

# 観測機器分科会

天文学を、開発する。

日時	7月28日 20:15 - 21:15 7月29日 9:00 - 10:00, 10:15 - 11:15(招待講演：栗田 光樹夫 氏), 13:30 - 17:00 7月30日 13:30 - 14:30, 16:00 - 18:15, 18:30 - 19:30(招待講演：和田 武彦 氏)
招待講師	栗田 光樹夫 氏 (京都大学)「京大 3.8m 望遠鏡計画とものづくり」 和田 武彦 氏 (宇宙科学研究所)「赤外線画像センサの基礎と開発の実際」
座長	長友竣 (京大 M2)、服部有祐 (名古屋大 M2)、西嶋颯哉 (東大 M2)
概要	<p>今日の天文学は電波、赤外線、可視光、X線、<math>\gamma</math>線、重力波、ニュートリノといった様々な観測手法で研究が進められています。これらの研究では常に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。</p> <p>本分科会では、開発分野に携わる様々な立場の研究者が一同に会し、議論を行います。異なる分野で開発をしている研究者が交流し、互いに刺激しあうことで、視野を広げてさらなる開発につながる場になることを期待しています。観測系、さらには理論系の研究者の参加ももちろん歓迎です。開発の立場からは、開発分野で認識されていなかったニーズの発見につながり、また観測・理論の立場からは、観測手段の幅が広がることで、新たなサイエンスの開拓につながることを期待できます。</p> <p>天文観測で良いサイエンスを行うためには、観測機器を「Enter キーを押したらデータが出てくる」ブラックボックスとして利用するのではなく、その原理と構造、仕組みを理解することが欠かせません。観測機器開発やそれを用いた観測、ひいては観測機器の根底にある理論についての相互理解のために忌憚なき活発な議論ができ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>

---

栗田 光樹夫 氏 (京都大学)

7月29日 10:15 - 11:15 B(大コンベンションホール)

## 「京大 3.8m 望遠鏡計画とものづくり」

2015年完成予定の光赤外線望遠鏡計画とその望遠鏡計画を通して開発した技術を紹介する。この望遠鏡は日本初となる分割鏡方式の光赤外線望遠鏡で複数の技術開発を要した。主なものは、1) CGH 干渉計を用いた機上鏡面計測、2) 機械式計測とデータステッチング技術による機上鏡面計測、3) 鏡の高速研削加工と修正研磨、4) 遺伝的アルゴリズムによる軽くて固い望遠鏡構造の最適設計である。その他にも18枚の分割鏡の制御や鏡同士の段差を計測する精密センサなど多くの技術開発を行っている。講演者のものづくり経験のエピソードを交えつつ、これら望遠鏡に関連する技術を紹介する。

---

和田 武彦 氏 (宇宙科学研究所)

7月30日 18:30 - 19:30 B(大コンベンションホール)

## 「赤外線画像センサの基礎と開発の実際」

赤外線画像センサーの概論を述べるとともに、開発の実例として、BIB型ゲルマニウム遠赤外線検知器とFD-SOI CMOS読み出し集積回路(ROIC; readout integrated circuit)を組み合わせた次世代遠赤外線画像センサーを紹介する。

## 観測 a1 NANTEN2 マルチビーム受信機の光学系設計

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

我々は南米チリ・アタカマ高地にて設置・運用しているミリ波・サブミリ波望遠鏡 NANTEN2 を用いて超高域分子雲サーベイ NASCO(NAnten2 Super CO survey) を計画している。この計画では超広域 (全天の約 70 % の領域)、高空間分解能 ( $2.6'$ ) の詳細な分子雲地図を作成し、星間現象の解明に貢献することが期待される。

この計画を数年で終わらせるために、現在 NASCO 用の新しいマルチビーム受信機を開発している。この受信機では 4 ビームの内、3 ビームは 100GHz 帯、1 ビームは 200GHz 帯の受信機を搭載し、それぞれのビームに対し両偏波同時受信を可能にすることで、 $^{12}\text{CO}$ 、 $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$  の多遷移輝線 ( $J=1-0$ 、 $J=2-1$ ) の同時観測を行う。この結果、分子雲の温度・密度を導出することができ分子雲の物理的状態の解明に期待できると考える。

本研究では、新受信機の光学系設計を行った。この光学系の特徴は、平面鏡を四角錐の様に張り合わせたピラミッド鏡に 4 組の楕円鏡・ホーンを組み合わせた構成である。設計は準光学を用いた光学系設計、物理光学シミュレーション (GRASP) による光学系設計の検証、設計へのフィードバックの順に実施した。

結果、開口能率が平均 54.3 % と低くなった。この原因は既存のサブレフを使用すること、SMART 受信機との切替の必要性、受信機室内の空間的制約などを考慮して設計した結果、一部の鏡面で設計値であるエッジレベル 30dB が確保されておらず、ビームが蹴られていることにあると考えられる。

今後、特にピラミッド鏡の設計を見直すことで、開口能率 70 % 程度の光学系の実現を目指す。

光学系設計と並行し、本研究室ではデューワー内コンポーネントの設計開発やマルチビーム受信機での観測方法の検討などの開発も進めている。本講演では光学系設計を中心に、NASCO の設計開発の現状について報告する。

1. 黒田豊：修士論文「NANTEN2 望遠鏡マルチビーム受信機の光学系設計」、名古屋大学 (2012)

## 観測 a2 表面活性化常温ウエハ接合技術を用いた遠赤外線 BIB 型 Ge 検出器の開発

花岡 美咲 (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)

赤外線天文衛星「あかり」に搭載された Far-Infrared Surveyor (FIS) の LW channel に代表される圧縮型 Ge:Ga 遠赤外線検出器は、Ge に少量の Ga をドーピングした Ge:Ga を加圧することで検出限界波長を伸ばしている。そのため、大型の加圧機構を必要とし、大規模アレイ化 (多素子化) が困難であることや、素子ごとに感度のばらつきが生じることなどの問題を抱えている。これらの問題を解決し、 $200\ \mu\text{m}$  以上の検出限界波長を持つ大規模アレイ検出器を実現させるために、我々は Blocked Impurity Band (BIB) 型 Ge 検出器の開発を行っている。BIB 型 Ge 検出器は、Ga を高濃度ドーピングさせることで生じる不純物バンドにより、不純物深さが小さくなることを利用して検出限界波長を伸ばしている。また、バンドの形成に伴い発生する暗電流をブロックするために、高濃度 Ge:Ga ( $p^+$  層) に高純度 Ge ( $i$  層) を接合させた構造を持つ。この構造

