青木 大輝 (東京理科大学 修士 2 年)

我々は、2023 年度打ち上げ予定の X 線分光撮像衛星 (XRISM) に搭載する軟 X 線撮像分光装置 (Xtend) の焦点面に設置する X 線 CCD 検出器 (SXI) の開発を行なっている。SXI は  $200\mu\text{m}$  の厚い空乏層を持つ裏面照射型の X 線 CCD で、 $0.4 - 13 \text{ keV}$  の帯域で高い検出効率をもつ。X 線 CCD は X 線以外に紫外線や可視光線にも感度があるため、紫外線を遮光する目的として、SXI のフード部分には主成分が Al とポリイミドである CBF (Comptamination Blocking Filter) を取り付けられている。また、可視光線を遮光する目的として、X 線 CCD の

入射面には主成分を Al とした OBL (Optical Blocking Layer) を蒸着している。

しかし、主に  $2 \text{ keV}$  以下の軟 X 線は CBF と OBL によって吸収される。CBF の X 線透過率は既に調べられているので、OBL の X 線透過率が SXI の軟 X 線帯域の検出効率を決める。そして検出効率の測定精度が、SXI で観測する星間ガスによる吸収量や天体の明るさの決定精度を決める。したがって、OBL の厚みから SXI の検出効率を決めることは地上の較正実験として非常に重要である。

我々は OBL の厚さを求めるために、2022 年 3 月と 5 月に X 線の強度が安定している放射光施設である KEK のフォトンファクトリーの BL-11A において、 $0.4 - 1.7 \text{ keV}$  の軟 X 線の照射実験を行った。実験に用いた CCD 素子はフライト素子と同じウエハから製作した小型の X 線 CCD である。X 線の入射角を  $0^\circ$  と、OBL の厚さが見かけ上厚くなる  $50^\circ$  の 2 つの条件で照射した。そして両者の条件で取得する X 線の強度比から OBL の組成と厚みを求める評価実験を行った。これまでに行った解析結果では、OBL の厚さが  $220 \text{ nm}$  程度と求めることができた。本講演では以上の結果について報告する。

## X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器における Goffset の原因究明 青木 悠馬 (近畿大学 M2)

我々は 2023 年度打ち上げ予定の X 線天文衛星 XRISM に搭載する X 線 CCD 検出器 SXI の開発を行っている [1]。CCD に X 線が入射することにより発生する電荷雲は広がりを持ち、複数のピクセルにまたがる場合がある。SXI 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 と呼んでいる。Goffset は SXI のエネルギー決定精度に影響を与える。我々は、CCD における電荷雲の広がりを幾何学的なモデルで再現するシミュレーションを行い、Goffset の主な原因が読み出しノイズであることを解明した [2]。その後、我々は地上試験データとシミュレーションの両方を使い、Goffset のノイズ依存性と X 線エネルギー依存性を詳細に調査した。その結果、ノイズが小さいときは charge sharing の影響が大きいこと、ノイズ依存性は低エネルギー側で顕著であることがわかった。本講演では詳しい解析結果を報告し、Goffset のメカニズムを考察する。

1. K. Mori et al., “Xtend, the soft x-ray imaging telescope for the x-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM)”, Proceedings of SPIE, 2022, 12181, 121811T
2. Y. Aoki et al., “Simulation study of pulse height difference between pixel patterns of X-ray CCDs onboard the XRISM satellite”, Proceedings of science, 2023, 420, Proceedings of 10th International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging

## CMB 精密観測衛星 LiteBIRD に向けた偏光変調器のための低温連続回転機構の開発 秋澤 涼介 (東京大学大学院/Kavli IPMU M1)

現在確立されている標準ビッグバン宇宙論である  $\Lambda$ CDM モデルは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を含む観測結果によって、6 つの宇宙論パラメータで記述される。一方でこのモデルでは地平線問題や平坦性問題、初期宇宙における密度揺らぎなどの観測的事実については説明しない。この事実を解決するために宇宙初期における「インフレーション仮説」が提唱されている。この仮説ではインフレーション中のテンソルゆらぎから「原始重力波」が生じると予言しており、この原始重力波は CMB 分布に特殊な偏光パターン (B-mode) を刻む。現在の代表的なインフレーションモデルでは原始重力波の大きさに対応する「テンソル・スカラー比  $r$ 」を  $r < 0.036$  (95% C.L.) と制限している [1]。

「LiteBIRD」[2] は CMB 偏光パターンを全天で精密観測することでインフレーション起源の原始重力波を探索することを目指した観測衛星であり、テンソル・スカラー比  $r$  の不確かさ  $\delta r < 0.001$  を感度目標とする。CMB 偏光を精密に観測することで、代表的なインフレーションモデルに観測的な制限をもたらす。この感度を実現するために、我々は LiteBIRD 低周波望遠鏡 (Low-Frequency Telescope; LFT) のための偏光変調器 [2] を開発している。これは入射した偏光を変調することによって検出器の系統誤差および低周波ノイズ ( $1/f$  ゆらぎ) を低減する重要な開発項目である。特にこの偏光変調器 5 K の低温下で数 mW の低発熱で駆動することが要求される。本講演では、その中でも偏光変調器用リニアアクチュエータのための高純度導線を用いたステッピングモーターについて、低温での発熱特性の測定結果を報告する。

1. P.A.R. Ade et al., Phys. Rev.Lett, **127** 151301(2021)
2. E. Allys et al., Prog.Theor.Exp.Phys., **2023** 042F01(2022)
3. Y. Sakurai et al., SPIE Conf. Ser, **11453** 114534E(2020)

## 機械学習を用いた半導体ピクセル検出器における X 線イベント判定法の開発 東 竜一 (甲南大学 M1)

現在、X 線天文衛星で主力検出器として用いられている X 線 CCD のデータ処理において、検出されたイベントが、X 線によるものか、荷電粒子バックグラウンドかを判定する方法としてグレード法が用いられている。グレード法とは、各ピクセルで検出した波高値がしきい値を超えた場合イベントとみなし、しきい値を超えたピクセルの配置等から X 線イベントかそれ以

外の荷電粒子イベントかを識別する手法である。しかし、このグレード法では、波高値の空間分布情報を一部しか使っておらず、また、センサの特性、入射する X 線光子のエネルギーごとの電荷の拡がりの違いなどを考慮していない。

そこで我々は検出器に飛来した X 線光子の入射エネルギーと入射光子の座標の決定精度の向上、荷電粒子イベントと X 線イベントの識別精度の向上を目的とし、ニューラルネットワークを使った X 線イベント判定法の開発を進めている。本研究ではまず、ピクセル検出器に X 線光子を入射させるモンテカルロシミュレーションを行い、シミュレーションで取得したフレームイメージから適当なサイズのイベントピクセルを切り抜き学習データとする。その学習データをもとに TensorFlow を用いて、波高値とピクセル配置の関係を学習させる。学習させたニューラルネットワークによる X 線イベント再構成の性能を確かめるため、X 線衛星 XRISM 搭載軟 X 線 CCD 検出器 SXI[1] の実験データを使った検証を行う。本講演では、ニューラルネットワークを用いたことで X 線イベントの識別精度の向上にどれだけの改善が見込めるかを報告する。また先行研究との比較を行う。[2]

1. Tanaka, T., Uchida, H., Nakajima, H., et al. , JATIS, 4, 011211 , 2018
2. Wilkins, D. R., Allen, S. W., Miller, E. D., et al. , SPIE, 12181, 121816S, 2022

## MEMS 技術を用いた広視野 X 線望遠鏡 Lobster Eye 光学系の開発 石川 怜 (東京都立大学 M1)

我々は MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いた独自の超軽量 X 線望遠鏡の開発をしている [1]。直径 10 cm、厚さ 300-500  $\mu\text{m}$  の Si 基板にドライエッチングにより幅 20  $\mu\text{m}$  の微細穴を多数形成し、側壁を反射鏡として利用する。側壁を高温アニールで平滑化し、エッチングの際に形成されるバリを化学機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing; CMP) によって取り除く。さらに高温塑性変形で球面状に変形して集光系とし、反射率向上のために重金属を膜付けする。最後に 2 枚の光学系を組み立てることにより望遠鏡の完成となる。私は本手法を用いた Schmidt 型 Lobster Eye 光学系の開発を進めた。

Lobster Eye 光学系とは甲殻類の目を模倣した格子状の微細穴が球面上に並んだ構造であり、直交する側壁に 2 回反射させて集光結像する。Schmidt 型はスリット状の穴の側壁が直交するように 2 枚重ねて完成する [2]。我々はこれまでにこの光学系の開発を行ってきたが、従来の製作では結像性能を上げるために重要な CMP がプロセスに入っていなかった。そこで私は CMP を考慮した設計および組み立て方法の考案を行った。

私はまず CMP を行う上で必要な厚い基板でも 2 枚の光学系の位置合わせができるような設計を行った。厚い基板を用いる

ため、フォトリソグラフィーで用いる厚膜レジストでパターンニング可能な4箇所の位置に丸穴 ( $\Phi$  1.5 mm) を開け、そこにピンを通して位置合わせをする機構を採用した。そして実際にこのデザインのフォトマスクを用いて、Si(111) 基板をドライエッチング加工して製作した。次に私は光学系2枚の配置のずれによる有効面積、角度分解能の影響を光線追跡計算を用いて定量化した。光学系同士が理想的な配置の場合と比較して、それぞれ10%の劣化までを許容範囲とすると、回転方向で0.06 deg、並進方向で0.25 mmとなった。本講演ではこの光学系の設計と製作、シミュレーションについて報告する。

1. Y. Ezoe et al., Microsystem Technologies, 16, 1633, 2010
2. 作田紗恵, 修士論文, 東京都立大学, 2022

### 野辺山 45 m 鏡搭載 100-GHz 帯 MKID カメラによる大質量星形成領域 W49A の観測データの解析 石崎悠治, (筑波大学 修士課程 1年)

ミリ波サブミリ波帯多素子カメラは遠方銀河等の広域探査において有用である。我々は45 m 望遠鏡に搭載する100-GHz帯連続波カメラを開発している。焦点面アレイには109素子アンテナ結合型力学インダクタンス検出器(MKID)を使用している。2022年3,4月に天体を用いた試験を実施し、太陽系内惑星や大質量星形成領域W49A, W51A, クエーサー3C273のOTF観測を行なった。

