

2016 年度 第 46 回  
天文・天体物理若手夏の学校

講演予稿集  
観測機器分科会

# 観測機器分科会

サイエンスとテクノロジーの架け橋

日時	7月26日 15:15 - 16:15, 16:30 - 17:30 (分科会別ポスター) ,17:45 - 18:45 7月27日 9:00 - 10:00, 14:45 - 15:45, 17:15 - 18:15 (招待講演:身内 賢太郎氏) , 18:30 - 19:30 (分科会別ポスター) 7月28日 14:45 - 15:45 (招待講師:高見 英樹氏) , 17:15 - 18:15, 18:30 - 19:30
招待講師	身内 賢太郎氏 (神戸大学)「宇宙線観測装置の最前線」 高見 英樹氏 (国立天文台)「光赤外線高解像天文観測の将来」
座長	稲田知大 (東京大学 M2)、毛利清 (東京大学 M2)、吉川慶 (京都大学 M2)、寺尾恭範 (東京大学 M2)、西田和樹 (東京理科大 M2)
概要	<p>今日の天文学は、電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、<math>\gamma</math>線といった電磁波のみならず、ニュートリノ、さらには重力波といった様々な観測手段を用いて盛んに研究が行われています。新たなサイエンスを明らかにするためには、新しい観測手法の確立が不可欠であり、ハードウェアとソフトウェア両面での観測機器開発が重要な役割を担っています。しかし昨今、観測機器開発には高度なテクノロジーの理解が求められるようになり、サイエンスとどちらも最先端の知見を得て研究を進めることは容易ではなくなっています。今年の初め、重力波検出のニュースに世界が沸きましたが、天文学者でさえ、その観測機器の仕組みや、克服してきた技術的課題といった、最先端のテクノロジーを理解している方は多くないのではないのでしょうか。本分科会では、将来の天文学を支える観測機器の最先端の開発について、サイエンス、ハードウェア、ソフトウェアという3つの軸を中心として理解を深め、議論する場を設けます。開発を行う方だけでなく、理論、観測の方も含めた多くの分野の研究者が互いに情報交換を行うことで、当分科会がテクノロジーとサイエンスの架け橋となることを期待します。是非、ご参加ください。</p> <p>注) 装置開発に関するものは基本的に観測機器分科会で扱います。開発する装置が目指す科学目標に話の重点を置く場合は、それに該当する分科会で扱います。</p>

---

身内 賢太郎 氏 (神戸大学)

7月27日 17:15 - 18:15 B会場

## 「宇宙線観測装置の最前線」

宇宙線観測とその観測装置について講演します。

---

高見 英樹 氏 (国立天文台)

7月28日 14:45 - 15:45 B会場

## 「国立天文台の装置開発と若い研究者の参加」

1994年、国立天文台は天文機器開発実験センター（現在の先端技術センター）を設立し、当時建設中であったすばる望遠鏡のために世界と対抗できる観測装置作りを始めました。それも7台同時に作るという大胆なもので、海外の天文学者からは、それまで小望遠鏡用の観測装置しか作ってこなかった日本の天文学者には無謀な挑戦であると言われました。私も無謀な人間の一人です。それをリードしたのは、当時30歳そこそこの研究者、技術者です。結局、すべての装置で科学的成果を上げ、現在も多くの装置が現役で活躍しています。そして、このときに開発に参加していた大学院生が現在の日本の装置開発の中核となっています。先端技術センターはその後ALMA受信機や、ハイパーシュープリームカムなど真に世界をリードする装置を生み出すようになりました。ここでも、やはり若い研究者、技術者が参加し、第一級の人材として成長しています。私は、世界との競争と、またその過程での様々な交流という刺激的な環境がとても良かったのだと思います。今の装置開発は巨大になりすぎて大学院生の間には成果がでない、と言われることがあります。しかし私は、大学院の間に、修士、博士論文をまとめる研究を行いながらも、この刺激的な環境を経験することが重要だと思いますし、大きな装置から小さな装置まで、多くのチャンスがあると考えています。次世代の第一線のサイエンスとそれを実現する観測装置について、海外の研究者・技術者と、真摯に議論し、共同で研究することは、心躍るものがあります。国立天文台をステップにしてこのような世界に踏み入れていただくことを願っています。

## 観測 a1 TMT 中間赤外線観測装置 MICHl 冷却チョッ パー用超伝導 VCM の開発 毛利 清 (東京大学 天文学教育研究センター M2)

中間赤外線における地上観測では大気の放射が非常に大きくこれを取り除くことが課題である。これまで副鏡を動かすチョッピングと呼ばれる技術によって放射を取り除いてきたが、TMT など口径 30 m 以上の次世代大口径望遠鏡の時代においては副鏡が大きくなり、副鏡チョッピングは不可能となる。代替案として副鏡を動かす代わりに、光学的に副鏡と共役な位置にあたる冷却された装置内の鏡を動かすことにより、副鏡を動かした際と同じ効果を得る「冷却チョッピング」という手法が考案されている。冷却チョッピングの実現には低発熱かつ高速で動く動力源の開発が必須であるが、本研究では動力源として駆動部が非接触で摩擦による損失がなく、かつ電気的な駆動により立ち上がり素早いボイスコイルモーター (VCM) に着目した。さらに、低発熱化によって装置の安定性の向上を図るため、VCM には駆動にジュール熱の発生しない超伝導線を用いている。今回は超伝導線を用いた VCM の設計と完成した試作 VCM の試験評価、並びに今後克服すべき課題について発表する。

1. A.T. Tokunaga, et al. 2010, SPIE
2. T. Miyata, et al. 1999, PASP

## 観測 a2 マイクロマシン技術を利用した超軽量 X 線望 遠鏡の超小型衛星搭載に向けた開発と現状 寺田 優 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

近年、超小型衛星の性能向上は目覚ましく、技術実証のみならず、3 軸制御による本格的な宇宙学観測が可能になってきた。X 線天文においても、幾つかの超小型衛星が計画されている。しかし、X 線天体からの光は一般に微弱であり、大型衛星同様に望遠鏡が欠かせない。一方で、従来の望遠鏡は有効面積と重量にトレードオフ関係があり、超小型で大型衛星と相補的なミッションを確立するのは難しいという状況があった。我々は現在、首都大 航空宇宙コースとの共同開発による、ブラックホールバイナリー探査のための超小型衛星 ORBIS (2020 年頃打ち上げ目標) に向けて、超軽量の X 線望遠鏡の開発を行っている。半導体加工技術の一つであるマイクロマシン技術を応用し、超軽量の X 線望遠鏡を開発している。直径 100 mm、厚さ 300  $\mu\text{m}$  のシリコン基板に、深堀エッチングによって 20  $\mu\text{m}$  幅の微細孔を無数に形成し、側壁を水素アニールにより平滑化して、表面粗さ  $\sim 1 \text{ nm}$  程度として、反射鏡として用いる。基板を高温塑性変形により球面に変形した後、反射率向上のために原子層堆積法による重金属膜付けをほどこし、集光結像系として用いる。この手法では、従来に比べ、1 桁以上、軽量かつ高性能の望遠鏡を実現可能である。望遠鏡の性能の鍵となる角度分解能を現在、制限しているのは、鏡表面の形状精度と、鏡の望遠鏡全体に対する配置精度である。我々は ORBIS で目標とする角度分解能 10 分角達成のため、テスト 1 回反射光学系に対して、変形前後でのペンシルビーム X 線照射を行って、形状精度と配置精度の切り分けを行っている。また、H-IIA ロケットの打ち上げを想定した、望遠鏡の振動試験を行って、前後での X 線評価から定量的に、厚さ 300  $\mu\text{m}$  の望遠鏡が、打ち上げ時の振動に耐えうる事を確認した。本講演では、我々の超軽量 X 線望遠鏡の概要と、超小型衛星 ORBIS に向けた開発状況について報告する。

## 観測 a3 次世代型 MeV ガンマ線望遠鏡を目指した電子 飛跡検出型コンプトンカメラの開発と現在の 性能

谷口 幹幸 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

現在、さまざまな波長領域で天文学が切り拓かれているが、MeV ガンマ線領域は数少ない未開拓領域である。しかし、MeV ガンマ線は超新星残骸や銀河面にある放射性同位体、ガンマ線バーストや活動銀河核のジェットなどさまざまな天体、物理過程で放出されており、MeV ガンマ線を高い感度で観測することは重要である。

MeV ガンマ線天文学が未開拓であることの大きな理由は、そのイメージングの難しさにある。MeV ガンマ線が検出器中のターゲット物質とおこす相互作用はコンプトン散乱が主であるが、コンプトン散乱を完全に再現し、到来したガンマ線の方向とエネルギーを得るには、ガンマ線によって反跳された電子の方向とエネルギーおよび散乱後のガンマ線の方向とエネルギーを得る必要がある。現在までに MeV 領域の全天観測に唯一成功した COMPTEL では、反跳電子の方向を得ることができなかったため、コンプトン散乱を完全に再現できず、発見した定常的放射天体は約 30 個にとどまった。また、環境放射線由来の大量のバックグラウンドによっても感度が制限されるため、高いバックグラウンド除去能力が必要となる。

我々はこれらの要請を満す次世代型 MeV ガンマ線望遠鏡として、電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) の開発を進めている。この検出器は、 $\mu\text{-PIC}$  と呼ばれる高位置分解能検出器を用いることで、従来の検出器では困難であった反跳電子の方向を決定することが可能であるとともに、散乱ガンマ線の方向と反跳電子の方向の成す角を幾何学的方法と運動学的方法の 2 通りで求め、両者が一致するイベントのみを取ることで高いバックグラウンド除去を実現する画期的な検出器である。現在は 2018 年頃の気球搭載実験に向け、さらなる感度向上を目指した研究を行っている。

本講演では、ETCC について解説するとともに、現在得られている性能について述べる。

## 観測 a4 ASTE 搭載用 TES ボロメータカメラの開発

鈴木 駿汰 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

我々が開発している TES ボロメータカメラは 2016 年にチリのアタカマ砂漠にある ASTE 望遠鏡に搭載され試験観測が行われる。ミリ波サブミリ波帯連続波観測を行う TES ボロメータカメラは宇宙初期にみられるサブミリ波銀河に加え、近傍銀河の低温ダストからの熱放射、Sunyaev-Zel'dovich 効果を用いた遠方銀河団の高温ガスの観測も可能にする。そこで我々は遠方銀河から近傍銀河までの観測を通して、宇宙のダイナミックな構造形成及び銀河形成史を明らかにすることを目的としている。