により、加圧機構を必要としない大規模アレイ検出器が実現可能である。

これまで我々は、三菱重工株式会社を持つ表面活性化常温ウエハ接合技術を用いて、 $p^+$  層と  $i$  層の急峻な濃度勾配を持つ接合面を実現させた BIB 型素子と同等の構造を持つ  $p^+-i$  素子を試作した。それらに対し、長波長側への感度の伸長を評価するため、フーリエ分光器を用いた波長感度測定を行った。並行して  $p^+$  層と  $i$  層それぞれの物理特性を評価するため、van der Pauw 法を用いた Hall 効果測定を行った。波長感度測定の結果より、Ga 濃度が「あかり」に使用された Ge:Ga よりも 2 桁高い  $1 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$  の  $p^+$  層を用いた  $p^+-i$  素子は  $160\ \mu\text{m}$  の検出限界波長を持ち、非圧縮 Ge:Ga 検出器よりも長い波長まで感度を有することが判明した。また、Hall 効果測定から得られた各 Ga 濃度での不純物深さから、 $200\ \mu\text{m}$  以上に感度をもたせるためには、 $8 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$  以上の Ga 濃度が必要となることが明らかとなった。今後は、Ga を高ドーピングした  $p^+$  層を用いて  $p^+-i$  アレイ素子を作成し、その評価を進めていく。

1. Kaneda, H., et al. Japanese Journal of Applied Physics, 50, 066503 (2011)
2. Suzuki, T., et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 124, 823 (2012)
3. Watanabe, K., et al. Japanese Journal of Applied Physics, 50, 015701 (2011)

## 観測 a3 大型望遠鏡光学試験のための新しい波面縫い合わせ法の開発

山中 阿砂 (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)

望遠鏡の光学試験方法として、一般的にオートコリメーション法が用いられる。これは、望遠鏡焦点位置に干渉計を設置し、その光軸上に望遠鏡と同じサイズの高精度平面鏡を置くことで光を折り返し、望遠鏡の透過波面誤差を一度に測定する方法である。この方法では、大型の望遠鏡 (口径  $\sim 3\ \text{m}$ ) になるほど大きな平面鏡が必要になるが、その大きさに匹敵するサイズで精度の良い平面鏡の製作は困難である。そこで我々は大型望遠鏡の透過波面を測定する手法として、波面縫い合わせ法を開発した。これは、望遠鏡開口面の一部分だけを測定できるような小さな平面鏡を用いて、開口全体を埋め尽くすように複数領域の透過波面誤差を取得し、それらを開口面全体の測定結果につなぎ合わせる方法である。波面縫い合わせ法が実際の光学試験に適用できるか検証するため、口径 80 cm の望遠鏡と 30 cm 平面鏡を用いて常温・常圧下で波面縫い合わせ測定を行った。望遠鏡光軸を中心に平面鏡を  $22.5$  度刻みで回転させ、合計 16 個のサブアパーチャー結果 (望遠鏡の一部分の透過波面誤差情報) を得た。これらを波面縫い合わせ法を用いて繋ぎ合わせ、望遠鏡開口面全体の透過波面誤差を取得した。一方、同望遠鏡と 90 cm 平面鏡を用い、オートコリメーション法での測定を行ったところ、結果は波面縫い合わせ測定の結果と一致したため、波面縫い合わせ法の妥当性を検証することができた。また、赤外線宇宙望遠鏡の試験では極低温・真空中で測定を行う必要があるため、冷却試験の前段階として常温・真空中 ( $1\ \text{Pa}$ ) で波面縫い合わせ測定を行った。さらに、極低温下の試験では熱収縮や重力によって小型平面鏡がゆがみ、測定結果に悪影響を及ぼすため、その影響を考慮しなければならない。本発表では、常温・真空中で得られた測定結果と、小型平面鏡のゆがみによる測定結果への悪影響を取り除く新たな手法を発表する。

#### 観測 a4 「あかり」中間赤外線全天サーベイデータからの暗い天体の検出方法の確立

中道 恵一郎 (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)

我々は「あかり」中間赤外線全天サーベイデータ (波長  $9\ \mu\text{m}$  帯および  $18\ \mu\text{m}$  帯) から暗い天体を検出し、カタログの作成を行っている。「あかり」は太陽同期軌道で 10 ヶ月にわたり全天をスキャン観測した。スキャン領域は次の周回で半分ほど重なり、半年ごとに同じ領域を観測するので、同じ天体を平均 6 回観測している。公開済みの「あかり」中間赤外線点源カタログ (PSC) では、各スキャン画像から天体を抜き出し、同じ領域を観測した他のスキャン画像を用いて検出した天体の信頼性を確認していた。本研究では、複数のスキャン画像を重ねあわせて深い画像を作成 (スタッキング) し、この画像から PSC で検出されている天体より暗い天体を検出する。しかし、この方法では検出天体の信頼性を評価する方法が問題となる。本研究では、初めに星形成領域 Cepheus B 周囲の  $6(\text{deg}) \times 6(\text{deg})$  の領域を用いて天体検出のパラメータの最適化を行った。また、スキャン画像を重ねあわせる前に 2MASS の PSC をリファレンスとして、個々のスキャン画像の座標較正を行うことでスタッキングの精度を向上させた。最後に、全スキャン画像を重ねあわせて作成した画像から検出した天体の信頼性を、フェイズ I, IIa, IIb の三つの季節ごとのデータを用いて確かめた。その結果、「あかり」中間赤外線 PSC に対して検出限界が 2 倍に向上し、同じ領域で PSC の 1.5 倍の天体数を検出できた。また、検出した天体の 95% 以上を WISE カタログでマッチングできた。我々はこの方法を全天データに対し適用していくつもりである。

#### 観測 a5 SPICA 中間赤外線検出器の地上実験のための低温光学系の開発

西山 美徳 (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)

次世代赤外線天文衛星 SPICA に使用する中間赤外線検出器 (Si:As および Si:Sb) の波長感度依存性を測定する必要がある。しかし、目的波長 ( $20\text{--}37\ \mu\text{m}$ ) は室温のピーク波長より長いので、常温での測定が難しい。測定系全体を極低温まで冷却できれば、低背景環境で高精度な測定が可能となる。そこで、この測定に用いる低温光学系をアルミ切削鏡で製作し、性能を評価した。

低温光学系は、ランプとピンホールを用いた赤外光源からの光を軸外し放物面鏡でコリメートし、光学フィルターを通過し、検出器上で像を結ぶ設計である。異なる波長特性をもつ光学フィルターを入れかえて使用することにより、さまざまな波長における検出器の感度を測定することができる。鏡には検出器の筐体と同素材である、アルミ製の 2 枚の軸外し放物面鏡と 1 枚の平面鏡を使用する。これにより、色収差をなくし、冷却による収縮効果を最小限に抑え、アラインメントの崩れを防ぐことができる。製作したアルミ切削鏡の表面精度を、干渉計と非接触三次元測定器を利用して測定した。また、ナイフエッジ法を用いて光学系の結像性能を常温で評価し、シミュレーションで冷却時の光学性能を検証した。

各鏡の測定結果から導出した光学系の全波面誤差は  $1.63\ \mu\text{m}$  (RMS) であり、目的波長において十分な精度であることを確認した。また、常温において検出器実験において十分な結像性能を得ることができ、シミュレーション結果から、冷却時の像サイズの変化は約 3% 以下であること

を確認した。今後は、極低温における光学系の性能を評価し、この光学系を用いて、Si:As 検出器の波長感度依存性の測定をおこなう。

#### 観測 a6 HXD/GSO のバックグラウンドの新しい評価

鈴木 大朗 (立教大学 M2)