本講演では、W49Aの観測データの解析結果について報告する。観測は( $4' \times 4'$ )の領域を20分間かけ赤経、赤緯方向にマッピングした。最大3枚を1セットとし、それを41セット行った。得られた分解能 $17''$ の観測データから分解能 $32''$ の二次元マップを作成した。今回は、ビームスイッチは用いておらず、単純にスキャンの端の値を差し引くことで大気成分を差し引いた。最終的には、全ての素子のデータをノイズで重み付けして足し合わせた。データを取得できた素子のうち天体の形状を捉えることができた素子は観測条件に依存し平均40素子であった。本研究で得られたマップと268-GHz帯の先行研究[1]との比較を行い、分布の整合性があることを確認した。本講演では、二次元強度マップ作成のプログラム及び得られたマップの雑音、ミリ波からサブミリ波の様々な観測結果[2][2]より作成したフラックススペクトル、そこから推定されるfree-free放射の割合について報告する。

1. Galván-Madrid R et al, ApJ, 779.2, 121, 2013
2. H. D. Buckley and D. Ward-Thompson, MNRAS, 281.1, 294.300, 1996
3. D. Ward-Thompson et al, MNRAS, 257.2, 180.186, 1992

### すばる望遠鏡で高解像度観測を実現するレーザートモグラフィ補償光学

## 一ノ瀬 将也 (東北大学 M1)

地上から天体観測を行う場合、大気揺らぎによって光の波面が乱れ、像がぼやけてしまう。光の波面の乱れを補正し、高い解像度を得るための技術を補償光学という。レーザーガイド星を用いて補償光学を行うと、コーン効果によって補償精度が落ちてしまう。コーン効果を低減し、補償光学の精度を上げるための解決策の一つがレーザートモグラフィ補償光学(LTAO)である。

LTAOは複数のレーザーガイド星を使用することで、コーン効果を低減する。さらにトモグラフィの手法を用いて大気揺らぎを高さ方向に分解し、波面測定精度を向上させる。現在すばる望遠鏡では、ULTIMATE-STARTというLTAOの開発プロジェクトが行われている。LTAOが実装されると可視光領域まで補償光学を適用できるようになる。可視光領域における高分解能面分光は、局所宇宙に存在する低質量銀河の中心にある低質量超大質量ブラックホールの探査を可能にする。[1]本講演ではLTAOの原理、構造、およびLTAOによって期待される結果について述べる。

1. Masayuki Akiyama et al., ULTIMATE-START: Subaru Tomography Adaptive optics Research experiment project overview, Proceedings of the SPIE, Volume 11448, 2020

### 数値シミュレーションによる近赤外線円偏光波の輸送過程の研究

#### 市村 一晟 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 修士1年)

現在の天文観測の研究において偏光観測が着目されている。偏光観測によって、これまで研究が難しかった星間ダストや磁場の構造が明らかになりつつある。一方、医療診断でも近赤外線円偏光が癌の検出に有効である可能性が近年提案された[1]。

先行研究[1]では、実際のがん細胞片と正常細胞片に完全右回り円偏光を入射しその散乱光のDOCP(円偏光度合いを表すパラメータ)を計測するという実験が行われた。その実験では、がん細胞片と正常細胞片の散乱光のDOCPに差があるという結果が得られている。よって入射光を円偏光にし、散乱光のDOCPを計測することによって散乱体のがん細胞なのか正常細胞なのかを区別できるのではないかと期待されている。

そこで本研究では、まず生体内の物質と光の相互作用を扱う際に用いるMie理論から光が散乱する際の散乱角を決めるための位相関数を導出した。そして、その位相関数を用いてがん細胞と正常細胞それぞれを仮定した一様媒質での3次元輻射輸送シミュレーションの計算コードを作成し、完全右回り円偏光の輸送過程を調べる。偏光が輸送されるにつれて偏光のDOCPの値が、がん細胞のモデルと正常細胞のモデルでどのような違いが見えるのかを調べる。線偏光ではなく、円偏光を用いることのメリットを調べる。これらを目的として研究を行っている。本講演では、現在出ている研究成果について

発表する予定である。

1. N.Nishizawa, B.Al-Qadi, T.Kuchimaru, J.Biophotonics 2021, 14, e202000380

### TimePix3 搭載の半導体検出器を用いたミュオンの飛跡の三次元再構成と $\alpha$ 線に対する基礎性能評価 伊藤 尚輝 (東京理科大学 創域理工学研究科 先端物理学専攻 M1)

私たちの暮らしを支えるリチウムイオン電池は、電極間に配置された電解質中をリチウムイオンが移動することで充放電され、構成物質が全て固体のものは「全固体電池」と呼ばれている。全固体電池には「高エネルギー密度」、「充電時間が短い」、「安全性が高い」といった利点があり、その利点を活かすには電池内のリチウムイオンの移動と分布を正確に把握が必要となる。このリチウムイオン電池を動作中に定量的に分析する手法の1つとして、熱中性子誘起核反応によって発生する  $\alpha$  線や  $^3\text{H}$  などの粒子に注目することが考えられる [1]。この分析手法の構築のためには、数 MeV のエネルギーを持つ粒子のエネルギーと時間毎の分布を正確に分別することが不可欠であり、優れたエネルギー分解能と空間分解能、時間分解能を持つ放射線検出器が必要となる。

その検出器の1つとして、欧州の CERN が開発した「TimePix」と呼ばれる時間分解能に優れた ASIC を搭載したハイブリッドピクセル型半導体検出器がある。この検出器ではセンサーの材料として、厚みが 300~1000  $\mu\text{m}$  の Si や CdTe が使用され、55  $\mu\text{m}$  四方のピクセルを 256  $\times$  256 個搭載している。特に 1.56 ns の精度で放射線による信号を処理できる時間分解能を持っており、衛星に搭載することで荷電粒子の分別と各荷電粒子のフラックスの測定に有用である。それに加えて、先ほどのリチウムイオン電池の定量的な分析などの地上利用も期待されている。

そして、このような TimePix の社会利用に向けて、荷電粒子に対する応答のエネルギー依存性、入射角度依存性について知る必要がある。私は、地上に降ってくる宇宙放射線の1つであるミュオンのセンサー中での飛跡を timewalk 補正を用いて三次元再構成し、 $^{241}\text{Am}$  を用いて  $\sim 5\text{MeV}$  程度のエネルギーを持つ荷電粒子に対する応答を調べる実験を行った。本講演では、これらの実験の結果・考察に加え、放射線医学研究所の HIMAC での C イオン、Fe イオンの照射実験の結果について報告する。

1. Takane K., Small, 2204455, 1, 2022

### X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器における撮像モード間の X 線検出率の比較

### 伊藤 耶馬斗 (近畿大 M1)

X 線分光撮像衛星 XRISM に搭載する軟 X 線撮像装置 Xtend は、X 線望遠鏡 (XMA) と X 線 CCD 検出器 (SXI) からなる。SXI は、4 秒の露光で CCD 全面を読み出す Normal mode に加え、明るい天体を観測する際には、CCD の 8 分の 1 領域を 0.5 秒の露光で読み出す 1/8 Window mode で駆動する。我々は SXI のフライト品による地上試験データを用いて、これら 2 つの撮像モードによる X 線検出率を調査した。その結果、Normal mode の方が 1/8 Window mode より X 線検出率が最大 3% 低いことがわかった。一方、非 X 線イベントの割合は、Normal mode の方が 1/8 Window mode より最大 3% 高かった。Normal mode では、1 回の撮像時間中に、複数の X 線光子が隣接するピクセルに入射し、非 X 線イベント (パイルアップイベント) と判定された可能性がある。実際 Normal mode で、非 X 線と判定されたイベントの周囲 5 $\times$ 5 ピクセルのスペクトルを解析すると、X 線イベントの整数倍の波高値を持つピークが見られ、パイルアップイベントとして判定されていることが確認できた。

### 大型サブミリ波望遠鏡のための発見的手法による軽量・高剛性な主鏡支持構造の設計および評価 今村 千博 (名古屋大学 博士後期課程 1 年)

大型サブミリ波望遠鏡 [2] (LST) は日本が主導する将来の大型サブミリ波単一鏡であり、広視野観測に強みがある。LST の実現には、高精度な鏡面 (アストロドームなしで 45  $\mu\text{m}$  r.m.s. 以下) と軽量な望遠鏡構造が必須である。この課題に対し、主鏡支持構造の設計は予測可能な静的変形の最小化、および望遠鏡の軽量化に寄与するが、LST の主鏡支持構造の設計は困難である。これは、主鏡支持構造を構成するトラス材の配置の仕方が膨大であり、構造は望遠鏡が受ける複雑な外的擾乱の下で LST の性能要求を満たさねばならないためである。望遠鏡の主鏡支持構造の設計は、これまで設計者の経験や部分的な数値計算に依存してきたが、LST の主鏡支持構造を設計するのは難しく、計算機による構造最適化が必要である。この応用例として、せいめい望遠鏡では架台の開発に遺伝的アルゴリズム (GA) が取り入れられ、軽量かつ高剛性な構造を獲得したことが報告されている [2]。

本講演では、LST のデザイン案をもとに作成した主鏡支持構造の 3 次元モデルに対し、鏡面の自重変形量と主鏡支持構造の重量を最小化する構造を GA によって探索した結果を報告する。構造探索には、電波天文学・建築構造学の両者からの要請や鏡面上の積載物の重量を考慮した。構造最適化の結果、軽量かつ高剛性な構造を複数得ることができた。その中でも、鏡面の変形量が小さい構造では、理想的な放物面からの変形を約 70  $\mu\text{m}$ 、重量を約 150 トンまで最小化した。最適化された構造はいずれも、周方向の部材同士が互いに引っ張り合い、望遠鏡の変形を抑える性質が見られたほか、仰角の低い場合には望遠鏡構造の光軸方向の変形を半径方向の部材が支える様子も見ら

れた。

1. Kawabe et al., SPIE Proc., 9906, 12, 2016
2. Kurita et al., SPIE Proc., 7733, 11, 2010

## ミリ波補償光学の開発: 波面計測データを用いた野辺山 45 m 望遠鏡主鏡面の重力変形モデリング 岩上 耕太郎 (名古屋大学 M1)

電波干渉計が高分解能の観測を可能にする現在、大型の単一鏡型電波望遠鏡に求められる役割として高い集光力を活かした観測がある。集光力の向上に大口径化が必要になる一方で、構造の大型化は鏡面精度を低下させ、波面の劣化を引き起こす。この主な要因は、風、熱、重力による主鏡面及び副鏡構造の変形である。重力による変形は予測可能で再現性があることから、既存の技術であるホモログス構造によって影響を抑えることが可能である。しかし、風・熱による変形は時間変動が大きく予測も困難であるため、電波望遠鏡においてこれを補償する技術は確立されていない。そこで我々は、鏡面精度の低下を実時間で補償するミリ波補償光学 (MAO) の技術開発を進めている。このシステムでは、主鏡面上に複数設置した波面センサを用いて、アンテナ構造の変形に起因する波面の歪みを超過経路長 (EPL) として実時間で検出する。検出される EPL には、MAO の補償対象である「風変形・熱変形」の成分と、ホモログス構造で補償された「重力変形」の成分の両方が含まれるため、この二つを切り分ける必要がある。