TES ボロメータカメラは天体からの入射エネルギーを温度計を用いて温度上昇として検出する極低温で扱う検出器であり、ここで TES は低インピーダンスで動作する温度計のため、インダクター L とキャパシター C から成る読み出し回路として、高感度な磁束計である SQUID を用いている。さらに 1 つの SQUID で複数の TES ボロメータを読み出すことが可能となるマルチプレクス化を利用することで大規模な 2 次元アレイを実現する。

本研究では将来的に、より大規模なカメラの開発を目指しており、そのためには TES ボロメータの素子数を向上させる必要がある。しかし、1K 以下の極低温では、冷却パワーが小さくなるため、熱流入が多くなる理由で配線を大量に入れることは避けたい。そこで、少ない配線と読出し素子数で効率良く読み出す必要があり、マルチプレクス数の向上が将来の TES ボロメータカメラ開発に大きく関わってくる。同時に我々は従来の LC-Board (インダクターとキャパシターが一枚のボード上に配置されている) より歩留まりを向上させたい狙いもある。そこでまずは、特性 ( $L, f \propto 1/\sqrt{LC}$ ) の揃った L を小さなチップから wafer に更新した。それに伴って、TES ボロメータ, L, C を結ぶと共に、C をコンパクトに実装するための回路基板の設計と測定を行った。その結果、この読み出し回路の改良はマルチプレクス数の増加につながり、本研究を実現することによって将来的に素子数を倍増するための道筋を開いた。

### 観測 a5 高角度分解能を目指した X 線望遠鏡用 CFRP 反射基板の精密配置法の開発

横田 翼 (名古屋大学 Ux 研 M1)

従来、日本の X 線望遠鏡は厚さ 0.1 ~ 0.3 mm の多数の X 線反射鏡を同心円上に多数配置した多重薄板型を用いてきた。これは有効面積が大きいという利点を持つが、1 枚の反射鏡が薄く鏡面の形状精度が十分ではないため、角度分解能は数分角に制限される。角度分解能をさらに向上させるためには、高精度形状の X 線反射鏡を開発することが重要である。そのため我々は炭素繊維強化プラスチック (CFRP) に着目し、より薄く軽い高精度な基板の開発を進めている。CFRP は今まで反射鏡基板に使用していたアルミニウムと比べ比重が約 2/3 倍、比弾性率が約 17 倍と軽量かつ高剛性であり、高精度な基板成形に適した素材である。次に大切なのは反射鏡基板を精度良く配置決めをすることである。これまでは、アライメント・バーが持つ“くし”の歯状の溝に反射鏡をさすことで反射鏡の位置決めを行ってきた。この方法の位置決定精度は 10  $\mu\text{m}$  程度であり、結像性能の劣化は 1 分角程度になる。

本研究では、精密位置決め装置であるピエゾ・アクチュエータを用いて CFRP 基板同士を精密に配置する位置調整機構を開発した。位置調整方法としては、まずピエゾ・アクチュエータを 6 個取り付け付けた機構に CFRP 平板を固定した。そして、平板の端 6 カ所をピエゾ・アクチュエータで押し引きして高さを変え、その様子をレーザー顕微鏡で観察・高さ測定しながら位置調整を行った。まず、平板を適当な間隔で完全に平行となるよう配置する試験を行った。その結果、位置調整精度は 1  $\mu\text{m}$  以下を達成した。さらに、機構に取り付けた平板 6 カ所をピエゾ・アクチュエータで位置調整し、表面形状を矯正することで、平板のうねりの大きさを 10  $\mu\text{m}$  以下にする実験を行った。その結果、位置調整前の 33.9  $\mu\text{m}$  から 7.7  $\mu\text{m}$  と、大きく削減した。

この研究により、うねりの大きさを 10  $\mu\text{m}$  以下に矯正した CFRP 反射鏡同士をピエゾ・アクチュエータによる位置調整によりアライメント・バーの 1/10 以下の精度で配置する方法が可能になる。

### 観測 a6 すばる望遠鏡レーザートモグラフィ補償光学用波面センサーユニットの開発

渡邊 達朗 (東北大学天文学専攻 M1)

本発表では、我々のグループが検討しているすばる望遠鏡の次世代補償光学系のための波面センサーユニットの開発状況について紹介す

る。地上の大型望遠鏡にとって大気ゆらぎによる像の劣化を改善する補償光学の技術は必要不可欠となっているが、従来の補償光学では望遠鏡の視野のわずかな部分しか補償することができなかった。我々のグループでは、すばる望遠鏡の赤外ナスマス焦点に設置が検討されている多天体補償光学 (MOAO) と呼ばれる広視野補償光学系の導入・開発実験を進めている。MOAO ではトモグラフィと呼ばれる手法により、複数のガイド星の波面情報から観測天体方向の波面の情報を 3 次元的に推定する。これにより、視野に広く点在する銀河に対して同時に補償を効かせることができ、すばる望遠鏡の口径を活かした観測が可能となる。MOAO では複数のレーザーガイド星を用いて波面を測定するが、レーザーガイド星は高度 90km にあるナトリウム層を励起発光させて生成するため、無限遠にある自然ガイド星とは合焦位置が異なる。またナスマス焦点に設置することで、追尾中に天体を写野に固定しておくためには写野を回転させるイメージローターが必要になるが、レーザーガイド星は主鏡に対して固定であるため、レーザーガイド星の検出器は天体に対して独立に回転させなければならない。本発表ではこれらの問題を克服するために必要な機械的な機構を含め、波面センサーの光学設計など現状の開発状況について説明する。

### 観測 a7 次世代ガンマ線天文台 CTA 大口径望遠鏡に搭載する信号波形サンプリング回路の開発

野崎 誠也 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

宇宙の高エネルギー現象を理解するために、大気シャワーで生じるチェレンコフ光を用いて超高エネルギーガンマ線を間接的に検出する手法がある。超高エネルギーガンマ線天文台の次世代計画 CTA (Cherenkov Telescope Array) では、従来の望遠鏡よりも 10 倍の感度を達成し、北・南両サイトに大きさの異なる 3 種類の望遠鏡を計約百台建設し、20GeV から 300TeV という広いエネルギー領域で全天観測する。その中でも直径 23m の大口径望遠鏡 (LST) は、より多くのチェレンコフ光を集光できるため、エネルギー閾値を下げることができ、遠方の活動銀河核、ガンマ線バースト、パルサーの研究において重要な数十 GeV から数百 GeV 領域に焦点をあてた望遠鏡である。LST の焦点面カメラは、7 本の光電子増倍管 (PMT) とその出力波形をサンプリングする読み出し回路基板などを束ねた光検出器モジュール 265 個で構成される。チェレンコフ光からの数ナノ秒幅の信号を記録し、星の光などの夜光バックグラウンドを効果的に除去するために、信号波形を高速サンプリングするシステムが必要となる。我々が開発した読み出し回路では、アナログメモリの ASIC “DRS4” チップを採用している。これは 9 つの差動入力チャンネルをもち、1 チャンネルあたり 1024 個並んだキャパシタに入力アナログ波形を GHz で順次保存していく。保存された各キャパシタの電圧値は低速の ADC で読み出されるため、高速サンプリングを低コスト・低消費電力で実現できる。現在、光検出器モジュールを 19 個組み合わせたミニカメラの動作試験を行っており、較正が終わり次第、順次出荷していき、今年度中に LST 初号機の建設が開始される予定である。また、次号機以降での搭載に向けた新版の読み出し回路の設計も行っており、DRS4 のタイミングキャリブレーション用のオシレータなどを新たに配置する予定である。本講演では、初号機搭載に向けたカメラの試験状況、及び新版回路の設計の概要、試験結果について報告する。

## 観測 a8 補償光学系とコロナグラフを用いた系外惑星の分光観測精度の向上

細川 晃 (国立天文台三鷹 総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻 M1)

これまで発見された太陽系外惑星は 3000 を超えており、発見された惑星をフォローアップ観測することで各々の惑星の物理量や大気を探ることが重要になっている。近年、トランジット法で恒星光を低分散分光観測することで惑星大気中の分子検出が行われているが、低分散分光ではスペクトルモデルを作成しないと分子種の情報は得られず、系統誤差の影響が大きいという問題がある。一方、Hot Jupiter や若く高温な巨大惑星を高分散分光観測し、相互相関解析を介して分子の波長パターンを検出する手法が成功し、一酸化炭素や水などの分子が検出されるようになってきた。この手法は系統誤差を減らすことができ、より確実な分子検出が可能ではあるが、低温・低質量の惑星から得られるシグナルは、主星光の光子ノイズに埋もれてしまうため大気組成を詳しく調べるのが難しい。本発表では、補償光学系とコロナグラフを組み合わせて、主星の光量を抑えた上で分光する手法を提案した論文を紹介する。分光器の前にコロナグラフを組み込むことで主星由来のノイズを低減し、より高い S/N で惑星のスペクトルを得ることを可能にする。これにより、より細かなスペクトルが得られることに加え、より低温・低質量の惑星を検出することが出来る。また以上の手法を用いることを見据え、今後研究する空間分解能を持つ高分散分光装置について提案する。

1. H.Kawahara et al. Apj. 212.2:27.10 (2014)

## 観測 a9 超小型衛星 ORBIS 搭載へ向けた MEMS X 線光学系の設計検討

武内 数馬 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

我々は、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡、MEMS X 線光学系を開発している (Ezoe et al. 2010 Microsys. Tech.)。これまでに Wolter I 型望遠鏡による Al K $\alpha$  1.49 keV の結像実証、Ir 膜付けした 1 回反射光学系による Ti K $\alpha$  4.51 keV の反射実証に成功している (Ogawa et al. 2013 Appl. Opt.)。今回、超小型衛星 ORBIS に向け光学設計を行った。ORBIS (ORbitting Bairy black hole Investigation Satellite) は首都大を中心に設計・開発を進めている超小型衛星で、バイナリーブラックホールの探査を行う。超小型という特性をいかすために、軽量・安価・短焦点の望遠鏡が必要とされ、その観点から MEMS X 線望遠鏡を搭載する予定である。ORBIS では活動銀河核 (AGN) からの X 線放射の時間変動を捉えるため 2–10 keV における集光が必要となる。我々は独自に構築した光線追跡シミュレーションを用いて、ORBIS に対する MEMS X 線光学系の最適設計を模索した。従来の Wolter I 型 (2 段) に加え、1 段、3 段、4 段、さらに小型化した光学系についてシミュレーションを行ったところ、小型化した場合が最適であることがわかった。

1. “Ultra light-weight and high-resolution X-ray mirrors using DRIE and X-ray LIGA techniques for Space X-ray Telescopes”, Y.Ezoe et al., Microsys. Techn
2. “First X-ray imaging with a micromachined Wolter type-I tele-

scope”, T.Ogawa et al, Microsys. Tech., in press

## 観測 a10 X 線天文衛星ひとみにおける自律型時刻決定法の検証

大清水 健也 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M1)