Hard X-ray Detector (HXD) は、すざく衛星に搭載されている硬 X 線検出器である。HXD は、16 本の井戸型フォススイッチカウンター (Well Unit) と、その周りを囲む 20 本のアンチカウンター (Anti Unit) で構成されている。Well Unit は、BGO 結晶による井戸型の構造の底に、入射側から PIN 型 Si 半導体検出器 (PIN)、GSO 結晶シンチレータ (GSO)、さらにその後ろに BGO 結晶を置いた構造である。PIN の観測するエネルギー帯域は  $10\text{--}70\text{keV}$  である。また、GSO と BGO がフォススイッチとして働き、GSO により  $40\text{--}600\text{keV}$  を観測する。HXD は徹底した Back Ground (BG) の低減化が行われている。さらに、落とすきれない BG はモデル化を行い差し引いている。現在、GSO の BG モデルは、SAA 通過後の時間、軌道上の宇宙線強度が主なパラメータとしてモデル化されている。我々は、2013 年秋期年会で、16 本の Well Unit のヒットパターンを利用する事で、より簡便な BG の推定方法を提案した。そこでは、BG の再現精度はおおよそ 6% であり、まだ十分ではなかった。今回、これまでの HXD チームにより研究されてきた BG の性質を吟味し、SAA 通過後の時間とエネルギー帯による BG の変化とヒットパターンの関係や、推定される宇宙線強度とヒットパターンとの関係を調査する。そして、ヒットパターンによる BG の再現精度の向上を目指した結果を報告する。

#### 観測 a7 MIMIZUKU Field Stacker で可能となるサイエンス

内山 允史 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 附属天文学教育研究センター M1)

TAO Project (The university of Tokyo Atacama Observatory Project) とは、標高 5640m の南米チリ共和国北部アタカマ砂漠チャナントル山頂に 6.5m 赤外望遠鏡を建設する計画である。これは世界最高高度の望遠鏡であり、TAO site は大気の影響が少なく乾燥していて、赤外線波長の透過率が高い。TAO にはこの優れた大気透過率を活かす 2 つの装置が搭載され、そのうちの 1 つが中間赤外分光撮像装置 MIMIZUKU (Mid-Infrared Multi-field Imager for gaZing at the UnKnown Universe) である。

MIMIZUKU は、波長  $2\text{--}38\ \mu\text{m}$  の広範囲を 1 台でカバーし、大口径 6.5m の望遠鏡によって  $30\ \mu\text{m}$  帯で 1 秒角と言う世界最高の解像度を実現する。そして世界初の試みである、中間赤外域での視野内相対測光を可能とする「Field Stacker」を搭載する。

Field Stacker は、望遠鏡内の 2 つの視野を可動式のピックアップミラーで選択し、それを 1 つの検出器上に落とし込むことにより、離れた 2 つ (以上) の天体を同時に測光することができる機構である。中間赤外域の観測では可視や近赤外域でのそれとは違い、視野内に見える星がととも少なくなり、相対測光することが困難であった。そのためこれまでの観測では対象と参照天体を往復して観測を行っていたが、その精度は良くても 5%、悪ければ 10% ほどの測光誤差を含んでいた。しかし MIMIZUKU では Field Stacker によって観測対象と参照天体を同時観測することができ、相対測光の実現によって誤差 1% 以内での観測を目指す。中間赤外域の時間変動の高精度モニタ観測はこれまで例がなく、TAO + MIMIZUKU with Field Stacker の実現によってこれまでに知

られていた変光天体の詳細な解明と新たな変光現象の発見が進むことが期待される。

今回の発表では、Field Stacker 開発の進捗状況と、それによって可能となるサイエンスについて紹介する。

1. A. Juhász et al. 2008, ApJ, 744, 118

## 観測 a8 次世代を見据えたイメージライサ型近赤外面分光ユニットの開発

北川 祐太朗 (東京大学天文学教育研究センター D1)

本講演では可視赤外天文学で近年進展のめざましい面分光 (Integral Field Spectroscopy) について、観測原理の説明から発表者の研究を交えた最先端の装置の状況までを紹介する。面分光とは、一言でいえば”視野内の空間情報を保持したまま、その波長情報も同時に取得できる”観測手法である。観測で得られる最終データは 3 次元 ( $X, Y, \lambda$ ) のデータキューブとなり、各空間領域ごとのスペクトルを詳細に調べることができる。

講演の前半では、面分光の原理とそれを実現するために用いられる面分光ユニット (Integral Field Unit: IFU) の仕組みについて説明する。現在稼働している IFU の基本的な概念は、8-10m 級の大型望遠鏡の登場にともなう 1990 年代後半から急速に発展していったものである。そこで用いられている光学系は 3 つの方式へと大別することができ、波長や目標とするサイエンスに応じて適切な方式が採用される。こうした IFU を用いることで銀河内部の力学状態や物理量 (e.g. 星形成率、電離状態 etc) の空間構造を調べることが可能になり、そこから更に銀河形成進化モデルへと制限を加えることができる。特に近年は近赤外域での観測の重要性 (e.g. 可視観測に比べてダスト減光に強く星形成の現場を深く見通せる、 $z > 1$  の遠方では静止系可視域の重要な輝線がこの波長帯に入ってくる) より、それを実現する近赤外 IFU 開発への需要が高まっているといえる。

そこで講演の後半では、発表者が現在開発を進めているイメージライサ型近赤外面分光ユニット (SWIMS-IFU) を紹介する。これは東京大学天文学教育研究センターが現在建設を進めている TAO6.5m 望遠鏡の第 1 期装置 SWIMS に搭載可能なコンパクト IFU であり、SWIMS 本来の撮像・多天体分光モードに加えて観測中にリモートで面分光モードへと移行することが可能になる。他の近赤外面分光装置と比べて広い視野 ( $14'' \times 10.4''$ ) をもち、 $0.9 - 2.5 \mu\text{m}$  の広波長帯の面分光データを一度に取得できるという特徴を有している。イメージライサ型 IFU は TMT でも採用され、今後重要な要素技術となるため、その設計開発の方法についても触れる予定である。

1. J. Allington-Smith, and R. Content, PASP 110, 1216 (1998)
2. Y. Kitagawa et al., in prep SPIE (2014)

## 観測 a9 近赤外多天体分光カメラ SWIMS 検出器システムの開発

藤堂 颯哉 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M2)

我々は、近赤外多天体分光カメラ SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) を東京大学アタカマ天文台

(TAO) 計画で建設中の 6.5m 光赤外線望遠鏡の第 1 期観測装置として開発中である。2015 年度にはすばる望遠鏡の持ち込み観測装置として初期科学観測を予定している。SWIMS は、(i)  $\sim \phi 9'$  の広視野を (ii)  $0.9 - 2.5 \mu\text{m}$  の近赤外の全ての波長域に渡って同時に (iii) 撮像、多天体分光、または面分光することができる、という特長をもつ [1]。SWIMS では、Teledyne Scientific & Imaging 社の検出器 HAWAII-2RG (HgCdTe,  $2K \times 2K$  pixel) を 4 台 (TAO 搭載時には 8 台) 使用する。このように複数台の HAWAII-2RG を同時に駆動するような大型装置は国内では例がなく、複数台の PC を組み込んだ同時駆動ソフトウェアシステムや読み出し回路間のケーブルなど、ソフトからハードまで多様な要素開発を行った。また、同時駆動によるノイズへの影響について、独自の手法を用いて検出器システムをコンポーネントに分離し、初めて定量的に解析した [2]。本講演では、こうした SWIMS の検出器システムの開発について報告する。