今回、野辺山 45 m 望遠鏡の主鏡面上に設置した 5 つの波面センサを用いて、仰角を短時間で大きく動かした際の EPL を測定した。この実験を風や熱の影響が小さくなる環境下で実施したことで、EPL の変化として現れた成分は重力変形が支配的となった。測定された EPL に対して、ホモログス構造による主鏡面の変形 (焦点距離の変化、光軸の傾き等) を仮定してモデリングしたところ、仰角が下がるにつれ放物面が閉じる変形を表す結果が得られた。この結果より、測定された波面の変形をホモログス変形する主鏡面で説明できることが確認できた。また、アンテナ構造の重力変形 (ホモログス変形) を MAO の波面センサを用いて実時間で検出できることが示された。

## ねじり振り子を用いた精密力測定における熱雑音除去法の提案

大熊 悠介 (東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻/宇宙科学研究所 修士一年)

精密力測定に広く用いられる手法としてねじり振り子を用いたものがある。ねじり振り子は水平方向の力に対して高い感度を持つため重力定数の測定 [1] や人工衛星の慣性基準センサーの地上実験 [2] などに用いられている。一方でその感度は振り子をつるすワイヤーからの熱雑音により制限されており [2] ねじり振り子を用いる精密力測定における限界となっていた。

本研究では熱雑音による感度の限界を克服する手法を考案し

た。この手法ではねじり振り子を二段にし各段の回転角を測定し、測定値の線型操作し、また相関をとる。このデータ取得後の事後的な操作により測定値に含まれる熱雑音の影響を除去することができる。それにより下段のねじり振り子に働く力の大きさを得ることが原理的に可能になる。本講演では考案した手法の原理について説明する。

1. Henry Cavendish, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 88, 469-526, 1798
2. Armano Michele et.al., Physical review letters, 116, 231101, 2016
3. González, Gabriela I and Saulson, Peter R, Physics Letters A, 201, 12-18, 1995

## 補償光学で用いる 4 ビームレーザーガイド星の伝搬モデルの開発 小鹿 哲雅 (関西学院大学 B4)

補償光学は、自然のガイド星あるいはレーザー光によって人工的に作られるレーザーガイド星の光を用いて、地球大気による光波面の乱れをリアルタイムに測定し、可変形鏡で補正を行う。レーザーガイド星は高度 90 km ほどの有限距離に生成されるため、光路の外側の大気揺らぎを測定できず、レーザーガイド星 1 つで天体の光路全てを補償することができない。ULTIMATE-START[1] はすばる望遠鏡用のレーザートモグラフィ補償光学装置であり、レーザーガイド星を 1 つから 4 つへ増やして天体の光路上の全ての大気揺らぎを測定することにより、補償性能の向上を目指している。

本研究では、4 つのレーザーガイド星の配置を自由自在に操作可能にすること、生成されるレーザーガイド星の光源としての性質を評価することのために、レーザーガイド星生成光学系の最適化、大気揺らぎを通過するレーザー光の伝搬シミュレーションを行った。

レーザーガイド星生成光学系にある 8 枚の Tip/Tilt ミラーの角度を自作の光線追跡プログラムで制御した結果、レーザー送信望遠鏡の副鏡による遮蔽のため、設定可能なレーザーガイド星打ち上げ角度範囲にギャップが存在することが分かった。また、得られた光学系のケラレを反映させたレーザー送信望遠鏡の射出瞳マップを作成し、地上からレーザーガイド星の生成される高度 90 km のナトリウム層までの伝搬を求めた。伝搬の結果、波面センサーのようにナトリウム層に生成されたレーザーガイド星を短い露光時間で観測する場合、大気揺らぎの影響により、回折限界 + シーイング程だと経験的に得ていた従来のレーザーガイド星の大きさの見積もりよりも小さくなることが分かった。本ポスターでは以上の内容を報告する。

1. Akiyama et al., Proc. SPIE. 11448, 2020

## 機械学習を用いた XRISM 衛星搭載極低温検出器の異常検知アルゴリズムの開発

## 柏崎 未有 (東京大学大学院理学系研究科 天文学専攻 海老沢研究室 修士一年)

XRISM 衛星<sup>[1]</sup>は、精密 X 線分光による高エネルギー天文学の諸課題の解明を目的とした X 線天文衛星であり、2023 年中に打ち上げ予定である。XRISM 衛星には、*Resolve*<sup>[2]</sup>と呼ばれる極低温検出器を擁した観測装置が搭載されており、50mK に冷却した X 線マイクロカロリメータで精密 X 線分光を実現する。

本研究では *Resolve* 装置の確実な運用を実現するため、衛星テレメトリデータにおける異常検知を自動的に行うことを目標にする。地上試験で得られた実データを教師とし、機械学習的な手法を用いる。データに現れる二種の異常 — 検出器ノイズスペクトルに含まれる異常と、検出器の 50mK ステージ温度データに含まれる異常 — の検知アルゴリズムの開発を通して、このような手法の有用性を検証した。

結果として、検出器ノイズスペクトルの異常については、機械学習を用いることで実用化を目指せる程度の検出率が得られることが示された。検出器の温度データに含まれる異常について、本研究で試した手法では、データに合わせてヒューリスティックにアルゴリズムと基準を設定する必要があり、機械学習の利点を活かしきれていない。さらなる手法の開発が必要である。

1. Tashiro Tashiro Makoto, Maejima Hironori, Toda Kenichi, et al. Status of x-ray imaging and spectroscopy mission XRISM. SPIE. Vol 11444. p. 176 2020.
2. Ishisaki Yoshitaka, Kelley Richard L., Awaki, Hisamitsu et.al., Status of resolve instrument onboard x-ray imaging and spectroscopy mission XRISM. SPIE. Vol 12181. p. 12181 2022-9.

## ブラックホール解明に向けた 86GHz 帯低雑音受信機の開発

亀山 晃 (大阪公立大学 修士 2 年)

EAVN は、日本を初めとする東アジア各国の約 20 局の電波望遠鏡を連携させた観測網であり、小笠原 — ウルムチ間で最大直径 5,100 km に及ぶ世界最大級の電波望遠鏡観測網である。EAVN で近年特に精力的に開発整備が進められている 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、降着円盤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。この周波数領域でモニター可能な高感度・高解像度 VLBI アレイの構築を EAVN で目指している。これにより、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。[1]

これを受け、我々は水沢と石垣の VERA20m 望遠鏡に搭載する 86 GHz 帯低雑音受信機の開発を行っている。搭載する受信機は、RF 系の冷却 HEMT アンプまでを冷却可能にした

67–116 GHz 帯の円偏波受信機を検討している。本研究では受信機の常温部分である LO、IF 系の 67–116 GHz をダウンコンバートする手法として、以下の 2 種類の方法を検討している。1) HPF を用いた single side band (SSB) 受信機の開発、2) 2 side band (2SB) Mixer の開発 [2]。1) では既に、水沢 VERA20m 望遠鏡に 86 GHz 帯片円偏波常温受信機の搭載を行っている。それを用いて、能率測定や KVN との VLBI 試験観測を進めている。また、2) では、パワーディバイダーと 90° ハイブリッドカップラーの開発行っており、67–116 GHz 帯域で反射損失、Isolation とともに -25 dB の性能を目指している。本公演では、現在開発を進めている 10 K 冷凍機を用いた両円偏波低雑音受信機の開発進捗についても述べる。

1. 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
2. P.Yagoubov et.al., "Wideband 67-116 GHz receiver development for ALMA Band 2", Astronomy Astrophysics, vol.634 A46, 2020

## 超広視野 4 枚鏡望遠鏡の光学設計

河合 優樹 (京都大学 M1)

我々は、第 3 鏡が主鏡のすぐ後方に配置されて接続可能な、超広視野 4 枚鏡光学系の光学設計を行っている。この光学系は主鏡に球面鏡を用いるため、低コストで超広視野を実現可能である。現在建設中の Vera C. Rubin Observatory は 3 枚鏡で視野直径 3.5° を誇るが、主鏡、第 2 鏡、第 3 鏡全てが製造の困難な非球面鏡である。

今回の研究では、視野直径 8' で回折限界を達成する我々が開発した 4 枚鏡アプラナート光学系の光学的拘束条件を変更、さらに補正レンズを加えることによって広視野化を試みた。光学性能の目標は視野直径 3.5° にわたってシーイング限界 2" を達成することとした。広視野化を想定していない元の光学系のままでは、第 4 鏡に視野端の光線が全てケラレてしまう。そのため、透過率を確保しつつケラレを防ぐための条件を探索、その条件を満たす光学系に対して結像性能について最適化を行った。

主鏡と第 2 鏡、第 3 鏡を球面鏡とする光学系の場合、結像性能と透過率の間にトレードオフの関係があるため、高結像性能、高透過率を達成するのは難しいことが判明した。第 2 鏡や第 3 鏡を非球面にする等、条件を緩めることでその両立を目指す。

講演では研究の経過を報告し、今後の展望について述べる。

## ISS に搭載する超高層大気観測用 X 線カメラの概要と開発状況

河邊 圭寿 (近畿大学 M2)

我々は、高度 100 km 付近の超高層大気の密度を宇宙 X 線背景放射の大気透過を用いて観測するため、国際宇宙ステーション (ISS) の曝露部への搭載を目指した大気観測専用の X 線カメラ

ラの開発を行っている。X線検出器として、SOI-CMOS イメージセンサである「XRPIX」を用いる。「XRPIX」は Silicon-on-insulator (SOI) 技術により、センサ部と回路部が一体となっていることが特徴で、常温で X 線イベントを検出し、高い X 線感度と精密撮像分光を実現する。X 線カメラには、15.3 mm × 24.6 mm サイズの大面积素子を 2 枚並べて搭載する。観測帯域はおよそ 2-3 keV から 10 数 keV で、低エネルギー側の X 線の吸収から大気密度を測定する。「XRPIX」の手前にはスリットコリメータを置き、「XRPIX」がピクセル検出器であることを活かして X 線の到来方向を区別することで、高度ごとの大気密度を測定する。X 線カメラには他に、バックバイアス印加のための昇圧モジュール、ADC、FPGAなどを搭載した制御回路も搭載する。

現在我々は、制御回路の開発に加え、スリットコリメータと昇圧モジュールの開発も行なっている。スリットコリメータについては試作品を製作し、可視光や較正線源を用いて試験を行い、改良を進めている。また昇圧モジュールについては、電圧レベルの安定性や雑音性能を調査中である。本講演では、X 線カメラの構成の概要と、スリットコリメータおよび昇圧モジュールの開発状況について報告する。

## タイトル

### ISS に搭載予定の X 線検出器による超高層大気の観測計画と荷電粒子バックグラウンドの推定

岸本 拓海 (近畿大学総合理工学研究科理学専攻 M1)