X 線天文衛星「ひとみ」では、パルサーなど時間変動の速い天体を観測するため、GPS 衛星からの信号を基準とした時刻配信システムを採用している。具体的には、GPS 衛星からの時刻情報をもとに衛星の中央管理コンピュータ (SMU:Satellite Management Unit) で衛星内部の時刻情報を生成し、ネットワークを介して各検出器に配信し、衛星内の各機器で記録される時刻を同期している。さらに、GPS 衛星との通信ができない場合に備え、ひとみ衛星は SMU 内部のクロックで代わりの時刻を自律的に生成・配信する機能ももつ。本研究では、この機能の検証をおこなった。検証すべき課題としては以下の 3 つが挙げられる。(1) SMU クロックのもととなる水晶発振子の温度依存性の補正方法の検証、(2) GPS 信号の補足ができたときに、矛盾なく時刻情報を接続するアルゴリズムの検証、(3) 地上補正での最終時刻決定値の精度と時刻精度目標値との比較である。我々は、衛星熱真空試験で得られたさまざまな温度条件における衛星ネットワーク上での時刻データと、単体試験で得られた SMU クロックの温度特性を比較し、両者が一致しており予定していた温度補正方法が適用できることを確認した。また、同試験中に GPS 衛星の通信の遮断と回復試験も行い、自走した SMU クロックによる時刻付けが、GPS との通信回復時に矛盾なく接続されており、アルゴリズムが正常に機能することを確認した。さらに、ソフトウェアによる最終時刻補正にて、その時刻精度と目標値の比較、検証を行った。

## 観測 a11 DIOS 衛星に搭載する 4 段反射型望遠鏡の反射鏡形状の改善

菅沼 亮紀 (名古屋大学 Ux 研 M1)

近傍宇宙の観測では宇宙初期から推定されるバリオン量の半分以上が未検出であり、それらはダークバリオンと呼ばれる。ダークバリオンの多くは、温度が  $10^5 - 10^7$  K の希薄な銀河間物質として宇宙の大規模構造に沿って分布すると考えられている。ダークバリオンの空間分布の解明を目的とした DIOS 衛星には、大有効面積 (S) と広視野 ( $\Omega$ ) ( $S \geq 100 \text{ cm}^2 \text{ deg}^2$ ) の望遠鏡が要求される。この望遠鏡の開発において、結像性能の要求値 5 分角の達成は重要である。要求を満たすための望遠鏡として、我々は 4 回反射型望遠鏡の開発を行っている。従来の 2 回反射型望遠鏡の光学系を 4 回反射に拡張することで大有効面積かつ広視野の望遠鏡製作が可能となるが、反射回数が多くなるほど反射鏡の形状誤差や位置決め誤差による結像性能への影響は大きくなる。現状の反射鏡の結像性能 (HPD: Half Power Diameter) は、4 段 1 組で 6 分角が最も良い値であるが、これは要求値を満たしていない。望遠鏡の結像性能劣化要因には、単体反射鏡のもつ形状誤差やハウジング内での反射鏡の変形、反射鏡の位置決め誤差が考えられる。このうち、単体反射鏡のもつ形状誤差は、レプリカ反射鏡製作の各プロセスに起因しうが、今回は基板の熱成形やレプリカ反射鏡のマンドレルとして用いられる金型形状精度の評価から検証を行った。円錐形の金型の形状精度を、接

触式精密 3 次元測定器を用いて測定を行った。その測定結果から母線方向のスロープエラーと円周の真円度、円錐の頂角などを円錐モデルのフィッティングにより解析する。そこで得られた解析結果から、製作した金型の形状が設計値にどの程度近づけられたかを評価する。測定で得られたデータを解析し、金型の円錐頂角の設計値とのずれ、および光軸方向形状の真直度、即ち PV 値を評価した。本発表ではこの結果についてまとめ、反射鏡の性能への影響を評価し、その現状を報告する。

## 観測 a12 重力波源の特定を目指した広視野 X 線撮像検出器の開発

伊奈 正雄 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

2018 年頃から世界中で本格的に重力波観測が開始される。重力波のみの観測では、方向決定精度が 10-100 平方度と非常に粗く、母天体を特定することが困難であるため、電磁波との同時観測が重要となる。特に、中性子星連星の衝突・合体は重力波候補天体であると同時に短時間ガンマ線バースト (SGRB) の母天体であると考えられている。我々は重力波発生源を精度良く方向決定するとともに、いち早く地上へアラートを送信することを目指している。これにより、残光を多波長で観測し、母天体までの距離を特定したり、ブラックホールの形成メカニズムを解明することを目的としている。また、軟 X 線帯域での観測により、HETE-2 以降観測されていない X 線フラッシュや、SGRB の X 線超過の放射機構の解明、高赤方偏移ガンマ線バーストの観測が期待される。そのため、我々は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 分角を目標とした広視野 X 線撮像検出器を開発しており、2018 年度打ち上げ予定である 50kg 級の超小型衛星への搭載を予定している。広視野 X 線撮像検出器はストリップ型シリコン半導体検出器 (SSD) と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) が一体となっている。信号の読み出しにおける主要なノイズは、SSD の基礎特性であるリーク電流・静電容量に起因するノイズであるため、様々な電極幅の SSD を開発し、リーク電流・静電容量を測定することでフライトモデルに搭載する電極幅の最適化を行った。また、ASIC の 2 号機は信号の読み出し下限値 1.5keV、エネルギー分解能 1.0keV を達成しているが、さらなる性能向上を目指して、3 号機の開発に向けた設計を進めている。本講演では SSD の電極幅の決定、ASIC と組み合わせた性能評価、今後の開発目標について報告する。

1. D. Lazzati et al. 2001

## 観測 a13 CMB B-mode 偏光観測実験 POLEARBEAR-2 のための多重読み出し試験

田邊 大樹 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究所 M1)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB, Cosmic Microwave Background) は宇宙の晴れ上がりの時期に放たれた光であり、その偏光パターンは発散成分である E-mode と回転成分である B-mode に区別される。中でも B-mode は、古くはインフレーション時に発生した原始重力波、新しくは銀河による重力レンズ効果の影響を留めているとされ、これを観測することでインフレーションのエネルギースケールや宇宙のニュートリノ

質量和に制限を与えられると期待されている。発表者らが行っている POLEARBEAR-2 実験 (PB-2) は、CMB の B-mode 偏光の精密観測を目指す実験であり、2017 年よりチリ・アタカマ高地での地上観測を開始する。特徴として、(1) 7,588 個の超伝導 TES (Transition Edge Sensor) により統計感度を向上させる、(2) 95GHz, 150GHz の両周波数帯域を観測することで前景放射の影響を除去する、の 2 点が挙げられる。一方で大型・多チャンネル化により光学系や読み出し系から流入するノイズの増大が予想され、これらの問題の解消に向けて開発研究が進められている。特に発表者が携わっている読み出し系には、多チャンネルの出力を一本の読み出し線で読み出すことで読み出し線からの熱の流入を抑える周波数多重化 (fMUX) の手法が用いられている。TES を用いた観測は多チャンネル化が進む傾向にあるが、PB-2 は 8,000 に迫るチャンネルの読み出しを計画しており、この規模の多重読み出しには先例がない。本講演では、PB-2 実験の概要と、その読み出し系の評価試験について紹介する。

1. M.A. Dobbs et al. arXiv:1112.4215v2 (2012)

## 観測 a14 大型自由形状光学素子の表面計測を可能にする小型干渉計

今西 萌仁加 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

望遠鏡の建設において鏡など光学素子の表面計測は不可欠である。従来ではその手法として干渉計が広く用いられてきている。しかし、その原理的な制約から望遠鏡の大型化・多様化に際しての問題点として、1) 計測装置の巨大化、2) 空気乱流や振動など測定環境に対する弱さ、3) 個々の被検面に即した基準光学系が必要で実質的に凸面は計測不可能、が考えられる。そこで、我々は分割計測とデータステッチングを用いて以上の問題を解決する大型自由曲面の計測方法を考案した。これは、手のひらサイズの小型干渉計を用いて計測面を複数に分割し、それぞれのデータをなめらかにつなげる手法である。この方法によって、1) 計測装置の小型化、2) 光路差短縮による空気乱流や振動の影響の軽減、3) 狭い視野内において曲率一定であると近似することで廉価な基準光学系で実現可能、となる。またこの計測装置は、汎用の加工機に取り付けて加工と計測を効率よく行うことで、素子の加工期間短縮と測定精度の向上を目指す。このとき加工機固有の高周波振動が問題となるため、高速でデータを取得する必要がある。本研究では以上の点を満たす干渉計の開発を行った。

今回開発したフィゾー干渉計は全長 300mm 程度のサイズで、液晶リターダと高速カメラにより 5 ミリ秒で干渉画像を取得できる。実際に製作した装置で、面精度  $\lambda/20$  の参照面と  $\lambda/10$  の被検面を用いて 3 つの位相の干渉縞を取得し、3 ステップ法のアルゴリズムに基づいて表面形状を解析した。得られた結果は P-V で  $\lambda/2$  という値であった。これは要求する精度の  $\lambda/10$  を下回る値であるが、光学素子のアライメント誤差に由来しているので改善可能である。

今後は上記の誤差の改善と加工機への取り付けに対する耐性向上に取り組む。

1. Daniel Malacara(ed.) (2007). Optical Shop Testing, 3rd Edition



## 観測 a15 超伝導遷移端検出器の弱結合の理解へ向けた臨界電流測定

北澤 誠一 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

バリオンは、ダークエネルギー (71%) やダークマター (24%) に比べると、存在量は5%と小さいが、宇宙の大規模構造形成と化学進化で果たした役割は大きい。バリオンの多くは中高温銀河間物質 (WHIM) と考えられているが、弱く広がった X 線放射が主となるため、過去の X 線ミッションで検証は困難であった。これを打破するには、バックグラウンド放射と WHIM を精密分光で切り分けることが鍵であり、X 線 CCD のエネルギー分解能を桁で上回る検出器が必要であった。我々は、WHIM を捉える将来 X 線衛星 DIOS への搭載を目指し、超電導の精密 X 線分光器の開発を行っている。TES 型カロリメータは Ti と Au の 2 層薄膜で構成される。50mK 程度の極低温で動作させ、超電導から常伝導への 2 次の相転移に伴う物理量 (抵抗値) の飛びを活用した超高感度の温度計であり、エネルギー分解能は 6.4keV で約 2eV の精度で測定が実現できる。