1. M. Konishi et al. Proc. SPIE, 8446 (2012)
2. S. Todo et al. Proc. SPIE, 9154 (2014)

## 観測 a10 トランジット法による系外惑星観測のための赤外線単素子測光器の開発

横山 洋海 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

系外惑星を検出する方法の中に、惑星が主星の前を横切ることによる減光を測定する方法 (トランジット法) がある。トランジット法による検出は Kepler 衛星や WASP などによって宇宙、地上を問わず行われており、現在までに 1000 以上の系外惑星がこの方法で確認されている。トランジットによるわずかな減光を精度良く観測するためには、明るい参照星が必要である。トランジット観測には、2 次元アレイの検出器が良く用いられている。しかし、この方法では以下の問題が生ずる。1. 目標天体と参照星の出力値を同時に読み出すため、参照星が飽和しないように露出時間が設定される。そのため目標天体に対し、測光精度が高い明るい参照星を使えず、測光精度の向上が図れない。2. 対象となる天体と参照星を同時に観測するために、検出器の大きさによって参照星の数が制限され、精度の向上が図れない。

これに対し、我々が開発している測光器は、 $0.001\text{mag}$  の精度で M 型星の周りの惑星をトランジットにより観測することを目標としている。本装置は従来のものとは異なり、目標天体と参照星を別の単素子で計測する装置である。これにより、それぞれの星に対し最適な露出時間を選ぶことができ、参照星の明るさの制限もない。加えて、単素子を組み合わせた装置であるため、2 次元アレイの装置と比べて安価であり、視野の制限がない。

本発表では、我々の開発している装置の概要と、開発の到達状況と課題について説明する。

## 観測 a11 シャック・ハルトマン波面センサーの開発

森本 悠介 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

太陽系惑星だけでなく、太陽系外の惑星を観測し性質や分布を調べるとは、惑星形成を論じるうえで重要である。現在までに、直接・間接撮像により、数多くの系外惑星が検出されてきたが、直接撮像による検出数は間接撮像による検出数に比べて、圧倒的に少ない。また検出された惑星の種類は木星の数倍の大きさを持つ木星型惑星や、自ら発光している惑星にとどまる。直接撮像での検出が難しい一方、分光観測技術と組

み合わせることで、惑星の構成物質が特定できるなど、惑星の性質を調べるうえで必要な観測方法でもある。今後、地球型惑星のような小さな惑星を直接撮像で捉えるためには、地球大気による観測光の波面揺らぎを補償する、補償光学と呼ばれる技術のさらなる向上が必要とされている。

現在、我々のグループが開発している「SEICA」という補償光学装置は、波面の揺らぎを高周波成分と低周波成分に分け、二段構えでそれぞれの成分を補償する構造になっている。これによって、望遠鏡の開口径により決まる分解能の限界値である回折限界に近いイメージングを可能にし、木星と同程度の大きさの系外惑星の直接撮像が可能となる。

この「SEICA」の装置の中で、シャック・ハルトマン波面センサーは大気による観測光の波面揺らぎを測定する装置であり、「SEICA」の性能を左右する装置の一つである。今回はシャック・ハルトマン波面センサーの設計、組み立て、実験室内で波面揺らぎの測定を行い、性能評価を行った。

## 観測 a12 木曾 105cm シュミット望遠鏡における可視光 CMOS カメラの開発

菊池 勇輝 (東京大学天文学教育研究センター M1)  
東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡において 2011 年から運用されている KWFC(Kiso Wide Field Camera) は、 $2k \times 1k$  の CCD 8 枚を用いた  $2^\circ \times 2^\circ$  の CCD カメラであり、広視野ではあるものの、 $6^\circ \times 6^\circ$  以上の視野をもつシュミットの本来の性能を生かしきれぬものではなかった。現在我々は、このシュミット望遠鏡の視野全域を  $2k \times 1k$  の CMOS センサで覆う新しいカメラの開発を行っている。CCD と比較すると CMOS は撮像後の読み出しにかかる時間が非常に短いという特徴があり、一回の撮像ごとの読み出しに 1-2 分程度を必要とする CCD に対し、CMOS では 0.01 秒以下と圧倒的に短いため、高い時間分解能をもった動画的な撮像が可能になる。これにより可視光天文学においてあまり研究されてこなかった 1 秒前後の短いタイムスケールを持つ突発天体の観測を行うことができる。これまでに CMOS センサをモザイク化して広視野天文観測おこなう試みは他に例がないが、近年の技術革新により CCD に匹敵する低雑音、多素子の CMOS センサが作成できるようになったことで、その応用が可能になった。本装置の開発では、シュミットの類い稀な視野の広さに加えて CMOS センサを用いることで、短いタイムスケールの変動天体に対する高いサーベイ能力が期待される。今回は、開発中のカメラの概要とその開発計画、およびターゲットとなるような突発天体現象の概要を示すことで、本装置の開発およびそれによる新しいサイエンスの展望を示したい。

1. Rau A. et al., 2009, PASP, 121, 1334
2. Kulkarni, S. R. 2012, in Proceedings of the International Astronomical Union, Vol. 285, IAU Symposium, ed. E. Grifn, R. Hanisch, & R. Seaman, 55-61

## 観測 a13 宇宙 X 線偏光観測に向けた光電効果型ガス偏光計の開発

窪田 恵 (東京理科大学 玉川研究室 M1)  
宇宙 X 線の偏光観測は、検出器の技術的困難さから、観測自体が行われてこなかった。X 線偏光観測は、中性子星やブラックホール、超新星残骸などの天体の磁場や幾何構造を調べる切り札として期待されてい

る。そこで我々は、宇宙での X 線偏光観測を実現するために NASA と共同で、光電効果を利用したガス偏光計の開発を進めている。その性能評価のために我々は、衛星搭載品を簡素化した偏光計を製作し実験を進めている。ガス中に入射した X 線は、光電効果により光電子を放出する。光電子は入射 X 線の電気ベクトル方向に放出される確率が最も大きい。我々の偏光計では、ガス中での光電子飛跡を、Time Projection Chamber を用いて二次元で観測することによって、その飛跡から偏光方向を特定する。しかし、X 線が入射する事で生じる 1 次電子の数は少ないため、電子飛跡の形を保持したまま、ガス電子増幅フォイル (GEM) で増幅し、1 次元ストリップ電極で読み出す仕組みになっている。この偏光計を製作するにあたって重要な事は、電子の飛跡を崩さずにイメージを取得できるかである。そのためには、十分な増幅率、様な増幅率、時間安定性の 3 つの GEM の基本性能と、偏光計に使用するガスであるジメチルエーテル (DME) 中での電子のドリフト・拡散を含む電子輸送特性を調べる必要がある。前者は先行研究により、問題ないことが確かめられている。後者は測定した例は少なく、今までシミュレーションにより計算した値を使用していた。そこで今回タイミングの取れる X 線発生装置を使って DME 中での電子輸送特性の測定を行った。さらに鉄線源からの X 線を偏光計に照射して電子飛跡を実測する事に成功し、基本動作を確認した。本講演では、ここまでの偏光計全体の開発状況について述べる。