地球大気は対流圏 (0-10 km)、成層圏 (10-50 km)、中間圏 (50-80 km)、熱圏・電離層 (80-500 km) の 4 層に分類され、成層圏より上は超高層大気と呼ばれる。超高層大気の密度は、地球温暖化などの気候変動の影響で長期変動する [1] [2]。一方、太陽の影響による短期の準周期変動 (年変動、日変動) や、磁気嵐や地上での地震・火山等で生じた大気波動によっても突発変動する。しかし高度 100 km 付近の超高層大気は、人工衛星 (高度 300 km 以上) や気球 (高度 50 km 以下) でその場観測できない高度のため、大気の中で最もデータが乏しい。

Katsuda et al. 2021 [2] は、X 線で高度 100 km 付近の大気密度を観測できることを見出した。すなわち、X 線天文衛星のデータのうち、観測天体が夜地球の地平線にかかっているタイミングを利用し、天体からの X 線の大気透過を観測した。大気密度に応じて低エネルギー側の X 線が吸収されるため、各高度での透過 X 線の吸収率から大気密度の鉛直分布を測定した。

我々はこの手法を用いて大気密度の変動をモニタリングするため、国際宇宙ステーション (ISS) の曝露部への搭載を目指した超高層大気の観測専用の X 線観測装置の開発を行なっている。ISS 上の地球の地平線を見る方向に観測装置を取り付け、宇宙 X 線背景放射の大気透過を用いて超高層大気の密度変動を観測する計画である。宇宙 X 線背景放射は全天に淡く広がった放射のため、Cut-off rigidity に依存する荷電粒子バックグラ

ウンドが観測実現性を左右する。我々は、ISS に取り付けられた全天 X 線監視装置 MAXI と X 線観測装置 NICER のデータを用い、ISS 上の荷電粒子バックグラウンドの Cut-off rigidity 依存性を調査した。本講演では計画の概要と、ISS における荷電粒子バックグラウンドの調査結果を報告する。

1. Manabe & Wetherald et al., 1967, Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity, JAS, 24, 241.
2. Roble & Dickinson et al., 1989, How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere?, GRL, 16, 1441.
3. Katsuda et al., 2021, New Measurement of the Vertical Atmospheric Density Profile from Occultations of the Crab Nebula with X-Ray Astronomy Satellite Suzaku and Hitomi, JGR: Space Phys., 126, 4.

## 低コストで光学的欠点のない赤外全天雲モニタの開発

小嶋 拓斗 (京都大学大学院理学研究科 M1)

せいめい望遠鏡がある京都大学岡山天文台では可視光による雲モニタが行われているが、可視光による雲の評価は月光や街明かりの影響により変化するため適切でない。そのため、より適した赤外線カメラを用いた全天雲モニタの導入が望まれる。しかし、従来の赤外線全天雲モニタは高価なゲルマニウムの魚眼レンズを用いたり、あるいは全天をカバーできないなどの欠点を抱えていた。本研究ではこれら欠点を克服した雲モニタの開発を進めている。採用した方式は、複数の廉価な市販の赤外カメラの画像を統合し、全天をカバーするというものである。

まず、使用するカメラの視野 (カタログ値) を用いて全天をカバーできるカメラ配置を探索した。その結果 11 台のカメラが必要であることが分かった。試作機としてカメラ 1 つを制御し一枚の画像を読み出して web ページに表示するシステムを開発した。次に、この試作機を用いて視野内の歪曲を測定した。その結果、視野端でおよそ 14% の樽型の歪曲が確認された。この歪曲のデータを元に、カメラ配置の再検討を進めている。本講演では、雲モニタ開発の詳細や歪曲の測定方法、今後の展望について述べる。

## 強度干渉計実験と画像合成の検討

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 D1)

我々のグループでは南極新ドームふじ基地でテラヘルツ領域の観測計画を進めている。この計画では南極新ドームふじ基地に口径 30cm の望遠鏡をそれぞれ 2 台設置し、強度干渉計での観測を目指している。南極高地では電離層素 [NII]205 $\mu$ m、2 階電離層素 [OIII]88 $\mu$ m、[OIII]52 $\mu$ m の輝線を含む帯域に大気の窓が存在しており、大質量星形成活動を知る手掛かりとなる。

我々の研究を進めている 2 素子強度干渉計はヘテロダイナ受  
信機と比較して量子雑音による制限を受けないため高感度での  
観測が可能である。2 素子強度干渉計の実証実験のために実験  
室に周波数 500GHz、口径 76.2mm、基線長 10 – 50cm の光学  
システムを製作した。本講演では本光学システムおよび強度干  
渉計実験の光学試験について報告する。

強度干渉計実験では実験室内で強度干渉計を用いた画像合成  
を目指している。強度干渉計での画像合成には直接検出器信号  
による強度の相互相関をとることで得られる遅延時間を導入す  
ることで (u,v) 平面上を埋めることが必要である。しかし、強  
度相関から振幅の複素ビジビリティを正確に求められるかどう  
かが課題であり、検討を進めている。本講演ではこちらについ  
ても紹介する。

## タイトル 苗字 名前 (所属 学年)

本文を入力してください。本文を入力してください。本文を  
入力してください。本文を入力してください。本文を入力し  
てください。本文を入力してください。本文を入力してくださ  
い。本文を入力してください。本文を入力してください。本文  
を入力してください。本文を入力してください。本文を入力し  
てください。本文を入力してください。本文を入力してください。  
本文を入力してください。本文を入力してください。本文を入  
力してください。本文を入力してください。本文を入力してく  
ださい。本文を入力してください。本文を入力してください。[1]

本文を入力してください。本文を入力してください。本文を  
入力してください。本文を入力してください。本文を入力し  
てください。本文を入力してください。本文を入力してください。  
本文を入力してください。本文を入力してください。本文を入  
力してください。本文を入力してください。本文を入力してく  
ださい。本文を入力してください。本文を入力してください。本  
文を入力してください。本文を入力してください。本文を入力し  
てください。本文を入力してください。本文を入力してください。  
本文を入力してください。本文を入力してください。本文を入  
力してください。本文を入力してください。本文を入力してく  
ださい。本文を入力してください。本文を入力してください。[2]

本文を入力してください。本文を入力してください。本文を  
入力してください。本文を入力してください。本文を入力し  
てください。本文を入力してください。本文を入力してください。  
本文を入力してください。本文を入力してください。本文を入  
力してください。本文を入力してください。本文を入力してく  
ださい。本文を入力してください。本文を入力してください。本  
文を入力してください。本文を入力してください。本文を入力し  
てください。本文を入力してください。本文を入力してください。  
本文を入力してください。本文を入力してください。本文を入  
力してください。本文を入力してください。本文を入力してく  
ださい。本文を入力してください。本文を入力してください。本  
文を入力してください。本文を入力してください。本文を入力し  
てください。本文を入力してください。本文を入力してください。  
本文を入力してください。本文を入力してください。本文を入  
力してください。本文を入力してください。本文を入力してく  
ださい。本文を入力してください。本文を入力してください。[2]

1. Authors1, journal1, vol1, pages1, year1
2. Authors2, journal2, vol2, pages2, year2
3. Authors3, journal3, vol3, pages3, year3

## 86GHz 帯常温受信機を搭載した VERA 水沢局での 試験観測と性能評価

## 近藤 奨紀 (大阪公立大学 修士 1 年)

無数にある銀河の中には X 線、 $\gamma$  線、電波などの電磁波を  
激しく放射している銀河が存在し、それらを活動銀河と呼ぶ。  
[1] そのような銀河の中心にはブラックホールが存在すること  
が観測でも確認されている。そのような天体の中で、ブラック  
ホール付近から相対論的に加速されたプラズマガスがジェッ  
トとして噴出しているものがあるが、その噴出機構は未解明で  
ある。それを解明するには、シンクロトロン放射に対する透過  
率が高くかつジェットの放射が明るい 86 GHz(波長 3 mm) 帯  
での観測が鍵を握っている。また、ターゲットとなる天体は見  
かけの大きさが非常に小さいため、複数の望遠鏡を組み合わ  
せる VLBI という観測を行い、望遠鏡の各分解能を向上させ  
る。この観測をより高分解能・高頻度で行うには、既存の観測  
網に日本の望遠鏡が加わることが重要である。そこで我々は  
VERA20m 望遠鏡(水沢局・石垣局)に新たに 86 GHz 帯での  
観測に対応させるための受信機の開発を進めており、昨夏に水  
沢局に常温受信機を搭載した。一般に電波望遠鏡の性能はアン  
テナ表面の鏡面精度に依存しており、観測周波数が高くなると  
その精度の寄与が大きくなる。また、VERA は 22, 43GHz 帯  
などの低周波数での観測を行うための望遠鏡として設計されて  
いるため、86GHz で実際に観測が可能かどうかはわかっていな  
い。そこで私は今年 1 月から 3 月にかけて観測を行い、大気  
の光学的厚み  $\tau_0$  やアンテナ開口能率  $\eta_A$  の仰角依存性など、性能  
評価に必要な物理量の測定を行った。

1. Padovani et al., 1995

## 突発天体サーベイの差分画像解析における候補天体 絞り込み手法の開発

### 笹岡 大雅 (東京大学 M1)

近年、超新星をはじめとした突発天体の発見数は大幅に増加  
しており、今後も更なる増加が見込まれている。日本国内にお  
いても、東京大学木曾観測所の Tomo-e Gozen チームが全天  
サーベイ/高頻度サーベイを毎晩行い、突発天体を探索してい  
る。突発天体の発見を目的としたサーベイでは、新規に取得し  
た画像と参照画像の「引き算」を行うことによって突発天体の  
検出を行なっている。しかし、候補天体として検出されるもの  
の多くは引き残しや宇宙線などであり、適切にフォローアップ  
を行うには、それらを候補から除かなければならない。近年は  
機械学習による判別手法の進歩が著しいが、モデルを修正する  
場合に非常に時間がかかる等のデメリットもあり、パラメータ  
による判別手法と住み分けができると考えた。

点源に感度のある検出を行うには、その星像の形 (Point  
Spread Function) で重み付けをすると良いことが以前から知  
られている。[1] 先行研究は Tomo-e Gozen の 1 フレーム/秒  
の画像に対し、横軸に重み付け後のピーク、縦軸に星像のプロ  
ファイルの傾きをとると点源由来の天体が曲線を描いて分布す  
ることを明らかにした。[2] Tomo-e Gozen の突発天体サーベ

イデータを用いた本研究では、点源由来の天体が分布する領域をシーイングと信号雑音比のみに依存する式を使って予想することができるようになった。本講演ではこの手法を適用した結果とともに、実行時間の議論や、重力波可視光対応天体探査への応用可能性などについても報告する。