近年の TES の多素子化の研究が進んだことにより、巨視的な波動関数が TES の内部や外部の電磁場との干渉により、予測が困難な挙動を引き起こすことが分かってきた。そのため、物性物理や超電導物理を駆使し、実測により複雑な TES の物理を正しく理解することが重要である。

我々は TES 物理の解明に向けて、自作した TES を様々な外的環境に置いて、超電導特性を測定するセットアップの構築を行っている。TES に 0.01G 程度の精度で可変できる磁場をかけ測定を行う計画であるが、この磁場は地磁気よりも小さい為、地磁気を遮蔽する必要がある。現在、我々が使用している無冷媒希釈冷凍機で用いているシールドは主に無酸素銅であるが、比透磁率が 1 程度であり地磁気の遮蔽がほぼできていない。そこでその中の 4K シールドに、新たに Ni と Mo と Fe の合金で出来ている CRYOPYH というシールドを無酸素銅の代わりに用いると、比透磁率が 70000 である為シールド内の地磁気を 1/33 程度まで遮蔽できる。また、超電導磁気シールドを用いても地磁気を遮蔽でき、100mK シールドに Al 磁気シールドを用いると 1/25 程度まで遮蔽できると予測できる。

本講演では、これらのシールドを用いた地磁気遮蔽について調査及び実験結果について報告する。

## 観測 a16 近赤外線分光カメラ SWIMS の低温光学系結像評価

大橋 宗史 (東京大学 天文学教育研究センター M1)

近赤外分光カメラである SWIMS は、光学系全体を 100K 以下に冷却することでカメラ本体からの黒体放射を抑える必要がある。SWIMS の光学系はその温度が 65K に最適化されて設計しているが、実際に製造を行い、組み立て冷却試験を行った結果、冷却システムの能力が設計値よりも低く、到達温度が高くなる可能性があることが明らかになってきた。そこで問題となるものの 1 つに、光学系の温度変化による結像性能の変動がある。具体的には、結像時のスポットダイアグラムには大きな変化はないものの、硝材の屈折率の温度依存性および光学系の温度収縮のため、焦点位置がずれてしまう。焦点調整だけでは望遠鏡側の調整を行うことでも可能だが、分光観測用のスリットマスクとカメラ光学系との間の位置調整が行えないために、波長分解能を維持するために

は検出器側で焦点調整をする必要がある。本講演では、光学系の温度変化を考慮した上で光線追跡を 65K~100K でシミュレートし、SWIMS の結像性能の温度依存性を評価するとともに、実温度で検証した結果を報告する。

1. K. Motohara, et al., Proc. SPIE 9147 (2014)

## 観測 a17 近赤外線検出器 HAWAII-1RG の駆動試験

山口 淳平 (東京大学 天文学教育研究センター M1)

我々は、中間赤外線撮像分光装置 MIMIZUKU (Mid-Infrared Multi-field Imager for gaZing at the UnKnown Universe) を東京大学アタカマ天文台 (TAO) 計画で建設中の 6.5m 望遠鏡の第 1 期装置として開発中である。TAO の建設予定地は大気中の水蒸気量が非常に少なく、赤外線波長における大気透過率が高くなる。この特長を活かすため、MIMIZUKU は 1 台で波長 2-38 $\mu\text{m}$  という広い波長範囲をカバーしている。

この波長範囲をカバーするために MIMIZUKU は 3 つの波長チャネルを持っており、それぞれに異なる検出器が搭載される。このうち最も短波長側 (2.0-5.3 $\mu\text{m}$ ) では、Teledyne Scientific & Imaging (TIS) 社の検出器 HAWAII-1RG (HgCdTe 5 $\mu\text{m}$ -cut off, 1K $\times$ 1K pixel) を使用している。HAWAII-1RG の感度波長では特に L,M-band において背景光の明るさによって読み出し時間に対して制約が生じるため、読み出しを出来る限り高速化したい。しかし、読み出しのピクセルレートを速くすると読み出しノイズが増加するという報告がある。そこで我々は、TIS 社から提供されている読み出しシステムを用いずに独自の読み出しシステムを開発して、柔軟に設定を変えながら最適な読み出し設定を模索できるようにした。本講演ではこの読み出しシステムについて行った、HAWAII-1RG の駆動に向けた駆動環境の設定、読み出しシステムの動作確認と HAWAII-1RG マルチプレクサの駆動試験について報告する。

1. 藤堂颯哉：修士論文「近赤外多天体分光カメラ SWIMS における検出器読み出しシステムの開発と評価」、東京大学 (2015)

## 観測 a18 TES 型 X 線カロリメータの読み出し系の改良

田中 桂悟 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

X 線マイクロカロリメータは入射する X 線光子 1 つ 1 つのエネルギーを、素子の温度上昇として計測する検出器であり、0.1 K 以下の極低温で動作させることにより、優れたエネルギー分解能を実現する。中でも TES 型は、超伝導遷移端を高感度の温度計として利用することにより、 $E/\Delta E > 1000$  の分光性能が期待できることから、X 線天文学における次世代精密分光装置として最も注目されている。我々は将来の X 線天文衛星への搭載を念頭に置き、微小重力下で < 0.1 K の極低温を実現できる断熱消磁冷凍機 (ADR) をカロリメータと一体で開発している。昨年は温度制御ロジックの見直しによる温度安定度の改善について報告した (2015 年夏の学校 a7 海道, b9 伊東)。その後、安定した素子評価環境の実現を目指して、さらなる ADR の改善に努めてきた。現在 5.9 keV

の X 線に対して  $3.8 \pm 0.4$  eV (FWHM) のエネルギー分解能を実現しているが、ここで使用した TES 素子は希釈冷凍機上で 2.8 eV の分解能を記録した素子であり、我々の ADR 上ではまだ改善の余地がある。その原因について詳しく調べたところ、数百 Hz の周波数帯域における読み出し系 (TES 素子の信号読み出しに使用している SQUID 電流計とその後段の増幅回路) の雑音が大きいが原因であることが分かった。そこで、SQUID 電流計を低発熱型のものに変更して、極低温部で動作できるように変更し、さらに後段の増幅回路を見直して、雑音の低減に取り組んでいる。本講演ではこれらの改良について報告する。

## 観測 a19 26 cm 口径可視光望遠鏡による観測システムの自動化

山田 宗次郎 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M2)

当研究室では、2009 年 8 月から全天 X 線監視装置 MAXI を用いて、恒星からの巨大 X 線フレアを探査している。MAXI で検出したフレアの即時追観測を目的として、2012 年度に後楽園キャンパス 6 号館屋上に、ドーム型可視光望遠鏡 CAT (Chuo-university Astronomical Telescope) を設置した。U, B, V, R, I, H $\alpha$  フィルターを用いた測光観測を行っており、視野分角は  $51 \times 34$ 、限界等級は都内中心ながら V バンドで約 14 等級である (露光時間 120 sec、S/N = 10)。現在、追観測実現のために観測設備の制御ソフトの動作試験など、観測システムの自動化を進めている。一方で市販の分光器 (R  $\sim 10$  Å) を導入し、手動の切り替えによって、分光観測を行うことができる。限界等級は約 8 等級 (露光時間 300 sec、S/N = 50) であり、今年度に可視光分光観測用ドームを設置する計画を立てている。これによって今まで前例がないであろう、恒星フレアの X 線と可視光による測光かつ分光の同時観測が可能となる。本講演では、観測システムの自動化の現状を報告する。

## 観測 a20 FORCE 高角度分解能硬 X 線望遠鏡に向けた基板成膜による変形の調査

中野 慎也 (名古屋大学 Ux 研 M1)

多くの銀河中心に、最大 10 億太陽質量もの超巨大ブラックホールが存在するが、超巨大ブラックホールがどう形成され成長してきたかは謎である。小型衛星計画 FORCE は、この謎の解明を主目的とし、1~80 keV のエネルギー帯域において、15 秒角 (HPD) 以下の高角度分解能で撮像分光観測する。大有効面積と高角度分解能の両立が必要な FORCE では、薄い反射鏡基板を同心円状に多数配置した多重薄板型 Wolter-I 光学系を採用する。高角度分解能実現のため反射鏡には高い形状精度が要求される。これまでのところ、薄板ガラスを使った基板自身では、角度分解能 15 秒角を満たす形状精度が達成されている。しかし、X 線反射鏡として薄い基板に数百~数千 Å の金属膜を成膜すると膜の内部応力により分角オーダーまで形状が悪化してしまう。本研究では、薄い反射鏡で角度分解能 15 秒角を実現するため、成膜による変形を十分に抑える方法の確立を目指す。まず、膜の性質を調べるために、30mm  $\times$  70mm の薄板ガラス (0.21mm 厚) に X 線反射鏡で使われる Pt 単層膜、Ir 単層膜および Ni(90%)+V(10%) 合金の単層膜を成膜した。その結果、Pt および Ir 単層膜では突っ張る方向、NiV 単層膜では縮む方向

に応力が発生し、薄板ガラスに変形が生じた。また、内部応力が経年変化することも明らかにした。次に、ガラスの両面に反射膜を成膜することで、変形を打ち消す方法を試みた結果、変形が 1/5 以下に抑えられた。また、ブラッグ反射を利用して硬 X 線を反射させるために必要な重元素と軽元素を交互に成膜する多層膜についても変形量を評価した結果、重元素が占める厚さの割合がおおよそ 0.4 で変形が最小となった。本講演では、Pt 単層膜を NASA/GSFC で作製された Wolter 型のガラス基板に成膜した際の変形量についても報告する。

## 観測 a21 裏面照射型 X 線 SOI ピクセル検出器の軟 X 線性能評価

林 秀輝 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

我々は、次世代の X 線天文衛星「FORCE」搭載予定である X 線照射型 SOI ピクセル検出器「XRPIX」を開発している [1]。XRPIX は、SOI(Silicon On Insulator) 技術を用いた検出部・読み出し回路一体型の検出器である [2]。各ピクセルにヒットタイミングを出力させるイベントトリガー機能を備えることで、 $\sim 10$   $\mu$ s の時間分解能を実現する。これまで主に用いられてきた X 線 CCD の時間分解能  $\sim$  数 s を大きく上回る時間分解能により、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法を用いることができる。このことにより、XRPIX は 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 をはるかに上回り、超新星爆発の機構などの解明に大きな進展をもたらすことができる。

XRPIX の表面には 10  $\mu$ mm 程度の回路層が存在するため、表面照射型の観測方法では軟 X 線検出が困難である。このため、不感層の薄い裏面照射型素子の開発が必須である。我々は、これまでに、XRPIX2b と呼ばれる素子に 2 種類の方法で裏面処理を行った。不感層厚を計測すると 1.1–1.5  $\mu$ m、0.9–1.0  $\mu$ m であった [3]。0.5 keV を検出するための不感層厚の要求  $< 1$   $\mu$ mm を満たしているものもあるが、軟 X 線感度のさらなる向上のため不感層厚 0.1  $\mu$ mm を実現したい。そこで、今回、同じ XRPIX2b に対して CVD という異なる方法の裏面処理を施し、薄い ( $< 0.1$   $\mu$ mm) SiO<sub>2</sub> を蒸着させた。様々なエネルギーの X 線をこの素子に照射し、各エネルギーでの量子効率を求めることで不感層厚を実測し、過去の結果を上回るものであるかを評価する。また、暗電流の測定も行い、この素子の暗電流起源ノイズについて評価する。

1. T.G. Tsuru, et al., Development and performance of Kyoto X-ray astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor, Proc. SPIE9144 (2014) 914412.
2. Y. Arai, et al., Development of SOI pixel process technology, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 636 (2011) S31.
3. M. Itou, et al., The first back-side illuminated types of Kyoto X-ray astronomy SOIPIX, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A (2016 in press).