1. Tamagawa, T., et al. 2006, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 560, 418
2. Tamagawa, T., et al. 2009, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 608, 390

## 観測 a14 マイクロマシン技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発現状

佐藤 真柚 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)  
X 線天文学において天体からの X 線を集光・結像する光学系は必要不可欠である。X 線の物質に対する屈折率は 1 よりわずかに小さいため、全反射を用いた斜入射光学系を用いる。また X 線は大気で吸収されるため、宇宙空間にて観測する必要がある。そのため X 線光学系としてはより軽量かつ高角度分解能のものが要求されている。そこで私たちはマイクロマシン技術を用いた独自の超軽量かつ高分解能な X 線望遠鏡の開発を行っている。

製作プロセスとしては、シリコンドライエッチングにより穴幅  $20 \mu\text{m}$  深さ  $300 \mu\text{m}$  の曲面穴構造体を製作し、反射面の平滑化のためアニール加工を行う。高温プレスにより球面変形を行い、その後エネルギーバンド拡大や反射率向上のため原子層積法にて重金属を膜付けし、最終的に異なる曲率半径で曲げた 2 枚の基板をアライメントを行う。

昨年本光学系を用い、JAXA 宇宙科学研究所 30 m ビームラインにて X 線照射実験を行った。X 線は Al K $\alpha$  1.49 keV を用いた。その結果、角度分解能 (FWHM)、有効面積、焦点距離はそれぞれ 4.1 分角、 $32 \text{ mm}^2$ 、403 mm と求めた。角度分解能は将来ミッションの要求値である 5 分角以下を満たすものの、有効面積は設計値である  $162 \text{ mm}^2$  より 1/5 程度となっており、焦点距離も設計値の 250 mm に対して 1.6 倍長かった。有効面積低下の原因を調べた結果、バリと呼ばれる突起物によって入射光の一部が遮蔽されたり、アンダーカットとよばれる過剰にエッチングされている部分によって反射面の一部が平らになっていないことが分かった。焦点距離については、微細穴が表面に追従してうまく変形さ

れていないことが原因と分かった。

本講演においてはこれまでの開発現状や昨年度の X 線照射実験の結果と考察、また今後の展望や本望遠鏡搭載予定の将来衛星ミッションについて詳しく述べる。

## 観測 a15 DIOS/FXT 鏡面物質の設計

中道 蓮 (名古屋大学 Ux 研 M1)

小型衛星 DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) は、 $10^5 - 10^7$  K 程度の銀河間中高温プラズマ (WHIM: Warm-Hot Intergalactic Medium) の観測を目的としている。面輝度が低く、数十平方度に広がったこの天体を観測する上で  $100 \text{ cm}^2 \text{ deg}^2$  の高い  $S \cdot \Omega$  (有効面積  $\times$  視野) が要求される。そこで開発されたのが 4 回反射型 X 線望遠鏡 (FXT: Four-stage X-ray Telescope) である。4 回反射を用いることで実現される短焦点距離、大口径の望遠鏡が  $S \cdot \Omega$  を向上させる。本研究は、これまでの X 線望遠鏡に用いられてきた Au や Pt の表面に、別の物質を成膜することで DIOS 衛星の観測波長帯 0.3 - 1.5 keV での反射率を向上させることを目的とする。この候補として、0.6 keV 付近で高い反射率を持つ Ni に注目した。しかし、今回用いる磁気スパッタ法で強磁性体を成膜する事は難しい。そこで、Ni の強磁性を緩和させるために、バナジウムを 10% 混ぜた NiV を成膜した。また、NiV の表面に炭素を成膜することで、Ni の L 吸収端 (830 eV) による反射率の低下を抑えた。こうして作製したサンプルの、8 keV の X 線に対する反射率の入射角依存性を測定することで、各層の界面、表面粗さと膜厚を間接的に測定した。この結果から、0.3 - 1.5 keV での反射率を計算し、Au または Pt の単層膜と比較すると、入射角が  $2.9^\circ$  となる最も外側の反射鏡では、Ni が臨界エネルギーを迎える 0.8 keV よりも高いエネルギーでは反射率が低下した。しかし、入射角が  $1.0^\circ$  となる内側の反射鏡では全観測波長帯に渡って反射率が向上した。特に、0.6 keV 付近の酸素の輝線領域では 10% の向上が期待される。

## 観測 a16 6 keV 付近に大きな反射率を持つ X 線多層膜スーパーミラー望遠鏡の開発

吉川 駿 (名古屋大学 Ux 研 M1)

本研究は天文学において重要な鉄輝線を含む 6 keV 付近の X 線に対して大面積を持つ望遠鏡開発を目標としている。鉄原子は存在量が多く、数千万 K のプラズマは強い鉄の特性 X 線を放射している。これを精密観測することでプラズマの温度、密度などがわかり、ドップラー効果を測定することで運動の様子も知ることができる。このように鉄輝線の測定は重要な意味を持つため、精密観測を行うには多くの X 線が必要となり、大有効面積の望遠鏡が必要となる。X 線は透過力が強く屈折しにくいいため反射による結像を考える。これまでの望遠鏡では反射鏡として金属の全反射を利用してきた。現実的な焦点距離を 6 m として全反射を利用した望遠鏡の口径は 0.5 m 以下に限られる。これは臨界角による制限により大角度での反射ができないためである。つまり、限られた焦点距離でさらに大口径化するには大角度で入射する X 線を反射できる鏡が必要となる。そこで、重元素、軽元素を交互に積層することでブラッグ反射を利用し、大角度入射が可能な多層膜スーパーミラーを用いる。6 keV 付近の X 線望遠鏡開発では重元素に比較的高い反射鏡が得られ表面が酸化することのない Pt を、軽元素に X 線の吸収の弱い C を用いることにした。しかし、Pt の吸収端が 2 keV 付近であるため、この付近で急激な反射率の低下を引き起こす。2 keV 付近のエネルギー帯にはこれまでの X 線衛星の観測によりブラックホール吸着円盤にて見つかつて

いる硫黄、ケイ素輝線が含まれる。そのため、このエネルギー帯でも十分な有効面積を得られるようにする必要がある。本講演では、Ni を最上層にすることにより、全反射領域での Pt 吸収端の影響を最小限にとどめることができる多層膜スーパーミラーを作成、X 線反射率について現状を報告する。

## 観測 a17 X 線望遠鏡用ガラス母型研磨の高精度化及び効率化

前島 将人 (名古屋大学 Ux 研 M1)