1. Bijaoui, A., Dantel, M., A&A, 6, 51, 1970.
2. Arima, N., unpublished Ph.D thesis, University of Tokyo, 2022.

## TES 性能評価のための極低温環境で用いる磁気シールドの開発

佐々木 康祐 (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、極低温下(絶対温度 100 mK 以下)で高いエネルギー分光能力と高い検出効率をもつ検出器である。その中でも常伝導-超伝導間の急峻な抵抗変化を測定する超伝導遷移端温度計 (Transition-Edge Sensor; TES) を用いた TES 型マイクロカロリメータは、従来の検出器に比べ高い感度 ( $E/\Delta E > 1000$ ) を実現するため、将来 X 線天文衛星への搭載が決定している。一方で、TES 素子は垂直方向からの磁場により感度が落ちることが確認されており [1]、将来衛星への実装のためには、広い開口面積を確保しつつ、極低温環境下での磁気遮蔽が重要である。

本研究グループでは、X 線の入射を妨げることなく磁場を軽減することのできる超伝導メッシュシールドの開発及びその性能評価試験を行っている。このシールドは超伝導体の Nb を用いることにより、Meissner 効果によって磁場の侵入を防いでいる。また、ハニカム構造をとることにより、強度を保ちながら開口部を確保している。

磁場による TES の感度の劣化、磁気遮蔽シールドの性能を評価するためには、極低温下での均一な磁場環境を構築する必要がある。そこで、極低温下(絶対温度 4K 領域)において広範囲に一樣な磁場をかけることのできる超伝導ヘルムホルツコイルの設計、製作を行った。また、極低温下での磁場校正試験を行い、50 mA の電流により中心位置に 38.4  $\mu$ T の磁場をかけられるコイルであること、電流に対して線形に磁場が応答することを確認した。本講演では、超伝導ヘルムホルツコイルの設計、製作、校正試験の結果、及びヘルムホルツコイルを用いた磁気遮蔽シールド性能評価試験について述べる。

1. Y. Ishisaki et al. 2008, Journal of Low Temperature Physics, 151:131-137

## HiZ-GUNDAM 搭載候補 pnCCD 素子のノイズ評価

## 佐藤 匡駿 (関西学院大学大学院 M2)

HiZ-GUNDAM は、宇宙最大規模の爆発現象であるガンマ線バーストを高感度かつ広視野の X 線モニターで発見、可視光・近赤外線望遠鏡で追観測の後、約 1 時間半以内に地上の大型望遠鏡による詳細な分光観測を行うミッションである。これによって初代星からのガンマ線バーストを多数検出し、宇宙最初期の星の誕生と終焉、さらにその時代の宇宙の物理状態の解明を目指す。

HiZ-GUNDAM の X 線検出器への要求として、観測域である 0.4-4keV の X 線を効率よく検出するための、これらの帯域での 50 %以上の量子効率と 0.1 秒以下の時間分解能、最低 6 cm 四方の素子サイズが求められる。上述の要求を満たす X 線検出器の候補として我々は pn CCD に着目した。そこで、小型の pnCCD 素子を搭載した PNDetector 社の CXC(Color-Xray-Camera) を用いて実験を行なった。

本研究の目的はノイズと輝線を弁別できる下限のエネルギー (LD) から衛星に搭載する素子のピクセルサイズを決定することである。HiZ-GUNDAM の熱設計上、素子の駆動温度を下げるのが難しいため、比較的高温である 0 °C の素子温度において、暗電流についての詳細解析を行なった。その過程において、バックグラウンドの分布とイベント抽出後のノイズ分布の乖離から、全ノイズに暗電流ノイズと読み出しノイズ以外の要素が大きく影響していることが判明した。上述の乖離の原因となっているピクセルを特定し、輝線が減少しないように閾値を設けて排除したところ、216.0eV だった LD を 122.2eV まで低減することができた。本講演では、駆動温度 0 °C における CXC の基礎性能および、LD 評価のための解析方法、結果の詳細について報告する。

## X 線観測衛星用井戸型シンチレータ技術を用いた医療用高感度ガンマ線プローブの開発 清水 康行 (東京理科大学 M2)

我々は、宇宙観測用の高性能な検出器の開発に加え、宇宙観測のために研究・開発された X 線ガンマ線観測技術の医療分野 (核医学) への応用に向けた新しい検出器の開発を医師とともに行なっている。

がんの治療方法、Radio-theranostics は、がんの目印であるがん抗原を特異的に認識する薬剤に、放射線核種を結合させた薬剤を用いて、治療を行う。利点として、薬から放射線が出るため薬の経過を体外から追える、治療と診断を同時に行える、などがあげられる。一方で、対象の部分へ分布しない薬からも放射線は出るため、それらは副作用になる可能性があるといった課題もある。そのため、薬剤分布の把握と定量が大切である。

X 線天文衛星用技術の医療分野への応用に向けては、観測時間の長さや、対象となる臓器ではない臓器に貯留した薬剤からの放射線がバックグラウンドになることなど、これまで宇宙観測で用いられてきた要求とは異なるものもある。それらの要求を満たすことによる、検出器の更なる性能向上は、宇宙観測の

ための技術の進歩へとつながることが期待される。

本研究では、S/N 比向上のため、すざく衛星に搭載されている硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector; HXD) の井戸型アクティブシールド技術を用いて、新しい高感度のガンマ線プローブを開発し、核医学分野での実用化を目指している。井戸型アクティブシールドは主検出器と、それを井戸型に囲むシールド用検出器からなり、コリメータとシールドを兼ね、さらには主検出器由来のノイズとなり得るコンプトン散乱成分も低減することができる技術である。

本発表では、医療分野への応用に向けた原理検証のために、現在開発中である、主検出器に数 keV から数百 keV に対して高い感度とエネルギー分解能を有する CdTe 半導体検出器、シールド用検出器に CsI(Tl) シンチレータと光電子増倍管を用いた、新しいアクティブシールド検出器の進捗と性能向上に向けた今後の展望について報告する。

## Color-Xray-Camera を用いた pnCCD 素子の基礎性能評価

杉本 葵 (関西学院大学 M2)

X 線 CCD は、1993 年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星「あすか」に初めて搭載されて以来全ての X 線天文衛星に搭載され、X 線天文分野における標準検出器となっている。中でも pnCCD は 1999 年に打ち上げられた X 線天文衛星 XMM-Newton のために開発された裏面照射型の CCD で、空間的・分光的に感度の高い分光 X 線撮像素子である。またフレームストア型により読み出し時間の短縮も実現された。現在の pnCCD は、広エネルギー帯域に感度があること、エネルギー分解能、時間分解能が良いことから、今後の宇宙機搭載用の素子としても期待できる。そこで、小型の pnCCD 素子を搭載した PNDetector 社の Color-Xray-Camera(CXC) に対し、素子温度-20°C における暗電流及び X 線検出下限エネルギーの評価を行った。

本研究では X 線源  $^{55}\text{Fe}(\text{MnK}\alpha)$  を使用し、素子温度-20°C で様々なフレームレート (15Hz、20Hz、30Hz、50Hz、75Hz、100Hz) に対してデータを取得した。X 線を照射していない場合についても各露光時間につき 500 枚取得し、これを用いてダークレベルの解析を行った。ピクセル毎に暗電流を求めたところ、暗電流の最頻値は 15.1e/s であり、ピクセル位置による暗電流の不均一性も確認された。また、X 線に起因する電荷の検出下限エネルギーを算出した。X 線イベント判定回数が多いピクセル及び、高いバックグラウンドのゆらぎを持つピクセルを除去することで検出下限エネルギーの改善が見込まれた。

## 湾曲 Si 結晶を用いた Bragg 反射型偏光計の作成及び性能評価

瀬口 剛弘 (M 1)

X 線の偏光観測は、検出器の開発の難しさから撮像、測光、分光と比べあまり発展しておらず、現状かに星雲にのみ有意な

検出に成功している。X 線の偏光観測は電子の動きや磁場の向きを理解することに繋がる。特に太陽フレアでは、電子の制動放射による連続 X 線とプラズマ中に入射した場合の特性 X 線の二つの偏光を観測できればフレア中での磁気リコネクションによる電子の加速機構などが解明できる可能性がある。[1]

そのため我々は Bragg 反射を用いた X 線の偏光に注目した。He like な鉄の蛍光 X 線のエネルギー帯域 5.5 8.1keV を中心に測定できるよう Si(100) 結晶と炭素繊維強化プラスチックを用いた反射鏡を作成している。しかし Bragg 反射は反射角に対し単一のエネルギーの X 線しか反射できない。そこで我々は結晶面を湾曲させ放物面形状に成形することで偏光できる帯域を拡大し、焦点からイメージセンサをずらすことによって検出位置の違いを利用し分光させることも考えた。[2]

また、Si(111) を重ねることで反射できるエネルギー帯域を更に拡大させている。[2]

現在は実際に衛星に載せるための具体的な搭載案やそのための反射鏡の小型化なども研究している。本公演では反射鏡の原理の他、実際の作成方法及びその問題点と現在の研究の展望についても議論する。

1. Katuo Tanaka, Astron. Soc. Japan, 38, 25-249, 1986
2. 泉谷 喬則, 中央大学修士論文, 2014
3. 西山凜太郎, 中央大学修士論文, 2022

## ROS を用いた汎用望遠鏡制御システム NECST v4 の開発; 1.85m 望遠鏡での駆動試験と試験観測の結果 高山 楓菜 (名古屋大学 M1)

一酸化炭素分子輝線は星の母体である分子雲のトレーサーであり、広範囲の観測により分布と物理状態を調べることが重要だ。しかし、その全天観測はいまだ達成されていない。我々は、チリにある NANTEN2 望遠鏡を用いて、南半球から観測可能な全天の約 70% をカバーする NANTEN2 Super CO Survey as Legacy(NASCO) 計画を推進している。広範囲のサーベイ観測を短時間で行うためには観測効率の向上や観測の自動化が必要となる。5つのビームを持った NASCO 受信機が 2020 年初めに搭載された [1] が、ソフトウェアのメンテナンス性に問題があり、修正や機能の追加が難しかった。また、受信機の性能を活かすため望遠鏡を高い精度で高速に駆動させることが要求される。そこで我々は、信頼できるリアルタイム制御やシステムへの機能の追加・修正を容易に可能とする、特定の望遠鏡に特化しない高い汎用性と、分散処理による柔軟性を持った制御システム NECST\_v4 を開発し、大阪公立大学 1.85m 望遠鏡を用いて試験中である。

今回、我々は加速度を考慮した座標計算を実装し試験観測をおこなった。OTF 観測においては、観測範囲内を安定した速度で駆動することが重要である。従来等速直線運動を仮定して座標と速度の指示値を与えていたが、実際には望遠鏡は慣性運動