## 観測 a22 将来衛星に向けた積層配線 TES 型 X 線マイクロクロリメータの表面粗さの改善と評価

小坂 健吾 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

我々は将来の小型科学衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) に向けて、独自の積層配線デザインを用いた TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータを開発している。TES は超伝導金属の常伝導-超伝導転移時の急激な抵抗変化を利用して、X 線光子のエネルギーを高い分解能で分光する X 線検出器である。我々はこれまでに  $4 \times 4$  アレイを用いて、5.9 keV において 2.8 eV のエネルギー分解能を達成した。これは従来の X 線 CCD に比べ、1 桁以上優れている。

DIOS では検出器の性能として、1 cm 角の有効面積と 2 eV のエネルギー分解能が要求されており、そこで我々は 200  $\mu\text{m}$  角を 1 素子とした、大規模 400 ピクセル TES アレイを製作している。その際、単純な配線デザインでは多素子化すると配線スペースが問題になることや、密集した配線間でクロストークが発生しエネルギー分解能を劣化させることから、我々のグループでは超伝導積層配線と呼ぶ、素子までの行きと帰りの配線を絶縁膜を挟んで上下に配置するデザインの開発に取り組んでいる。これまでに、400 ピクセル用の積層配線自体の超伝導転移は確認済みであり、現在は配線に TES をパターンニングして、アレイの製作に取り組んでいる。しかし、これまでの試作品では TES が良好に転移しなかった。原因として有力なのが、二乗平均面粗さ 4.5 nm に達している TES 表面の粗さであり、これを 5 倍程度改善する必要がある。我々は TES 表面の粗さの原因が、下地の配線製作プロセスにあることを特定し、配線の素材を変更し、傾斜角度を浅くするなどすることで、積層配線ではない従来の素子に筆記する二乗平均面粗さ  $\sim 1$  nm の達成に成功した。また、配線表面を研磨する新たな手法も試している。本講演では、積層配線 TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発の現状について述べる。

1. Ezoe et al. 2015 IEEE TAS
2. Kuromaru et al. 2016 JLTD

## 観測 b1 次世代ガンマ線望遠鏡 CTA 小口径望遠鏡用焦点面カメラ校正システムの開発

中村 裕樹 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所 M1)

チェレンコフ望遠鏡アレイ (Cherenkov Telescope Array、CTA) は超高エネルギーガンマ線を地上から観測する次世代の国際天文台計画である。異なる口径の望遠鏡を数  $\text{km}^2$  の広範囲に多数設置することで、20 GeV から 300 TeV のエネルギー範囲にわたるガンマ線を、現行のガンマ線望遠鏡より 1 桁高い検出感度での観測を目指している。

我々は 3 つの異なる小口径望遠鏡の設計のうち、Gamma-ray Cherenkov Telescope (GCT) の焦点面検出器を開発している。GCT では副鏡を用いた Schwarzschild-Couder 光学系を採用することで、従来の地上ガンマ線望遠鏡に比べて結像性能が高く、また焦点面カメラを小さくできる。カメラの小型化により費用の低減が可能となり、望遠鏡の設置台数を増やすことができる。GCT の焦点面検出器には多ピクセルの半導体光検出器と小型の波形記録回路を用いることで、従来の光電子増倍管に比べ小型で多チャンネルの読み出し、高い光検出効率の達成が可能になる。検出器に用いる半導体光検出器は、出荷時には暗電流特性や検出効率といった基本特性しか測定されていない。そのため全てのピクセルについてノイズ、時間応答特性、ゲイン特性について校正を行う必要がある。本研究では多数の検出器の校正を効率的に行うため、波形記録回路も含め校正を行うシステムを開発する。本講演では焦点面カメラの校正方法について報告する。

## 観測 b2 NANTEN 2 115GHz 帯受信機用 IF 系の開発

栗田 大樹 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

我々の研究室では南米チリ共和国のアタカマ高地に所有する 4m サブミリ波望遠鏡「NANTEN2」を用いて主に一酸化炭素分子 CO の  $J=2-1$  および  $J=1-0$  の輝線を観測している。この輝線は分子ガスをトレースしており、このデータから大質量星の形成過程や超新星残骸など様々な星間現象の解明が期待されている。

現在我々は「NANTEN2」を用いて全天のうち主要な 37% の範囲の分子雲の分布を調査する NASCO (NAnten2 Super CO survey as legacy) 計画を推進している。広範囲を詳細に観測する NASCO 計画には高い観測効率が求められる。そのため現在の受信機構成 (1 ビーム・片偏波) を見直し、115GHz 帯では 4 ビーム・両偏波・SSB、230GHz 帯では 1 ビーム・両偏波・2 SB となる新受信機システムの開発を進める。この新システムを用いれば約 2 年で観測が可能になると予想される。

本開発ではこの 115GHz 帯受信機システムに搭載する新 IF 系試作機的设计、製作及び評価を行った。この IF 系は 115GHz 帯受信機で受信された  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1-0$ ) の 3 輝線が含まれた 1stIF (4-12GHz) をフィルターで 9-12GHz ( $^{12}\text{CO}$ ) と 4-6GHz ( $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$ ) の 2 系統に分け、それぞれ 2GHz 以下にダウンコンバートしてデジタル分光計 XFFTS へと同時に導入する回路である。IF 系全体のリニアリティは 0-10dB の範囲で  $\pm 0.1\text{dB}$ 、アラン分散は 20 秒の性能を目標に製作している。また、現受信機システムでは隣の受信機 (SMART:ケルン大学所有) からの混信が見られているためこれを防げるよう周波数設計を行った。以上の目的のため本開発では Lo 周波数およびバンドパスフィルターの帯域の見直し、広帯域 (4-12GHz) のアンプの採用や入力反射損失の少ない低周波 (0-2GHz) 用のアンプの自作 (大阪府立大学阿部氏ら協力) 等を行った。作製した IF 系の回路は、各コンポーネントおよび系全体でベクトルネットワークアナライザーを用いて電気的特性を確認し、スペクトルアナライザーを用いたリニアリティ調査・アラン分散測定を行って評価している。本ポスターでは上記の内容の詳細と今後の計画について報告する。

## 観測 b3 NASCO 計画にむけた NANTEN2 制御ソフトウェアの更新

兵頭 悠希 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

我々は、NANTEN2 望遠鏡を用いた CO ( $J=1-0$ ) 輝線の超広域サーベイ計画である NASCO (NANTEN Super-CO Survey as Legacy) プロジェクトを推進している。NASCO では、全天の 70% の領域を角度分解能 2.6 分角の高分解能で観測する予定であり、これまで整備が遅れていた全天にわたる CO 輝線のデータセットが提供される。NASCO を 4 年間の運用で実現するためには、広域観測の効率化が極めて重要であり、マルチビーム受信機を用いて高速スキャン観測を行えば達成できる見通しを得ている。観測を実施するため、制御ソフトウェアに求められることは、全天を効率的に観測するために最適化された観測モードを実装すること、また長期にわたる観測期間とマルチビーム受信機による 2TB/day にのぼる膨大なデータを効率良く処理するため、観測オペレーションおよびデータ解析を簡素化することである。NANTEN2 移設当

初から使用されている制御ソフトウェアは独自に開発された言語を使用しており、汎用性が低く、さらには現在サポートが終了した Real-Time Linux 上で構築されており、さらなる維持、改修が困難であった。そこで我々は昨年度から計算機のリプレース、観測プログラムの最適化、制御ソフトウェアの python 化などの更新作業を進めている。すでに計算機の Linux 化が完了しており、制御ソフトウェアの python 化もほぼ完了した。2015 年 12 月に望遠鏡を構成するアンテナやミラーなど各装置の動作試験を実施し、従来と同等の性能に達していることを確認した。現在は観測プログラムの最適化の検討やデータ解析プロセスの設計、検討を進めており、2016 年 9 月のファーストライトを目指す。本公演では制御ソフトウェア更新計画とこれまでの進歩を報告する。

## 観測 b4 NANTEN2 新マルチビーム受信機の開発

堤 大陸 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

我々が運用しているチリ・アタカマ砂漠の 4m ミリ波/サブミリ波望遠鏡 NANTEN2 では一酸化炭素分子 CO(J=2-1,1-0) 輝線の観測を行い、そこで得られた広範囲の観測データを用いて様々な大質量星形成や超新星残骸等の星間現象の解明を進めてきた。今後  $fH_I$  の観測データとの比較を行うことによる水素ガスの精密定量を行うことで、星間物質の研究が劇的に進歩すると予想される。しかしその一方で、なんてん望遠鏡で行われた NGPS(NANTEN Galactic Plane Survey) のデータはナイキストに取れていない、CfA 望遠鏡での観測は分解能が低いなど、現在に至るまで高分解能で全天をカバーした CO の観測データは未だ作られていない。

その現状を受けて、NANTEN2 で現在進行している NASCO(NAnten2 Super-CO survey as Legacy) 計画では南半球から観測可能な、全天の約 70% をカバーする超広域 CO 観測を目標としている。この計画の主要な領域(全天の約 37%) をおよそ 2 年で実現するために旧来のシングルビームとは異なる、高分解能での広域サーベイの可能な新型のマルチビーム受信機の開発が必要となった。

これまでに NASCO 計画用の受信機は光学系設計が終了しており、光軸上の 1 ビームの 230GHz 両偏波 2SB 受信機、4 ビームの 115GHz 両偏波 SSB 受信機、および冷却ミラーを採用することで開口率約 70% とエッジレベル-15dB を達成する予定である。その光学設計をもとに、100GHz 用冷却ミラー及びそのホルダーをはじめとする各コンポーネントのプレモデルを 3 次元 CAD で設計し、ダンボール・3D プリンタで試作をしながら受信部の形状を決定し、熱計算および強度計算等の構造解析を行っている。またそれと並行して、実際に NANTEN2 望遠鏡に搭載可能なクライオスタット、300K シールドなどの設計を行っている。今回の発表では NASCO 用受信機設計の進捗について報告する。