我々はブラックホールや  $\sim 10^7$  K の高温ガスといった高エネルギー天体を詳細に観測するために X 線望遠鏡を用いる。X 線望遠鏡の反射鏡には、非常に滑らかな表面と高い形状精度が要求される。この反射鏡の製法の一つとして、ガラス母型に金属膜を成膜し、その金属膜を基板に転写することで反射鏡を製作するレプリカ法がある。この方法で作られる反射鏡の表面粗さと形状精度はガラス母型の表面の粗さと形状に大きく依存するため、我々は表面粗さ 0.5 nm 以下の滑らかな表面と高い形状精度を持つガラス母型を製作することを目指している。ガラス管を研削加工により高い形状精度に加工した後、その表面を研磨パッドを用いて研磨加工することで、ガラス母型製作を行う。昨年度の研究で、ガラス表面の 50 mm 幅を研磨し、表面粗さを約  $1 \mu\text{m}$  から 10 nm 以下にまで低減させることに成功している。しかし、研磨に 80 時間以上を要し、作業手順も複雑であった。そこで、本研究ではガラス母型をより効率的に研磨すること、研磨したガラス母型を使って実際に反射鏡を製作しその表面粗さを測定することを目標とした。本研究では円筒ガラス研磨の効率化として、研磨剤の投入を必要としない研磨パッドを導入をした。これによって、研磨剤交換や研磨後の洗浄作業を短縮させることに成功した。また、この研磨パッドを導入することで研磨効率は落ちることなく、むしろ 1 時間あたりの研磨量を  $0.030 \mu\text{m}/\text{h}$  から  $0.147 \mu\text{m}/\text{h}$  まで増加させた。次に、レプリカ法で反射鏡を製作し、8 keV の X 線を使って反射率の X 線入射角依存性を測定し、反射鏡表面粗さを見積もることで、研磨したガラス母型の表面粗さを評価した。これは研磨後のガラス母型の表面粗さが現在使用している触針式粗さ計の測定限界に到達したためである。測定結果から、ガラス母型の表面粗さは 1 nm 以下に低減していることが分かった。

1. 中出章太. 円筒ガラス管研磨技術の開発. 愛媛大学修士論文 (2012)

## 観測 a18 ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡の地上較正試験

菊地 直道 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H には広いエネルギー帯の X 線の結像を可能にする 4 つの X 線望遠鏡が搭載される。そのうち 0.3-12 keV の軟 X 線において、カロリメータ (SXS) と CCD カメラ (SXI) への結像を担うのが国際協力によって GSFC/NASA で作られた 2 台の軟 X 線望遠鏡 (SXT) である。

X 線は物質の吸収によってレンズのような直入射光学系を用いた結像が困難であるが、屈折率が 1 よりわずかに小さいことにより、臨界角以下での全反射を利用し集光を行うことができる。SXT では鏡面に重金属である金を成膜した薄い反射鏡を 203 層にわたって積層し、Wolter-I 型斜入射光学系を用いた 2 回反射によって焦点面への結像を可能にしている。



天体からの X 線の情報をより正確に理解するためには、望遠鏡などの衛星搭載機器の応答を把握しなければならない。そのため SXT の光学特性を把握するために、現在、JAXA/ISAS の X 線ビームラインを使用し地上較正試験を行っている。望遠鏡の特性には集光力を示す有効面積、空間分解能を示す結像性能、また視野外の天体から正常な 2 回反射以外で焦点面に侵入してしまう迷光などがある。今まで行われてきた地上較正試験の結果から、SXT-1、2 はともに望遠鏡単体での有効面積がそれぞれ、 $445 \text{ cm}^2$ 、 $454 \text{ cm}^2$  ( $4.51 \text{ keV}$ ) とすざくの X 線望遠鏡 (XRT) の  $330 \text{ cm}^2$  より 1.3 倍ほどに性能が上がっていることが確認された。さらには大口径化し焦点距離を  $5.6 \text{ m}$  (すざく  $4.75 \text{ m}$ ) と長くしたことにより、 $9.44 \text{ keV}$  での有効面積は SXT-1、2 では  $270 \text{ cm}^2$ 、 $278 \text{ cm}^2$  とすざく XRT ( $175 \text{ cm}^2$ ) の 1.5 倍となっている。また、結像性能もやはり、すざく XRT ( $\sim 2.0$  分角) よりも向上し、 $4.51 \text{ keV}$  において SXT-1、2、それぞれ 1.3 分角、1.2 分角となった。迷光は off-axis において、2 段目ミラーのみの反射による漏れ込みがプリコリメータによって遮断できていることが確認された。しかし、一部プリコリメータをすり抜けてしまう迷光が存在することが分かり、軌道上での観測ではこれを考慮して行わなければならないだろう。

本講演ではこの 2 台の SXT の地上較正試験の測定結果をまとめ、その報告を行う。

### 観測 a19 ASTRO-H 衛星搭載 SXS のデジタル信号処理装置における波形分類処理の検証

久保田 拓武 (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)

ASTRO-H は、2015 年に打ち上げが予定されている次世代 X 線天文衛星である。この衛星には SXS (Soft X-ray Spectrometer) と呼ばれる軟 X 線分光検出器が搭載される。SXS は X 線マイクロカロリメータであり、入射光子のエネルギーを温度上昇として検出することによって、これまでの標準的な X 線 CCD の 20 倍以上高い、約  $10 \text{ eV}$  というエネルギー分解能を実現する。温度上昇として検出された信号は、アナログ/デジタル変換され、デジタル信号処理装置 PSP (Pulse Shape Processor) へと送られている。PSP では信号処理の際に数百の波形の平均をとった波形 (テンプレート波形) を用いて、最適フィルタ処理を行う。最適フィルタ処理には有限の長さを持つ波形が必要であるが、信号が重畳すると、正しいフィルタ処理ができなくなる。そのため、処理対象となる波形と、前後の信号との時間間隔によって波形をいくつかの種類に分類し、それぞれに適切な長さのフィルタ関数をあらかじめ用意する必要がある。この分類はグレード付けと呼ばれる。PSP ではこれらを時間間隔ごとに 3 種類に分類して、長い方の 2 種類に分類された信号にのみ、最適フィルタ処理を行う。間隔が広い順に High, Medium, Low の 3 種類、さらに、信号の前後関係で primary, secondary の 2 種類あり、これらを組み合わせた Hp, Mp, Ms, Lp, Ls の計 5 種類が存在する。間隔が広いものほどサンプル長さが長く、他の信号の影響が少ないため、有用な情報として扱うことができる。この最適フィルタ処理の準備としてのグレード付けが適切に行われているかを、自作プログラムで確認する。衛星搭載同等器によって処理されたデータをグレードごとに分け、その数の比 (グレード分岐比) を計算し、さらにその分類が、PSP で定義された時間間隔どおり分けられているか検証した。結果、グレード付けについて、衛星搭載同等器で正しく処理されていることが確かめられた。

### 観測 a20 ASTRO-H 衛星搭載の中央制御コンピュータにおける時刻配信性能の検証

中谷 創平 (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)

ASTRO-H 衛星とは日本が開発を行っている X 線天文衛星である。ASTRO-H 衛星は、パルサーなどの時間変動の速い天体の観測を行うために、最終目標を  $\sim 30 \mu\text{s}$  とした高い時刻精度が要求されている。ASTRO-H 衛星では、GPS から受信したクロックを基に衛星内で基準となる時刻を作成、TimeCode と呼ばれる時刻情報としてネットワーク内に配信し、同期を行っている。しかし、同期を行うまでに時刻情報には遅延とジッターが生じてしまい、その結果、時刻精度が悪化してしまう。我々は、時刻精度を悪化させる要因を 7 つの項目に分け、合計で時刻精度目標である  $\sim 30 \mu\text{s}$  を達成しようと考えている。今回はその中の一項目である "中央制御コンピュータから配信される TimeCode のジッター" に関して、ASTRO-H 衛星搭載品を用いて検証試験を行い、衛星搭載品に関する重要なデータを取得するとともに、測定結果が目標値を満足する値であるという結果を得た。今回はこの検証試験について報告する。