するため、指示値と実測値に誤差が生じていた。今回助走区間を設け、区間内で加速するよう指示値を与えることで観測開始時には安定した速度に達するよう、座標の計算方法を改善した。その結果、以前は 100 arcsec 程度あった誤差が 7.2 arcsec(ビームサイズの 1/20) まで抑えられた。さらに月ポインティング観測、OTF 試験観測を行い、ポインティング誤差を求め、シングルビームによる 1 平方度の OTF 観測をおよそ 46 arcsec/s、およそ 30 分で行うことができた。

1. Nishimura et al., Proceedings of the SPIE, 11453, 18, 2020

## 像再構成光学系のための Kirkpatrick-Baez ミラーの開発

(田中 虎次郎 東京都立大学 修士 1 年)

宇宙には X 線を放出する高エネルギーの現象が存在し、X 線を観測することにより、地上で実現できない高エネルギーの物理現象やエキゾチックな物理現象を探求することが可能となる。X 線天文学において X 線望遠鏡の角度分解能の向上は必要不可欠である。X 線望遠鏡において角度分解能を向上させるためには高い製作精度が必要とされ、莫大なコストがかかってしまう。そこで、我々は高角度分解能を達成する手段として像再構成型 X 線光学系の開発を行っている。

我々が開発している像再構成型 X 線光学系とは角度分解能向上の役割を担うスリットを結合集光鏡と二次元検出器の前面に設置する光学系である。スリット 2 枚を精度良く並べることで天体のフーリエ変換像を取得し、これに逆変換を施して像の再構成を行うことで高角度分解能の像を得る。この光学系では、集光部分に KB ミラー (Kirkpatrick-Baez mirror) を用いている。KB ミラーは互いに直行する 2 枚の凹面鏡で入射 X 線を反射することで焦点像を得る光学系である。集光力を上げるために少しずつ傾きを変えた反射鏡を複数枚積層する。反射鏡にはタングステン (W) ミラーを使用する。

本発表では、開発の手始めとして Si 基板に W を蒸着した反射鏡の反射率測定の結果についてまとめる。

## 超小型衛星 VERTECS ミッションと姿勢制御ユニットのシミュレーション

田中 颯 (東京工業大学大学院理学院物理学系物理学コース・ISAS/JAXA 宇宙物理学研究系松原研究室 修士 1 年)

超小型天文衛星 VERTECS (Visible Extragalactic background Radiation Exploration by Cube Sat) は、銀河系全ての放射の視線積分である宇宙背景放射を可視光において観測し、天体形成史の解明に挑むミッションである。VERTECS は 6U サイズ (約 10cm×20cm×30cm) であり、九州工業大学が今までに開発してきた CubeSat のバスシステムをベースとするバス部と 3U サイズの可視光望遠鏡から構成される。本ミッ

ションにおける姿勢制御系の制約として重要なことの一つに、長時間露光における 10 秒角/1 分間の姿勢安定性が求められている。露光時間中に星像が動くことによって星周辺の多数の画素が汚染されてしまい、宇宙背景放射の測定のノイズとなり背景放射の測定が困難になってしまうため、高い姿勢安定性での観測が要求されている。今回の姿勢制御系には JAXA 技術のフロントローディングで開発された 1U サイズの統合型姿勢制御ユニット (AOCS: Attitude and Orbital Control System) を採用する。本公演では、VERTECS プロジェクトの概要と、AOCS が行う姿勢制御の概要、ISSL\_OSS によって開発された地上局でのテレメトリ・コマンドを処理するソフトウェアである WINGS (Web-based INterface Ground-station Software) を用いた AOCS のテレコマのシミュレーションの概要について講演する。

## 高感度 MeV ガンマ線天体観測のための ETCC 開発 塚本 博丈 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙線研究室 修士 1 年)

高エネルギー天文学において数百 keV から数十 MeV における MeV ガンマ線領域のサイエンスとして、放射性同位元素の崩壊に伴う核ガンマ線を検出することで、超新星爆発や中性子星合体といった元素合成の現場や、合成された元素が銀河系内を拡散していく様子を直接観測できる点が挙げられる。

しかし MeV ガンマ線領域は、他の波長領域と比べて観測自体が困難で未発達分野である。X 線観測の場合は斜入射型の鏡で反射することを利用して集光できるが、MeV ガンマ線では透過力が高く集光できないため、広い有効面積を確保できない。また MeV ガンマ線を観測する際、物質との相互作用で優位なコンプトン散乱を利用するが、観測対象からの光子のエネルギー・到来方向の情報を一部失ってしまう上、検出器を構成する観測器自体と銀河宇宙線との相互作用によって生成されるガンマ線も雑音となるため、S/N 比がどうしても低くなってしまふ。

そこで京都大学宇宙線研究室では、高い精度で MeV ガンマ線観測を行うことができる電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (Electron-Tracking Compton Camera: ETCC) の開発を行ない、その性能を気球実験で実証する SMILE project を進めている。従来の MeV ガンマ線検出器では、コンプトン散乱における散乱ガンマ線のエネルギー・散乱方向と散乱角、反跳電子のエネルギーを測定して入射ガンマ線の方向を円環状に決定していた。一方 ETCC では従来測定されなかった反跳電子の散乱方向の飛跡も検出することで、入射ガンマ線の方向を一意に定めることが出来る。本講演では SMILE project の紹介と、高感度 MeV ガンマ線観測に向けた ETCC の特徴について説明する。

1. 高田淳史, 谷森 達, “SMILE による MeV ガンマ線天体探査—MeV ガンマ線天文学の夜明け—”, RADIOISOTOPES, 68 巻 12 号, 2019 年

## 野辺山 45 m 望遠鏡 7 ビーム受信機 (7BEE) 用 logger システムの開発 中川 凌 (大阪公立大学 電波天文学研究室 M1)

野辺山 45 m 電波望遠鏡は長野県の国立天文台野辺山宇宙電波観測所が運用している電波望遠鏡で、ミリ波を観測できる電波望遠鏡では世界最大級であり、高分解能の観測を可能とする。本望遠鏡には 11 種類の受信機が搭載されており、20–120 GHz 程度の帯域に放射を持つ様々な分子の輝線が観測可能である。7BEE (7 BEam Equipment) はこの 45 m 望遠鏡に搭載されている受信機の一つで、観測の時間効率・観測感度に特化した 7 ビーム受信機である。

この度開発した logger システムは受信機状態モニター (以下、モニター) とログ出力機能を携えており、モニターはこの 7BEE の温度、真空度、各電源の ON/OFF 及び電圧・電流値、各 PATT (Programmable ATTenuator; 可変減衰器) の設定値 (減衰量)、各 SG (Signal Generator; 信号発生器) の ON/OFF 及び出力周波数を観測画面上に一定時間ごとに表示するものであり、ログ出力機能はそれらの情報を一定時間ごとにデータとしてテキスト出力するものである。

モニターの開発した主な目的は「観測所でのデータの可視化」である。7BEE は 7 ビーム受信機のため構成機器が多く (例えば PATT は 7 ビーム  $\times$  2 偏波分なので 14 個)、3 帯域に分離して観測する (スイッチで帯域を切り替える) ため、制御は複雑だ。よってエラーの原因の特定や復帰も通常の受信機より難しく、各機器の状態をひと目で確認できるようにしておかなければならない。また、7 つのビームを活かした広域観測の手法をとるためには、全てのビームが 1 つも欠けることなく正常に動作していなければならない。常にその状態をモニタリングして保証しておく必要がある。ログ出力機能を開発した目的は「受信機状態データの集約・保存」である。観測時間外に機器トラブルが発生しても、保存されたログから過去の各機器状態と日時を確認することで、問題の発生日時と原因の特定に役立つ。今後は本機能を用いて受信機の正常状態を保証しつつ、目的の CO 広域観測を進めたい。

## 1.85 m 電波望遠鏡での超広帯域同時観測実現に向けた光学系の開発 西川 悠馬 (大阪公立大学理学研究科 修士 1 年)

我々大阪公立大学はこれまで、星の形成課程を解明するために野辺山に設置された 1.85 m 電波望遠鏡の開発・運用を行ってきた。この望遠鏡には、210–375 GHz 帯に存在する CO ( $J=2-1$ ,  $3-2$ ) 輝線を同時に観測するための受信機が搭載されている [1]。そして現在、星形成領域のさらに詳細な情報を取得するために、84–116 GHz 帯に存在する CO 輝線 ( $J=1-0$ ) も同時に観測する計画を推進している。

その中で新たに設計する光学系に要求されることは主に二つあり、(1) 副鏡とフィードにおけるビームサイズと曲率半

径を周波数依存なく一定にすることと (2) 210–375 GHz 帯と 84–116 GHz 帯に分離して集光することである。(1) は開口効率を全帯域に渡って高めるためであり、周波数に依存しない光学設計のために確立された理論を用いることで最適化が可能である。(2) は導波管限界により 84–375 GHz という比帯域 (周波数幅/中心周波数) 130% を一つのフィードで給電するのは不可能なためであり、低周波側のみを透過する準光学フィルタを用いることで実現可能である。準光学フィルタの通過特性は平面波入射の際に最大となるが、実際の光学系において使用する場合は斜入射成分を含むため、特性劣化は不可避である。従って、出来るだけ平面波に近い状態で入射させることを考慮した設計を目指した。その結果全帯域共通の楕円鏡を二枚使用することに加えて準光学フィルタで分離した後にそれぞれ一枚ずつ楕円鏡を追加し、光学系として成立することを物理光学シミュレーションによって確認した。

本講演では、上記 2 点を両立する光学系設計の詳細や物理光学シミュレーションの結果と、今後の展望について報告する。

1. S.Masui et al., Publications of the Astronomical Society of Japan, vol.73, pages1100-1115, year2021

## pnCCD 素子における軟 X 線性能評価 畠中 大介 (関西学院大学 M2)

我々は、HiZ-GUNDAM 衛星搭載用 X 線撮像検出器の開発を行っている。HiZ-GUNDAM 計画では、特にガンマ線バーストの観測をすることで初期宇宙の歴史を探索することを目的としている。ガンマ線バーストは大質量星の終焉に起こる爆発現象で、数秒の間ガンマ線で輝き、その後短い時間で近赤外線や可視光線、X 線で輝く残光を伴う現象である。ミッションでは低エネルギー帯域の X 線に対し 50% 以上の検出効率が要求されており、完全空乏化した背面照射型である pnCCD 素子が焦点面検出器の候補として挙げられている。

本研究では PNDetector 社製の Color-Xray-Camera (CXC) を用いて、0.4–4.0 keV 帯域の基礎性能評価を行った。CXC で採用されている pnCCD 素子は、受光面積が 12.7 mm  $\times$  12.7 mm でピクセルサイズが 48  $\mu$ m  $\times$  48  $\mu$ m と衛星搭載素子よりも小型である。電荷読み出し口は 52 channel あり、それを 4 つのアナログ ASIC で分割して読み出している。