## 観測 b5 次世代ガンマ線望遠鏡 CTA 小口径望遠鏡カメラの光検出効率の向上に向けた SiPM 用レンズアレイの検討

朝野 彰 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所 M1)

チェレンコフ望遠鏡アレイ (Cherenkov Telescope Array、CTA) は、宇宙における高エネルギー現象により放射されるガンマ線を観測する次世代ガンマ線望遠鏡である。大・中・小口径の異なる口径の大気チェレンコフ望遠鏡により、20 GeV-300 TeV の広いエネルギー帯域を確保す

る。また、北・南半球を含めて計 100 台設置することで、広い有効面積を確保し、従来よりも一桁高い検出感度の実現を目指す。CTA の高い検出感度で銀河系内天体を探索することで、現行望遠鏡に比較して約 10 倍の超新星残骸やパルサー風星雲が検出可能になると期待される。また、ガンマ線エネルギースペクトルを 100 TeV 超まで測定することで、宇宙線加速の謎に迫ることが期待される。

我々は 3 種類ある小口径望遠鏡設計の内、Gamma-ray Cherenkov Telescope (GCT) の焦点面カメラを開発している。GCT の光学系は副鏡を採用しているため、焦点面上での画像を縮小することでカメラの小型化と製作費用の低減を可能にした。GCT の焦点面カメラは半導体光電子増倍素子 (SiPM) を採用しており、超高エネルギー帯域 (100 MeV - 100 TeV) のガンマ線が地球大気との相互作用で放出するチェレンコフ光 (紫外光) に対する高い光検出効率とカメラの小型化を実現する。高い光検出効率は、数 TeV のエネルギー帯域における有効面積向上に寄与する。しかし、隣接する SiPM 間には隙間 (不感層) があり、12% のチェレンコフ光を損失する。そこで、紫外透過型のレンズアレイを SiPM に被せて入射チェレンコフ光を屈折させ、SiPM へと集光することで、損失率を下げる方法を検討している。高い集光効率に寄与する最適なレンズ形状を選定することで、既製品 SiPM との相対値にして最大約 15% の光検出効率向上が見込める。

本講演では、光線追跡ソフトを用いての光学シミュレーション及び、光学材料の測定、最適なレンズ形状の選定について述べる。

## 観測 b6 「あかり」中間赤外線全天マップの表面輝度の評価方法

高羽 幸 (名古屋大学 理学研究科 宇宙物理学研究室 赤外線グループ (UIR 研) M1)

宇宙空間には、さまざまな波長の電磁波が存在する。その中でも、中間・遠赤外線を用いると、星間ダストの放射を観測することができる。赤外線天文衛星「あかり」は、2006 年 5 月から 1 年 3 か月にわたり、宇宙からの赤外線放射を多波長で全天を掃天観測した。そのうち、9  $\mu\text{m}$  バンドは、炭素系のダストである多環芳香族炭化水素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon; PAH) からの放射をとらえることができ、18  $\mu\text{m}$  バンドは、高温のケイ素系ダストからの熱放射をとらえる。PAH の放射の検出を目的とした全天の掃天観測は、世界で初めてである。「あかり」中間赤外線全天観測は、空間分解能が 5.5' (9  $\mu\text{m}$ )、5.7' (18  $\mu\text{m}$ ) であり、1983 年に観測が行われた、Infrared Astronomical Satellite (IRAS) の全天観測と比べて 10 倍以上、向上した。この全天マップの公開は、銀河の進化、星形成の過程、惑星系の進化などの研究に貢献する。本研究では、9  $\mu\text{m}$  バンドと 18  $\mu\text{m}$  バンドにおける全天マップを作成し、マップでの表面輝度とその不定性の計算を目的とした。最初に、観測データに対して、装置由来のノイズの補正や、黄道光や月の迷光の除去など、さまざまな補正を全天に渡って行った。これらの補正を行ったのち、表面輝度は同じ領域の複数回観測 (スキャン) の平均値とし、そのエラーはスキャンの標準偏差として、これらのマップを作成した。また、一部の領域について、1 回のスキャンあたりの検出限界を求め、9  $\mu\text{m}$  で 40 mJy、18  $\mu\text{m}$  で 100 mJy という値が得られた。観測装置から期待される値である、9  $\mu\text{m}$  で 50 mJy、18  $\mu\text{m}$  で 120 mJy (Onaka et al. 2007) と比較し、ファクターの範囲で一致することを確認した。

1. Kondo, T., et al. 2016, AJ, 151, 71

2. Onaka T., et al. 2007, PASJ, 59, S411

## 観測 c1 外部からの電気パルスで変調駆動できる可搬型 X 線発生装置の開発

西田 和樹 (東京理科大学 玉川研究室 M2)

今後ますます、搭載される観測装置の機能が複雑になっていくであろう X 線天文衛星にとって、コンパクトかつ変調可能な X 線発生装置 (Modulated X-ray Source : MXS) は、検出器の較正機器として不可欠である。すでに様々なタイプの MXS が開発され、衛星プロジェクトに採用されているが、我々は全く新しい装置である、針葉樹型カーボンナノ構造体 (CCNS) を用いた MXS (CCNS-MXS) を開発している。CCNS-MXS は従来の MXS がと比較して、格段に低電圧での運用ができるので、さらなるコンパクト化が期待される。

CCNS はカーボンナノチューブなどの炭素構造体が針葉樹型を形成している。その先鋭な構造のため、10 kV/cm の電場中におくと電子電界放出によって電子を発生する。CCNS-MXS はこの CCNS に厚さ約 100  $\mu$  m のガス電子増幅フォイル (GEM) を押し付けることで製作される。GEM は絶縁体の片面に電極がついた構造で、約 100  $\mu$  m 直径の貫通穴が規則正しくあいている。GEM に 100 V の電圧を印加すると、貫通穴の中に位置する CCNS には 10 kV/cm の電場が加わるため電子が電界放出される。その電子を電場で加速させてターゲット金属に当てることで X 線を発生させる。このとき、外部から与える 100 V の電圧の ON/OFF に同期して、X 線も ON/OFF することができる。

我々は実際に製作した CCNS-MXS を製作して、100 V の電圧印加によって 600 ns の幅のパルスで X 線を発生させることに成功した。さらに CCNS にかける電場を 67 kV/cm まで上昇させると 1.2 mA の電流を引き出すことができた。これは実際に衛星に搭載されている MXS の  $10^2$  の X 線フラックスに相当する。本研究では、CCNS-MXS の特性と開発の進捗情報について報告する。

## 観測 c2 近赤外線検出器の概要と SWIMS の検出器性能評価

寺尾 恭範 (東京大学 天文学教育研究センター M2)

近赤外線による観測は、ダストに覆われた星形成銀河や赤方偏移の大きな宇宙初期の銀河の性質を調べる際の有力な手法である。近赤外線の検出には半導体検出器が広く用いられており、観測したい波長に応じて材質が異なる。これらの検出器は、天体からの光により励起された電子を集めることにより光の強度を測定する。本講演では、近赤外線検出の原理や信号の読み出し方法のほか、読み出しノイズや暗電流といったノイズが発生する原理とノイズ低減の手法についても紹介する。また、我々のグループでは東京大学アタカマ天文台 (TAO) 6.5m 望遠鏡の第 1 期近赤外線観測装置 SWIMS を開発しており、2017 年度初頭からすばる望遠鏡に搭載しての試験観測を予定している。SWIMS には近赤外線観測に広く用いられている検出器 HAWAII-2RG が 4 台搭載されており、これらを同時に駆動することで広視野を実現する。これまでの試験により HAWAII-2RG の同時駆動時にはノイズが増加することが判明したが、読み出し用のケーブルを改良し、読み出し回数を増やすことで SWIMS の要求性能を満たすのに十分なノイズ低減が可能であることを

実証した。この結果についても報告する。

1. Ian S. Mclean, [Electronic Imaging in Astronomy (second edition)], Praxis Publishing, Chichester, 2008

## 観測 c3 MEMS ガス検出器で切り拓く MeV ガンマ線天文学

竹村 泰斗 (京都大学 宇宙線研究室 D1)

MeV ガンマ線天文学は超新星爆発や核ガンマ線、最遠方ガンマ線バーストなど様々な天体現象の観測が期待されている一方で、1991 年に打ち上げられた CGRO 衛星に搭載された COMPTEL 以降 MeV ガンマ線に対する全天観測はまったく行われていない。この状況を打開するべく、われわれは高空間分解能ガス飛跡検出器 u-PIC を用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC:Electron-Tracking Compton Camera) の開発を行っている。ETCC では電子飛跡情報を得ることで、既存の MeV ガンマ望遠鏡では不可能であった各光子の方向を一意に再構成することが可能であり、MeV ガンマ望遠鏡として初めて Point Spread Function (PSF) を定義した。しかし、MeV ガンマ線天文学を切り開くには 5 度以下の PSF が必須であり、このためにはより高い精度の電子飛跡情報が要求される。電子飛跡情報を得るガス検出器 u-PIC は現在プリント基板技術で作製されており、その位置分解能は約 120  $\mu$  m (RMS) を実証している。しかし、MeV ガンマ線望遠鏡の要請を満たすには u-PIC の位置分解能 100  $\mu$  m 以下が必要となる。Micro Electro Mechanical System (MEMS) 技術はこの要求を満たしうる解のひとつである。この技術を用いて u-PIC を作製することにより、高位置分解能・高エネルギー分解能・高ガスゲインの u-PIC が期待できる。MEMS ガス検出器の基本研究として複数の素子を作製し、実測とシミュレーションによりその評価を行った。

## 観測 c4 CTA 大口径望遠鏡用分割鏡性能評価

稲田 知大 (東京大学宇宙線研究所 M2)