### 観測 a21 誘電体 X 線マイクロカロリメータの開発

星野 全俊 (宇宙科学研究所 M1)

宇宙に存在するバリオンは 50% は X 線でしか観測できないとされており、その観測対象も中性子星から超銀河団にまで多岐に及ぶ。例えば、銀河団に付随する高温プラズマの熱運動や元素組成などの物理状態の解明には数 eV の分光能力とメガピクセルの撮像能力を両立した検出器が求められる。多くの X 線衛星に搭載されている X 線 CCD カメラ (CCD) はメガピクセルだが、分光能力は原理的な上限である  $120 \text{ eV}$  にすでに達している。一方で X 線マイクロカロリメータ (XMC) は撮像と数 eV の分光を同時に行える検出器である。ピクセルに入射した X 線光子のエネルギーを熱に変換し、その温度上昇を測定する。数 eV の分光能力を達成するために極低温に動作温度を下げ熱雑音を抑制する必要がある。しかし抵抗を温度計として使う場合、一つのピクセルには読み出し用の配線が数本必要であり、その熱流入により極低温を維持できない。低温での信号多重化が可能な超伝導体を温度計として用いる方式でも、1000 ピクセル程度が限界といわれ CCD ほどの撮像能力は得られない。

この問題を解決するために、誘電率の変化を温度計として使用する「誘電体 X 線マイクロカロリメータ (DXMC)」を我々は考案、開発を行っている。高周波交流回路に誘電体を組み込むことで、1 本の伝送路で 1000 ピクセル以上を読み出すことができる。そのため原理的には CCD と同じ撮像能力が得られる。これまでに量子常誘電体である  $\text{SrTiO}_3$  の極低温における誘電率の温度依存性を測定した。現在は信号増幅のために新たな低温用アンプを使うことを考えている。特に  $8.5 \text{ GHz}$  までの増幅率の評価を行っている。本講演では DXMC の原理、開発状況、アンプの評価結果について発表する。

### 観測 a22 将来衛星搭載に向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの開発

村松 はるか (宇宙科学研究所 M1)

我々は、現在提案中の X 線天文衛星 DIOS (Diffuse intergalactic Oxygen Surveyor) に向けたマイクロカロリメータ検出器の開発を行っている。近傍宇宙に存在するバリオンのうち半分以上はまだ観測にかかって

いない。宇宙流体シミュレーションよれば、このバリオンは大規模構造のフィラメントに沿って、薄くて広がった中高温のガス (WHIM: Warm/Hot Intergalactic Medium) として存在していることが示唆される。WHIM は高階電離した酸素からの特性 X 線を捉えることで観測できる。DIOS では、WHIM からの酸素輝線の赤方変位を精密に測定することで銀河系からの酸素輝線と区別し、その空間分布を探ることを計画している、そのためには、2eV のエネルギー分解能を有し、 $16 \times 16$  素子以上の TES 型 X 線マイクロカロリメータ検出器が必須である。

TES 型 X 線マイクロカロリメータとは、熱雑音の小さい極低温 ( $\sim 100$  mK) で動作し、超伝導遷移端の急激な抵抗変化を高感度の温度計として用いることで、入射 X 線による素子の温度上昇を精密に測定する検出器である。我々のグループでは、半導体技術を用いて素子を in-house 製作しており、単ピクセル素子で 5.9 keV の X 線に対し 2.8 eV、256 素子のうち 1 素子では 4.2 eV の分光性能を達成している。しかし、多素子を均一に作り込むなど技術的課題はまだ多い。

本講演では、TES アレイ製作の各段階で最大 8 素子までの超伝導特性を測定し、各プロセスが転移特性にどのような影響を与えるかを調査した結果を報告する。また高感度の宇宙 X 線観測では、宇宙線バックグラウンドの除去が本質的である。我々は TES 素子を 2 段に配置し、反同時係数法を用いることでこれを実現しようとしており、その最新の成果についても報告する。

## 観測 a23 講演キャンセル

## 観測 a24 自作断熱消磁冷凍機による TES 型 X 線マイクロカロリメータ動作環境の開発

神谷 賢太 (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光子 1 つ 1 つを素子の温度上昇として検出する X 線検出器であり、100 mK 以下の極低温での動作により  $E/\Delta E \sim 1000$  の優れたエネルギー分解能を実現する。2015 年度打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星では世界初の X 線マイクロカロリメータによる精密 X 線分光観測が実現される。DIOS 衛星計画では超伝導遷移端を高感度の温度計として利用した TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータを用いることで、さらに優れた撮像分光性能を目指している。

人工衛星の微小重力下で 100 mK 以下の極低温を実現するには、断熱消磁冷凍機 (ADR; Adiabatic Demagnetization Refrigerator) がもっとも現実的である。ADR は磁性体に磁場を印加してエントロピーを制御することで冷却を行う冷凍機である。一方、TES カロリメータは超伝導遷移端を利用するため磁場の影響を受けやすいことから、我々は TES カロリメータを ADR と一体で開発することが重要と考えて、研究を進めてきた。本講演ではその成果について報告する。

クライオスタットは液体ヘリウムタンク、蒸気冷却による 2 重の放射シールド、多層断熱材 (MLI) で構成され、極低温ステージへの侵入熱を抑える。7 リットルの液体ヘリウムを 2 日間保持できる。磁性体には鉄ミョウバンを使用し、ケースの製作と結晶成長はインハウスで実施している。無負荷時の最低到達温度は 40 mK 以下、80 mK 以下の保持時間は 20 時間以上を実現している。超伝導磁石は 9 A で 3 T の磁場を発生するが、最大磁場発生時にセンサに影響を及ぼすことを防ぐために、超伝導磁石の周りには 12 mm 厚のケイ素鋼の磁気シールドを被せ、さら

にセンサの周りには地磁場や超伝導磁石の漏洩磁場を遮蔽するために強磁性体と超伝導体の二重シールドを施している。本 ADR で TES カロリメータを動作させ、5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能として  $3.8 \pm 0.4$  eV を実現している。

## 観測 a25 最遠方 GRB 観測を目指した X 線撮像検出器の開発

吉田 和輝 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)  
ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) は  $10^{52}$  erg ものエネルギーをガンマ線放射として解放する宇宙最大の爆発現象である。短時間ではあるが極めて明るく輝き、その多くは赤方偏移  $z > 1$  で発生していることから、初期宇宙を探るための光源として利用されてきている。これまでに分光観測されている GRB の多くは  $z < 7$  の頃までのものであるが、宇宙再電離や重元素合成など宇宙が劇的に変化したのはそれ以前のことである。そこで我々は、 $z > 7$  の GRB を観測することでその当時の宇宙の物理状態を探ることを目的とした小型科学衛星 HiZ-GUNDAM を計画している。