実験では X 線発生装置と二次ターゲットを用いて、複数の X 線輝線と連続成分からなるスペクトルを取得した。得られたスペクトルには F-K $\alpha$  (0.67 keV), Al-K $\alpha$  (1.5 keV), Ti-K $\alpha$  (4.5 keV), Cr-K $\alpha$  (5.4 keV), Fe-K $\alpha$  の輝線が見られた。この 5 本の輝線から F-K $\alpha$  ~ Fe-K $\alpha$  帯域でのゲインの線形性およびエネルギー分解能のエネルギー依存性を評価した。本講演では、解析方法の詳細とそれにより得られた結果を議論する。

## 銀河団中心銀河 H1821+643 の Chandra X 線衛星の詳細解析

## 藤井 麟太郎 (立教大学 M1)

銀河団中心銀河 H1821+643 は低赤方偏移 ( $z=0.299$ ) の銀河団に属する銀河であると同時に、中心に光度の大きな活動銀河核 (AGN) を持つ。先行研究 [1] では、AGN によって形成された X 線空洞と思われる表面輝度の低下を発見したが、その空洞が X 線で見えているのかどうか解析が難しいことから RL 法 (Richardson-Lucy deconvolution)[2][2] を H1821+643 に適用することで空洞の鮮明化ができないかを試みた。

RL 法とは、既知の点拡がり関数 (PSF: Point Spread Function) と衛星が実際に観測、撮像した画像からベイズ推定を用いて観測の際に真の画像に畳み込んだ望遠鏡や検出器の応答を戻してあげることで真の画像を推定するという手法である。しかし、実際のところ検出器の焦点面に光子が落ちてくる位置によって PSF も変わってくるため、空間スケールが広い場合には精度が落ちてしまう。また、ChandraX 線衛星に搭載されている CCD 検出器は他の検出器と比較して時間分解能が悪いため、明るい天体を観測するときには複数の入射 X 線光子の撮像領域が重なり合うことでイベントの抽出がうまくされない「パイルアップ」が発生する。

先行研究による結果と併せて、パイルアップ (場所依存) 効果の考慮を視野に入れたうえで RL 法を H1821+643 に適用し解析をした結果と今後の展望について紹介したい。

1. H. R. Russell et al. 2010, MNRAS, Volume 402, 1561-1579
2. Richardson, William Hadley. 1972, JOSA, 62, 55-59
3. Lucy, L. B. 1974, Astronomical Journal, 79, 745-754

## 月周回探査機搭載用 RICHeS エネルギースペクトロメータの DSSD 位置検出器開発 藤澤 海斗 (東京理科大学 幸村研究室 M2)

### 【研究背景・目的】

月周回有人拠点 Gateway が、月面及び火星に向けた中継基地として、主に ISS に参加する宇宙機関から構成された作業チームで開発が進められている。Gateway 建設の際の課題の一つに、宇宙飛行士の被ばく問題がある。被ばく線量に寄与するのは、主に 10MeV 2GeV のエネルギースペクトル領域であり、その領域から算定する実効線量当量評価のために、精度の高いスペクトル測定が必要となる。そこで、人体への被ばく線量寄与が高い 300MeV 以上の荷電粒子のエネルギースペクトル計測が可能、エネルギースペクトロメータ RICHeS の開発を行なっている。RICHeS は入射粒子からのチェレンコフ光を利用することにより粒子のエネルギーを計測することが可能で、約 2GeV までを計測対象としている。RICHeS センサ部には入射粒子の位置検出器として、両面シリコンストリップ検出器 DSSD を積層する。本研究ではこの DSSD の位置決定精度について検討することを目的とする。

### 【研究内容】

DSSD は n 型バルクの上下層に p+ 型と n+ 型のストリップがそれぞれ並べられたストリップ型シリコン検出器である。DSSD に荷電粒子が入射すると、電離相互作用などにより n 型バルク内で電子と正孔が発生し、上下のストリップでそれぞれ回収することで、入射位置とエネルギーを同時に得ることができる。

本研究では、Geant4 シミュレーションを利用し、対象の DSSD にあらゆる方向からの粒子線が入射した際の位置決定精度を検証した。そして、2 枚の DSSD を積層した際の、粒子線の到来方向の決定精度を評価した。これらの結果を講演にて述べる。

1. Takeda, S. I., Takahashi, T., Watanabe, S., Tajima, H., Tanaka, T., Nakazawa, K., Fukazawa, Y. (2008). Double-sided silicon strip detector for x-ray imaging. SPIE newsroom.

## 野辺山 45m 望遠鏡に搭載した 7beam 受信機での観測効率向上を目指した電波分光計開発 藤巴 一航 (大阪公立大学理学研究科 修士 1 年)

野辺山宇宙電波観測所にある 45m 電波望遠鏡は、その大きさから日本最大の科学観測が可能であり、天体を構成する分子からの輝線を観測することで、銀河中心に巨大ブラックホールの存在を発見や星の形成過程や構造を解明するといった研究を行ってきた。

2022 年 8 月に、星形成の極初期を観測するために重水素化合物と軽水素化合物、及び CO 輝線を観測可能な両偏波マルチビーム受信機 7 BEE(7BEam Equipment) を搭載した。野辺山 45m 電波望遠鏡に現在搭載されている分光計では、帯域幅 2GHz が 16 台であるため、その全てを観測するためには 23 回の観測が必要である。そこで、観測効率を向上させるために全ての帯域を受信できる分光計の開発に取り組んだ。そこで、Xilinx 社の RFSoc 2x2 の使用を検討した。RFSoc 2x2 は、FPGA 搭載を搭載しているため量産に適していること、入力を 2ch 使用することで既存の分光計より帯域幅が 2 倍の 4GHz になるという利点がある。今回、科学観測で使用することが可能かを調べるために、ADC についての評価実験を行った結果について述べる。

## pnCCD 素子の軟 X 線評価システムの構築 藤本 健二郎 (関西学院大学 M2)

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst:GRB) はわずか数秒の間に  $10^{51-54}$  erg ものエネルギーをガンマ線として放出する宇宙最大の天体で、初期宇宙の解明につながる重要な天体現象である。HiZ-GUNDAM ミッションは GRB を発見し、自律制御によりいち早く近赤外線残光を観測することで、初期宇宙の探査を目的としている。我々は、衛星に搭載する広視野 X 線モニターの開発を行っている。ミッション要求を満たす X 線検出

器として pnCCD に着目し、小型素子を搭載した Color X-ray Camera(CXC) を用いて様々な性能の評価を行っている。

本研究では、ミッション要求である 0.4-4 keV 帯域の pnCCD 素子性能を評価するために、実験室で複数の単色軟 X 線を照射できるシステムを構築した。本システムでは、X 線発生装置からの 1 次 X 線を 2 次ターゲットに照射し、2 次ターゲットからの蛍光 X 線を検出器に照射する。オックスフォード社製のタングステン陽極ターゲットとするマイクロフォーカス X 線発生装置を 1 次 X 線とし、2 次ターゲットにテフロン (C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>) を用い、1 次 X 線光軸に対して 45 度で設置した。2 次ターゲットから検出器までの距離を短くし、テフロンの一部に Al、Ti 箔を貼り付けることで、F-K $\alpha$ (0.67 keV)、Al-K $\alpha$ (1.5 keV)、Ti-K $\alpha$ (4.5 keV) などの複数の輝線を同時に評価できるシステムとした。本講演では、構築システムの詳細と予備実験による強度評価および pnCCD での照射実験について発表する。

## 超伝導遷移型 X 線マイクロカロリメータの多画素化に向けた Hydra type の解析 古山 泰成 (立教大山田研 M1)

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<sup>5-7</sup> K のガス (WHIM) として分布することが示唆されている [1]。広範囲の WHIM の詳細な観測には高い分光性能・撮像能力を持つ X 線カメラが求められる。本研究では高いエネルギー分解能を持つ TES カロリメータの多画素化に向けた Hydra type TES カロリメータの性能評価をおこなった [2]。

X 線マイクロカロリメータは、入射 X 線が光電効果によって落としたエネルギーを素子の温度上昇として捉える検出器である。温度測定に用いるのが超伝導遷移型温度計で、超伝導と常伝導の急激な抵抗変化を温度計として利用するものである。この TES カロリメータ (以下 TES; Transition Edge Sensor) は、熱雑音の少ない極低温 (~ 0.1 K) で動作し、X 線入射で上昇した吸収体温度はその後サーマルリンクを通して熱浴へと逃げる。X 線パルス信号の減衰時定数は数百  $\mu$ s、エネルギー分解能はフォノン揺らぎによって決まり、CCD 等の半導体検出器の 120 eV と比べ数 eV のオーダーである。

Hydra type は 1 素子の TES で 4 画素の撮像が可能な技術で、現在までに開発されている数百素子と組み合わせることで数千画素の X 線カメラの開発が可能となる。4 画素はすべてサーマルリンクで接続されており、熱の移動時間すなわち信号の立ち上がり時間が異なるため、X 線が入射した場所を特定することができる。解析では信号時定数によるピクセル分類や各ピクセルのエネルギー分解能の評価をおこなった。

1. M. Fukugita, C.J. Hogan, P.J.E. Peebles, ApJ, vol.503, 518, (1998).
2. K.D. Irwin and G.C. Hilton, Cryogenic Particle Detection 63, (2005).