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、大・中・小と口径が異なる 3 種類の解像型チェレンコフ望遠鏡群を用いて、現行の望遠鏡の約 10 倍の感度で 20 GeV から 100 TeV 以上に渡る広いエネルギー範囲において超高エネルギーガンマ線の観測を目指す国際共同プロジェクトである。CTA-Japan グループが研究開発を行っている大口径望遠鏡は、CTA 計画全体で建設が予定されている南北のサイトそれぞれに 4 台建設される予定である。望遠鏡の主鏡には、1 台あたり六角形の対辺が 1.51 m の分割鏡を約 200 枚使用する。分割鏡性能は望遠鏡の感度、エネルギー分解能等に大きく影響を与える。そのため分割鏡の重要な性能である結像性能、曲率半径を評価する必要がある。評価基準として分割鏡には仕様要求が定められており、最も重要である結像性能は、焦点距離  $f$  (28 m から 29.2 m) において光量の 80 % が収まるスポット直径 (D80) が 16.6 mm 以下であることが求められる。結像性能、曲率半径の評価には 2f 法と呼ばれる方法を用いている。2f 法とは焦点距離の 2 倍の位置 (2f) に光源となる LED とスクリーンを置き、反射像をカメラで撮影し解析することでスポットサイズを求める方法であり、東京大学宇宙線研究所に実験装置を設置している。本講演では望遠鏡に搭載予定である分割鏡の性能評価測定を 2f 実験装置で測定した結果について

報告し、測定で得られた光学パラメータを用いて望遠鏡への分割鏡の配置方法の最適化を検討するために将来行う予定である simulation study に向けた展望を述べる。

#### 1. CTA-Japan Consortium, /Cherenkov Telescope Array 計画書 (LOI)

### 観測 c5 炭素繊維強化プラスチックを用いた次世代 X 線望遠鏡の開発

島 直究 (名古屋大学 Ux 研 M2)

X 線望遠鏡の多くは、放物面と双曲面に共焦点配置された反射鏡に 2 回反射させることにより結像集光する Wolter I 型光学系を採用している。特に日本の X 線望遠鏡は多重薄板型と呼ばれ、アルミ製の薄い反射鏡を同心円状に多数配置することで軽量かつ高い集光力を得られる一方、角度分解能が数分程度に制限されてしまうという欠点を併せ持つ。これは Wolter I 型光学系の二次曲面を円錐近似して用いていることや、薄い反射鏡の形状誤差・位置合わせの誤差が大きいために原因として挙げられる。次世代 X 線望遠鏡には、この高い集光力を保持したまま結像性能の向上が要求される。そこで我々はアルミの 7 倍の比強度と 1/8 の熱膨張率を持ち、かつ成形の自由度の高い炭素繊維強化プラスチック (以下、CFRP) を基板材料として、完全な Wolter I 型光学系を再現した二段一体型反射鏡の開発を行っている。CFRP 反射鏡の鏡面形成手法は、母型に反射膜を成膜し、それをエポキシ接着剤を用いて基板に転写させるレプリカ法を用いる。X 線反射鏡には入射 X 線の波長程度の表面粗さが要求されるため、ガラス製の母型を用いることで滑らかな鏡面を転写させる。従来はガラス製の円筒母型をレプリカ用母型として使用していたが、量産実現性向上のため新たに Wolter I 型の二次曲面に薄板ガラスを貼付けた母型を用いて 1/4 周 CFRP 基板 ( $\phi 200$ , mm、各段 150, mm) に鏡面形成を行っている。この 2 種類のレプリカ用母型で製作した CFRP 反射鏡を保持機構であるハウジングに組み込み、宇宙科学研究所の 27 m ビームラインにて性能評価を行った結果、新たな鏡面形成手法で製作した反射鏡が従来の反射鏡と同程度の結像性能を持つことを確認できた。

### 観測 c6 白田 64m アンテナでの連続波およびスペクトル線観測における性能の評価

藏原 昂平 (鹿児島大学 M1)

本講演では白田宇宙空間観測所 64m アンテナの性能評価の結果について報告する。64m アンテナは衛星管制用アンテナとして運用されている日本一の口径を持つ望遠鏡であり、野辺山 45m 望遠鏡では観測できない 10GHz 以下の L 帯 (1.4 – 1.7GHz), S 帯 (2.2GHz), C 帯 (4.9, 6.7GHz), X 帯 (8.4GHz) が観測可能な望遠鏡として利用可能である。64m アンテナを天文観測に用いるため最新のアンテナパターンやシステム雑音温度、受信機雑音温度、較正用ノイズソース等価温度を得る為に L, C, X 帯について再測定を行なった。アンテナパターンを測定するためには明るい点源を中心にラスターキャン観測を行った。システム雑音温度、受信機雑音温度、較正用ノイズソース等価温度を測定するためにはアンテナを sky を向けた時の受信機出力、アンテナを sky を向けノイズソースの信号を注入した時の受信機出力、 $R(300)$ ,  $R(77)$

などの IF レベルを測定した。その結果ビームサイズが  $12.60[\text{arcmin}]@1.42\text{GHz}$ ,  $9.78[\text{arcmin}]@1.66\text{GHz}$ ,  $4.23[\text{arcmin}]@4.9\text{GHz}$ ,  $3.57[\text{arcmin}]@8.4\text{GHz}$  となりまた各周波数でのサイドローブの位置・レベルが分かった。また  $T_{\text{sys}}$  が  $96[\text{K}]@1.42\text{GHz}$ ,  $85[\text{K}]@1.66\text{GHz}$ ,  $70[\text{K}]@4.9\text{GHz}$ ,  $80[\text{K}]@6.7\text{GHz}$ ,  $36[\text{K}]@8.4\text{GHz}$  であることが分かった。また較正用ノイズソース等価温度は  $39.1[\text{K}]@1.42\text{GHz}$ ,  $29.0[\text{K}]@1.66\text{GHz}$  であった。以上の性能評価により L 帯のノイズソースを用いた強度較正が可能になり、観測計画をたてる際に必要であるシステム雑音温度やビームサイズが分かった。

1. Hama et al. 1994PASJ...46..511H
2. Sekido et al. 1994vtpp.conf..306S
3. Doi et al. 2007PASJ...59..703D

### 観測 c7 X 線微細ピクセル検出器のための金属マルチコリメータ製作

児嶋 優一 (関西学院大学大学院理工学研究科物理学専攻 M1)

X 線 CCD は、高い空間分解能とエネルギー分解能を併せ持つ検出器として、X 線天文分野で活躍してきた。現在、次世代 X 線観測ミッションへの活用を念頭に、SOIPIX、DEPFET など、時間分解能の向上と、Si 有感層を厚くし、硬 X 線に対する検出効率を向上させた、様々な X 線撮像分光検出器が開発されている。

これらの検出器はいずれも、入射した X 線光子により生成された多数の電荷群 (一次電荷雲) が空乏層内をドリフトし電極に集められて、ピクセルごとに信号電荷として読み出される。そのため、収集された電荷は有限の拡がりを持ち、一イベントによる電荷が複数画素にまたがって検出される場合がある。電荷雲の大きさは X 線光子の吸収深さに依存すると考えられ、電荷雲形状を実測できれば、深さ方向における内部電場を直接検証でき、信号生成の素過程を物理的に理解、精密な応答関数の構築に役に立つ。

電荷雲形状を実測するためには、X 線入射位置を画素よりも高い精度で決定する必要がある。これまでに、数  $10 \mu\text{m}$  オーダーの同一画素多数有する CCD に対して直径 2-3  $\mu\text{m}$  の微細孔を多数開けたマルチコリメータを用いて、実効的に画素内をスキャンする実験法が考案され、実施された。しかし X 線吸収部分が薄く、7keV 以上の硬 X 線には適用できなかった。

我々は、30keV の硬 X 線まで適用可能な厚型金製マルチコリメータの試作を行った。80  $\mu\text{m}$  厚の金プレートに直径 3-5  $\mu\text{m}$  の微細孔を 60  $\mu\text{m}$  毎に周期的に配置したマルチコリメータである。X 線に対する微細孔の有効径を調べるため、10-30keV の X 線に対する計数率を測定した。80  $\mu\text{m}$  厚の金の透過率は  $10^{-7}$  以下なので、コリメータがある場合とない場合とで測定される計数率の比は、微細孔の開口率で決まる。本講演では、実験の結果から得られたコリメータの性能と、これを用いた今後の実験計画について発表する。

## 観測 c8 1m 赤外線望遠鏡に搭載する近赤外線 3 バンド同時撮像カメラの熱設計と冷却到達温度の検証

内野 亮太 (鹿児島大学 M1)

私は、鹿児島大学 1m 赤外線望遠鏡に搭載する近赤外線カメラの開発を行っている。現在のカメラはフィルターホイールを回転させることで J (1.2  $\mu$  m)、H (1.6  $\mu$  m)、K (2.2  $\mu$  m) の 3 バンドを別々に撮像している。新赤外線カメラは HAWAII アレイを 3 つ搭載し、入射窓から入ってきた光が offner 光学系を通り、ダイクロックミラーを通ることで 3 つの光束に分かれ、それにより J、H、K、の 3 バンド同時撮像を行うことができる。これにより、現在のカメラよりも観測時間が 1/3 になり、フィルターが固定されるためトラブルも少なくなると考えられる。近赤外線カメラは、バックグラウンド光子、検出器の暗電流を減らすために装置内部を冷却する必要がある、そのためには装置内部を真空にする必要がある。私は、この冷却に関して研究をしている。目標到達温度は、コールドボックス (光学部品が入る容器) が 100K、検出器部分が 70K である。この目標を達成するために私は、装置外部からの熱流入量の見積もりをおこなった。装置外部からの熱流入の要因として対流・熱輻射・熱伝導の 3 つがある。対流は装置内を真空にするため 0 とみなす。よって熱輻射と熱伝導の 2 つについて計算し、熱流入量を見積もった。その結果を踏まえ、目標温度を達成するために必要な、コールドボックスと冷凍機を繋ぎ熱を伝達する熱パスの設計をした。その後、冷却実験をおこなった。温度の測定には白金抵抗温度計を使用した。冷却実験の結果は、コールドボックスが 71.2K となり、目標温度を達成している。今後は、真空容器に入射窓を取り付けての冷却実験や光学支持部品の塗装、光学調整、検出器のインストールなどを行い、近赤外線カメラの完成を目指す。

## 観測 c9 汎用 4 回反射型 X 線望遠鏡の開発

萬代 絢子 (名古屋大学 Ux 研 M2)

X 線は透過力が高いため、全反射を利用して集光させる。X 線望遠鏡では、2 回反射の Wolter I 型光学系が用いられる。また、日本の X 線望遠鏡では多重薄板型と呼ばれる、薄い反射鏡を同心円状に多数配置したものが用いられる。例として、Suzaku/XRT や Hitomi/HXT, SXT などが挙げられる。しかし 2 回反射の光学系では数 m の焦点距離を仮定するとその有効面積は数 100  $\text{cm}^2$  にとどまっている。一方、数 m の焦点距離の望遠鏡に 4 回反射光学系を導入するとさらなる大口径化が可能となり、単一望遠鏡でこれまでの数倍の有効面積が期待できる。