## 時系列解析を用いた補償光学系における遅延誤差軽減に関する性能評価 穂満 理生 (東北大学 M2)

補償光学系は一般的に波面センサで大気揺らぎを測定して可変形鏡で補正するという構造だが、大気揺らぎの測定と補正の間には時間差があり、補償性能を下げる要因となっている。本研究では、多変数時系列解析モデルにより、波面センサの過去の複数点における測定データと未来の時刻における測定データの間関係を仮定し、大気揺らぎが風で移動することを考慮した時系列予測を行うことで、測定と補正の間の時間差を高精度に補償することを目指している。

現在は補償光学シミュレーションコード OOMAO[1] を用いて様々な設定における測定データを擬似的に作成し、予測性能に寄与する要素を調べている。また、すばる望遠鏡のレーザートモグラフィ補償光学系の開発を進めている ULTIMATE-START プロジェクト [2] の一環で 2022 年 11 月に行われたシャックハルトマン波面センサーを用いた測定実験のデータを用いた実際の測定データの解析も同時に進めている。本発表では、それらの状況について紹介する。

1. R. Conan and C. Correia "Object-oriented Matlab adaptive optics toolbox", Proc. SPIE 9148, Adaptive Optics Systems IV, 91486C (7 August 2014)
2. Masayuki Akiyama, Yosuke Minowa, Yoshito Ono, et al., "ULTIMATE-START: Subaru tomography adaptive optics research experiment project overview", Proc. SPIE 11448, Adaptive Optics Systems VII, 114481O (13 December 2020)

## 月周辺での放射線測定 MoMoTarO プロジェクト 前田 涼太 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙線研究室 修士 1 年)

本研究は、月周辺の中性子やガンマ線を観測する検出器 Moon Moisture Targeting Observatory (MoMoTarO) を開発し、実際に月面で探査を行うことを目標としている。MoMoTarO は、ガンマ線センサ、熱外中性子センサ、熱中性子センサの 3 つが搭載された 1U サイズ (10 cm  $\times$  10 cm  $\times$  10 cm) のモジュールである。ここで用いられているリチウムを含むプラスチックシンチレータ EJ-270 は、従来のヘリウムガス検出器に比べ、振動に強い、小型、省電力などのメリットがある。また、熱・熱外・高速中性子、ガンマ線を区別することにより、高感度の測定を実現している。本研究の目的は 3 つある。1 つ目は、月の水資源探査である。銀河宇宙線が月面に入射すると、核反応を起こし高速中性子が生成される。高速中性子は地中の水資源によって散乱され、熱・熱外中性子となって月面から放出される。これを、月面ローバーに搭載した MoMoTarO で観測する。2 つ目は、ガンマ線バースト (GRB) の観測である。月に

MoMoTarO を設置し、地球近傍の検出器との到来時間差による三角測量を用いることで、従来の位置測定より高い精度で GRB の位置を確定させることができる。3つ目は、中性子寿命の計測である。現在中性子の寿命は、ビーム法とボトル法と呼ばれる二つの計測方法の間で、系統的な違いが存在することが問題となっている。そこで、月面から漏出する中性子を、周回機に搭載した MoMoTarO で観測し、第3の方法での中性子寿命の測定を試みる。これらの目的を達成するために検出器の開発・試験を行っており、2022年10月に、MoMoTarO の試作機による気球実験を行った。この実験は、MoMoTarO が宇宙に近い環境（低温度、低気圧、宇宙線大気シャワーによる高い放射線量）において正常に動作するかを確認することを主な目的としており、高度 30,000m までの中性子の線量の測定を行った。今後の展望として、この気球実験のデータの解析や、放射線源を使ったスペクトル測定、さらに新たな試作機を開発を行う予定である。

## GEO-X 衛星用 MEMS X 線望遠鏡のアニール時間の最適化の研究

山田 裕大 (東京都立大学 M1)

我々は第二十五太陽周期の極大に合わせて打ち上げを目指す超小型衛星 GEO-X(GEOspace X-ray imager) 用に MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 方式の X 線望遠鏡を開発している [1]。300  $\mu\text{m}$  厚の Si 基板に 20  $\mu\text{m}$  幅の微細な穴をドライエッチングで形成し、その側壁を反射面として用いる。水素アニールにより反射面を平滑化し、側壁両端の落ち込みや盛り上がりを研削研磨によって取り除く。高温塑性変形により基板を球面状に変形した後、Pt 薄膜を膜付し X 線反射率を向上させる。最後に 2 枚の曲率半径の異なる基板を重ねて完成する。

MEMS 望遠鏡の製作において特に時間を要するのが、アニールである。水素雰囲気中で Si 基板を高温に保つことで基板表面の Si 原子に対して自己拡散を促し、基板表面を平滑化する。従来は 50 時間の長時間アニールを実施することで 5 分角を切る角度分解能を達成してきた [2]。しかし加工には 1 ヶ月程度と時間を要する為、短縮が求められていた。また装置の修理に伴う条件変化により、再度確認が必要であった。そこで私はアニール時間の最適化を行った。

私はドライエッチングを施した Si 基板を 2 枚準備して一つは 10 時間、もう一つは 50 時間でアニールした。角度分解能に直接影響を及ぼす側壁の形状精度はアニールが長時間になるほど側壁の端がたれることで悪化し、10 時間の方が 50 時間よりも良い傾向が見られ、要求する 5 分角を満たすのは 10 時間の方であった。表面粗さについては、どちらも 1 nm rms @ 1  $\mu\text{m}$  と良好である。これらより現在のアニール装置の環境においては 10 時間で必要十分であることがわかった。これは作業時間の 5 倍程度の短縮に繋がる。本講演ではフライトモデルに向けたアニール条件出しについて述べる。

1. Y.Ezoe et al., *Microsyst Technol*, 16, 1633, 2010
2. A.Fukushima et al., *Optics Express*, 30, 14, 2022

## Boltzmann シミュレーションにおける衝突項計算の GPU を用いた高速化 山菅 昇太郎 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

従来、宇宙の構造形成を説明する理論的なダークマターのモデルの一つとして CDM モデルが使われてきた。このモデルは速度分散が極めて小さくダークマター粒子同士の散乱が無視できる無衝突なダークマターモデルであり、現在の観測される宇宙大規模構造の様々な観測量をうまく説明することに成功してきた。しかし近年では、銀河よりも小さなスケールでは CDM モデルによって観測を完全に説明できない点があることがわかってきている。

この観測との食い違いを解消するために新しく提唱されたダークマターモデルとして、SIDM と呼ばれるダークマター粒子同士の衝突・散乱を取り入れたダークマターモデルがある。[1] SIDM の数値シミュレーションでは、主に N 体シミュレーションによって研究が行われていた。しかし N 体シミュレーションで衝突・散乱の効果を取り扱おうとする場合、その性質からショットノイズが乗りやすい。一方で、ダークマターの分布関数を有限体積法的に取り扱い、その発展を Boltzmann 方程式によりシミュレーションする方法では、原理上ショットノイズが発生せず、高い精度で計算することができる。しかし、速度空間での 5 重積分を計算に含む衝突項を現実的な時間で計算するためには高速化が必須である。

高速に精度よく衝突項を計算する手法として、Gamba et al.(2017) による衝突項の数値計算手法がある。[2] しかし、この方法で CPU による計算コードの実装を行っても一回の衝突項計算にかかる時間は 0.2s-1.0s ほどであり、大規模なシミュレーションを現実的に行える計算時間ではない。本研究では高い演算性能を持つ GPU を用いて、計算の並列化を利用したコードを開発することで高速化を試みた。結果、一回の衝突項評価にかかる時間を 1ms まで短縮することに成功し、CPU での実装と比較して数百倍の高速化効果が得られた。

1. Spergel, D. N., & Steinhardt, P. J. 2000, *Phys. Rev. Lett.*, 84, 3760
2. Gamba, I. M., Haack, J. R., Hauck, C. D., & Hu, J. 2017, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 39, B658

## MeV ガンマ線天文気球観測実験 SMILE-3 吉岡 龍 (京都大学理学研究科宇宙線研究室 修士 1 年)

数百 keV から数十 MeV にかけての MeV ガンマ線における天文観測は古くは 1960 年代から始まっており、銀河中心方向からは大きく広がった空間分布を持つ電子陽電子対消滅線や連続的なエネルギースペクトル構造を持つ銀河系内拡散ガンマ

線が検出されている。しかし、この陽電子の起源や系内拡散ガンマ線の放射機構は未だ明らかにされていない。これらの起源の有力な候補に、原始ブラックホールや暗黒物質 WIMP が挙げられており、天文学のみならず宇宙論・素粒子物理学からも MeV ガンマ線帯域における銀河中心領域の詳細観測が切望されている。

COMPTEL 以降 20 年間停滞する MeV ガンマ線天文学を進展させるべく、我々は電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC) を開発してきた。2018 年には、天体観測実証実験 SMILE-2+ を実施し、銀河中心領域に広がる電子陽電子対消滅線と MeV ガンマ線拡散放射が存在を確認した。よって、SMILE-2+ よりも大面積・高角度分解能の ETCC を気球に搭載し、これらガンマ線の空間分布とエネルギースペクトルを得ることで、原始ブラックホールや WIMP の存在に迫る、SMILE-3 実験を計画している。

ETCC の改良として次の二つがある。一つはガス飛跡検出器中のガスの種類変更による、ガンマ線有効検出面積の向上だ。SMILE-2+ までは Ar ガスが使われていたが、SMILE-3 ではコンプトン散乱確率が高い  $\text{CF}_4$  ガスが一つの候補となっている。[1] もう一つは反跳電子飛跡の読み出し方法の変更による角度分解能の向上である。SMILE-2+ までは反跳電子の検出を micro pixel chamber ( $\mu$ -PIC) を用いた Time projection chamber によって得られる 2 方向からの投影画像をもって検出していたが、これでは特定の電子飛跡に対して不定性が残る。ここで、3 方向からの投影画像を得ることでこの不定性を解消する。具体的には従来の読み出し電極が 2 つだった  $\mu$ -PIC (2 軸  $\mu$ -PIC) を読み出し電極が 3 つのもの (3 軸  $\mu$ -PIC) に変更する。[2]

今回の講演では以上のように改良された SMILE-3 について述べたい。

1. 小林滉一郎, 京都大学修士論文, , 54, 2023
2. 吉田有良, 京都大学修士論文, , 62, 2022

## 野辺山 45 m 電波望遠鏡 100-GHz 帯 MKID カメラ 搭載試験におけるビーム特性の評価 李 豪純 (筑波大学 M2)

我々は、遠方銀河の広域探査や銀河系の  $\text{H}_{\text{II}}$  領域の観測を行うため、野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯連続波カメラの開発を進めている。多素子による観測を目的とした本カメラの焦点面アレイは、109 素子の Si レンズ及び力学インダクタンス検出器 (MKID) によって構成されている。望遠鏡からの信号はカメラの真空窓へ入射すると、2 枚の大口径 Si レンズによる屈折光学系を経て焦点面アレイへと伝送される。2021 年 5 月の搭載試験での火星の観測結果からのビームサイズ評価に続き、2022 年 3,4 月にはより詳細なビーム特性を調べるためクエーサー 3C 273 のラスターキャン観測を行った。

本講演では、各 MKID およびアレイのビーム特性を調べるため、3C 273 の解析結果について報告する。今回新たに観測

した 3C 273 は点源と見なせるため、より直接的なビーム特性の評価が可能である。観測結果の解析のため、 $4' \times 4'$  (Az, El) の領域内でのビームマップを、データの得られた 58 素子分作成した。また、観測結果に対し 1 次元および、2 次元ガウシアンフィッティングを行いビームサイズを計算した。その結果、本カメラのビームサイズの設計値が  $16.3''$  であるのに対して、58 素子のうちビームの見えている 32 素子の結果から導出したビームサイズのアレイ平均は  $16.3 \pm 2.6''$  となり、設計値と一致した。本講演では、フィッティングから得られたビームサイズ、主ビーム能率、NEFD を含めたビームサイズを含めたアレイ全体の解析結果の詳細を報告する。