我々は 4 回反射 X 線光学系の応用として、従来の X 線望遠鏡の数 m の焦点距離を保ちつつ、鉄の K 輝線を含む  $\sim 10$  keV までのエネルギーにおいて大有効面積 (例えば鉄輝線のエネルギーで 2900  $\text{cm}^2$ ) が期待される汎用 4 回反射型 X 線望遠鏡を提案してきた。しかし一方で、4 回反射型の X 線望遠鏡は従来の 2 回反射型の X 線望遠鏡に比べて反射回数が多いために、反射鏡形状誤差が望遠鏡の性能に与える影響がより顕著になるという実製作上の問題をはらんでいる。本研究ではその影響を見積もるために、これまでの反射鏡製作で得られている典型的な形状誤差を考慮して、光線追跡法により焦点距離 6 m、口径 1.1 m の 4 回反射型 X 線望遠鏡の性能を調べた。その結果、1-10 keV のエネルギーに対する有効面積の劣化は  $\sim 20\%$  であった。本望遠鏡は形状誤差を考

慮しても Hitomi 搭載軟 X 線望遠鏡 SXT よりも  $\sim 4$  倍の有効面積を得られ、実機においても十分な性能が見込めることがわかった。

## 観測 c10 次世代型 MeV ガンマ線望遠鏡における読み出し回路開発とデッドタイム削減

吉川 慶 (京都大学 宇宙線研究室 M2)

超新星爆発では、通常の恒星では作られない (Fe) よりも重い元素が生成されると考えられている。ここでできた放射性元素は、数百 keV から数 MeV のガンマ線を放つので、観測することで、どこでどのくらいどんなプロセスで元素ができていたのか解明することができる。

しかし、このエネルギー帯のガンマ線は特有の膨大なバックグラウンドがあるため測定が難しい。(2014 年に約 (40) 年ぶりに (3.5 Mpc) という地球近傍で (Ia) 型超新星爆発が起き、INTEGRAL 衛星によって世界で初めて核ガンマ線 ( $^{56}\text{Co}$ ) が検出されたのだが、検出有意度は  $4\sigma$  しかなかった [1]。この原因として、衛星筐体が宇宙線と相互作用することで、衛星自体が放射化し、MeV 領域のガンマ線のバックグラウンドとなることが挙げられる。今、強力なバックグラウンド除去能力をもつ、MeV ガンマ線望遠鏡が必要とされている。

そこで、次世代の MeV ガンマ線望遠鏡として電子飛跡検出型コンプトンカメラ ETCC の開発を行っている [2]。MeV 領域ではコンプトン散乱が優位に起こり、入射してきたガンマ線が散乱ガンマ線と反跳電子に分かれる。シンチレーション検出器により散乱ガンマ線のエネルギーと吸収位置を検出し、ガス飛跡検出器により反跳電子のエネルギーと三次元飛跡を検出する。コンプトン散乱における全物理量を測定することで、バックグラウンドと区別でき、核分光能力が従来より 2 桁以上改善される。

現行の原理検証用 ETCC では、阻止能の高いシンチレーション検出器のみでトリガーをかけていたため、デッドタイムが長い。核分光のための ETCC にアップグレードする際、シンチレーション検出器を増強するので、そのデッドタイムがさらに伸び、数十% となってしまう。これを改善するため、新トリガーとしてシンチレーション検出器とガス飛跡検出器が同時に検出した時のみデータを収集するシステムを開発した。また、データ収集レートが数 kHz でも測定できるように新たに読み出し回路を作成し、試験をした。それについて報告をする。

1. E. Churazov et al., Nature 512 406 (2014)
2. T. Tanimori, et al., ApJ 810, 28 (2015).

## 観測 c11 1m 光・赤外線望遠鏡で明るい天体の観測時に用いる 1/100 部分減光フィルターの減光率の検証

山口 凌平 (鹿児島大学 M1)

赤外線観測できるほとんどの星は K バンドで見かけの投球が 6 等より明るい。このような星を観測すると検出器がサチュレーションを起こしてしまう。多くの望遠鏡では、焦点をわざとぼかして観測するデフォーカス観測という方法でこの問題を解決してきた。しかし、デフォーカス観測では目的星の星が明るい参照星が測光できなくなり、等級補正の方法が標準星測光になる。加えて、十分な制度を得るには非常に天気の良い日でなければならず、観測可能日も限られてしま

う。そこで、部分減光フィルターを導入することでこのような問題を解決することができ、明るい星の観測可能日の増大と精度の向上がなされた。このフィルターは視野の一部のみを減光することができ、その減光領域で目的星を観測することでサチュレーションを回避し、そのほかの領域は減光されずに観測することができる。そして、減光率を補正することで、目的星の周囲の星と視野内相対測光ができ、見かけの等級を求めることができる。本研究では 1/100 部分減光フィルターの減光率の測定を行った。標準星は SAO 標準星 (Cartar.1990) と CIT 標準星 (Elias.1992, UKIRT bright standard star list) を用いた。減光率の決定制度を上げるため、各バンドで平均をとって減光率を求めた。測定の結果、減光率は K バンドで  $5.03 \pm 0.04$  等、H バンドで  $5.02 \pm 0.03$  等、J バンドで  $4.99 \pm 0.03$  等であった。また、部分減光フィルターを用いた同じ標準星の時間変動のばらつきは  $0.02 \pm 0.01$  等であった。1/100 部分減光フィルターを用いて PNV\_J18365700-2855420 を観測したところ有意義な変動を制度よく観測することができた。

1. Cartar et al. (1990)
2. Elias et al. (1982)

## 観測 c12 ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡に用いる反射鏡の反射率測定

中庭 望 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

2016 年 2 月に打ち上げられた X 線天文衛星「ASTRO-H」には、軟 X 線領域 (0.3~10 keV) の集光を担う軟 X 線望遠鏡 (SXT) が 2 台搭載されている。SXT には焦点を共有する初段の回転放物面鏡と二段目の回転双曲面鏡で二回反射させて X 線を集光する斜入射光学系 (Wolter-I 型光学系) が採用されている。反射鏡の基板はアルミニウムであり、X 線反射率を上げるために表面には金が成膜されている。さらに有効面積を稼ぐために、反射鏡基板の厚さを  $300 \mu\text{m}$  以下に抑え、反射鏡を同心円状に 203 枚積層している。

観測したデータから対象天体の物理量を引き出すには観測機器の性能を再現する応答関数が必要になる。この応答関数を構築するパラメータの一つに、X 線望遠鏡の集光力を表す有効面積が挙げられる。有効面積は、個々の反射鏡の開口面積にその反射鏡の反射率を掛けたものの総和である。そのため、反射鏡の入射角度ごとの反射率 (角度反射率) を知ることが有効面積の精度向上につながる。反射率に大きく影響する物理量として、反射面の表面粗さが挙げられる。表面粗さが大きいとき、入射角度が大きくなるほど正反射する X 線が減るので、反射率は落ちてしまう。反射鏡の表面粗さは、角度反射率曲線に Model fit を行うことで算出できる。

そこで SXT の flight model と同じ工程で作られた反射鏡サンプルを 6 枚 (初段と二段目から各 3 枚) 選び、宇宙科学研究所 X 線ビームラインにおいて角度反射率を測定した。測定では、Ti-K $\alpha$  (4.51 keV), Cu-K $\alpha$  (8.04 keV) の特性 X 線のエネルギーを用いることで、表面粗さのエネルギー依存性の有無も確認している。

測定した角度反射率から算出したそれぞれの反射鏡の表面粗さに、特性 X 線のエネルギーによる違いは見られなかった。しかし、初段と二段目で反射鏡の粗さに違いが見られ、特に二段目の反射鏡では、3 枚のサンプルで全て異なる粗さが算出された。これに対して現在使われている SXT の応答関数では、表面粗さはすべての反射鏡で一律に同じ値となっている。反射鏡の測定サンプル数を更に増やし、個々の反射鏡に適切な

表面粗さを設定することで応答関数の精度を高めて行く必要があることがわかった。

## 観測 c13 湾曲結晶鏡の X 線分光実験・評価

Suzuki Ryota (中央大学 M2)

近年、X 線天文学において、偏光の測定が可能な観測機器の開発が行われてきている。X 線天文学に偏光の情報が加わると、位置、エネルギー、時間に加えて 4 つの情報を得ることが出来るようになる。我々の研究室では、湾曲した結晶と CCD を用いて、X 線のエネルギーと偏光情報を同時に得られる観測機器の開発を行っている。本研究では、相模原の宇宙科学研究所において、我々の研究室で作成した湾曲した結晶に、標準 X 線発生装置から出力した X 線を当てる実験を行い、作成した結晶鏡の X 線のエネルギースペクトル検出器としての性能を評価した。X 線発生装置のターゲットに Cu を用いて、Cu の K 線に対して分光が行えるか、分解能はどれほどかを調査した結果、現段階で 66eV という CCD 単独以上のエネルギー分解能を持つことが明らかになった。実験の方法と、その解析の方法に関して説明をする。

1. Cartar et al. (1990)
2. Elias et al. (1982)

## 観測 c14 4 回反射型 X 線望遠鏡の新しい鏡面支持機構の開発

関 大策 (名古屋大学 Ux 研 M1)

ダークパリオ探査衛星 DIOS 用の望遠鏡として、600 mm の大口徑、700 mm の焦点距離を有する 4 回反射型 X 線望遠鏡 FXT (Fou-stage X-ray Telescope) の開発が行われている。FXT は 4 回反射により、広視野で大有効面積を有する一方、反射鏡の形状誤差や位置決め誤差が結像性能に影響する。これまでに、4 段一体で反射鏡を支持するアライメントプレートを使用することによってミラーの位置決め誤差を小さくし、又、円周方向の形状誤差を改善するためアライメントプレートの動径方向の位置を最適化するための微調機構を導入した。しかし、現状の結像性能は 7.9 分角 (HDP) であり、DIOS/FXT の要求結像性能の 5.0 分角には達していない。この要因として単体ミラーの形状精度不足やハウジング内でのミラーの変形が考えられているが、実際にハウジング内でミラーがどのように変形しているか検証はまだ行われていない。また、微調機構も定量的な微調は行われていないため、完全にはその機能が活かされてはならず最適化は不十分である。これらの解決の一助として 2 枚 1 組のアライメントプレートが製作された。反射鏡挿入後に片方のプレートを動径方向にずらすことで溝の遊びを実効的にゼロにするという方式である。これにより、ミラーの過剰変形を避けつつ、ミラー支持の最適化が図れると期待される。本研究では、この 2 枚 1 組のアライメントプレートを用いてプレート内のミラーの遊びの間隔とミラー変形量の関連を、可視平行光の反射像を用いて精密に評価し、どうすれば変形量を抑えられるかを探った。講演ではこの測定の結果を中心に報告する。