金沢大学では、強く赤方偏移をして数 keV の X 線帯で輝く GRB を検出し、その到来方向を決定するための広視野 X 線撮像検出器を開発している。本公演ではこの X 線撮像検出器について紹介する。目標として 1 ~ 20 keV で輝く GRB を検出するため、検出器には低エネルギーに感度を持つシリコン半導体を用いる。現在は 1 次元のストリップ型の電極を 64 本配置したシリコン半導体検出器 (SSD) とその読み出しに特化した信号増幅率の高い ASIC の開発を行っている。SSD は電極の長さや幅が違う 6 種類のもので開発した。素子性能を調べるため、リーク電流、静電容量の測定、スペクトルを取得して基礎特性の評価実験を行った。ASIC は 64 チャンネルの入力を持ち、それぞれのチャンネルで電荷信号の増幅、波形整形、AD 変換を並列に行う回路を  $8 \times 9$  mm のシリコンウエハー上に集積したものである。64 チャンネルそれぞれでのエネルギー較正をとり、ノイズレベルを測定してチャンネルごとの特性を調べた。無負荷状態の ASIC 単体の性能としては、 $4\sigma$  でトリガーをかける場合、1.3 keV 相当の信号を検出できることが分かった。また、SSD による入力容量を 7 pF と想定し、5.9 keV 相当の信号を入力したときのエネルギー分解能は FWHM 換算で 2.2 keV であることを確認した。[1][2]

1. D. Yonetoku et al., SPIE, submitted, (2014)
2. D. Yonetoku et al., UNISEC Takumi Journal, 5, 19-27 (2014)

## 観測 a26 Suzaku/WAM におけるガンマ線バーストの位置決定能力の数値計算による検証

藤沼 洸 (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)

2005 年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星「すざく」には硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector; HXD) が搭載され、世界最高感度で硬 X 線天体を観測している。その外周を取り巻くシンチレーター結晶は全天からの放射を受けるため、Wide-band All-sky Monitor (WAM) として全天 X 線観測に役立てられる。撮像機能はないものの、50-5000 keV 帯域で全天のほぼ半分の視野を持つ。他の観測装置に比べ有効面積が大きいため、ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst; GRB) 等の突発天体を年間 150 イベント以上検出する。しかし、WAM 単独では突発天体の位

置を決定することができないため、解析に利用できる GRB は他衛星と同期した約 6 割の天体に限られる。残りの約 4 割の GRB を解析するためには、衛星全体を構成する物質やその密度、空間分布を再現したマスモデルを用いてモンテカルロシミュレーションを行い、様々な到来方向に対する WAM のエネルギー応答を詳細に調べることで、GRB の到来方向を推定できるようにする必要がある。

本研究では、Geant4 ツールキットを用いて「すぎく」のマスモデルを作成、モンテカルロシミュレーションツールを開発し、全天から降り注ぐ光子に対する WAM の応答を入射角度ごとに調べた。結果、各面での検出効率、光子の入射角度を反映することが再確認でき、より定量的な見積もりが可能になった。他の衛星で到来方向が既知の 30GRB に対し、WAM データから推定した位置と比較した結果、両者の差分の平均は、物質の多い冷媒タンクなどがある方向を除けば約 9 度の精度であることが分かった。より正確な位置決定をするには、更なる検証が必要である。本講演では、この手法と結果について発表する。

### 観測 a27 ガンマ線望遠鏡 CTA に用いる大口径望遠鏡用光電子増倍管の磁場依存性の検証

松岡 俊介 (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)

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画とは、次世代チェレンコフ望遠鏡を用いたガンマ線観測を目的とする、世界 28 ヶ国、約 1100 名以上が参加する国際共同計画である。望遠鏡は 2016 年に建設開始予定としている。CTA 計画では従来よりも一桁良い感度で、20 GeV から 100 TeV 以上でのガンマ線観測を達成するために、大中小の大きさの望遠鏡を用いている。CTA 日本グループはその中でも大口径望遠鏡の開発に貢献している。大口径望遠鏡の光検出器には一台につき 1855 本の光電子増倍管 (PMT) が配置される。

CTA 計画は地上でのガンマ線観測のため、PMT のゲインが地磁気により変化すると考えられる。この影響を防ぐために PMT には磁気シールドを巻いている。我々はこの磁気シールドの効果が地磁気の影響を防ぐために十分であるか確かめる必要がある。今回、我々は PMT に磁場をかけゲインの磁場依存性を検証した。その結果、地磁気の 2 倍ほどの磁場中でもゲインの変化は 1% 以下であり、CTA での要求値を満たしていることを確認した。本講演では上記の性能評価試験についての報告を行う。

### 観測 a28 CTA 大口径望遠鏡用ライトガイドの形状決定と製作方法の確立に向けた開発

小野 祥弥 (茨城大学理工学研究科理学専攻物理系 M1)

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、大・中・小と口径が異なる 3 タイプのチェレンコフ望遠鏡群を用いて、これまでにない高感度で 20 GeV から 100 TeV 以上に渡る広エネルギー帯において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。この計画において CTA-Japan グループは主に大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST) の開発に関わっている。LST の焦点面にはガンマ線によって生じたチェレンコフ光を捕える光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube, PMT) が 1855 個配置され、全ての PMT にライトガイドと呼ばれる光学部品が備え付けられる。ライトガイドは、観測したい光であるチェレンコフ光を効率よく集め、夜光などのバックグラウンドを軽減するという役割を担う。ライトガイドの側面形状としては、ある角度 (cutoff angle) 以内に入射した光のみを 100% 集めるという理想的な特徴をも

つ Winston Cone 形状が候補となっていた。しかし、実際に使用する PMT の入射窓は円形であり、それを敷き詰める関係上、ライトガイドの入射部分は六角形である必要がある。この場合、側面を Winston Cone 形状にしても、先に述べた理想的な特徴が実現しないことがわかったため、より理想に近い形状を探す必要性が出てきた。そこで、以前より光線追跡用のツール ROBAST (ROot BAsed Simulator for ray Tracing) を用いてシミュレーションを行い、最適な形状を探っている。形状の最適化をするには、このシミュレーションを現実と可能な限り同じ条件にする必要があるが、前年度までに行ったシミュレーションには考慮しきれていない条件があった。今後は、不足していた条件の 1 つとして考えられている反射材の反射率角度依存性などを測定し、シミュレーションに取り込んだ上でライトガイドの形状を最終決定し、実際に使用するライトガイドの製作方法を確立する予定である。

### 観測 a29 MeV ガンマ線検出を目的とした電子飛跡検出型コンプトンカメラ ETCC の性能評価

竹村 泰斗 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

MeV ガンマ線天文学はブラックホールによる重力場からの放射など様々な天体现象の観測が予想されている。しかし現在までに MeV 領域の全天を観測したのは COMPTEL のみであり発見された天体も約 30 個と非常に少ない。その原因は宇宙線と衛星本体との相互作用により生じるガンマ線や、中性子などのバックグラウンドが多く存在することにある。そのためガンマ線イメージングは非常に難しくなっている。我々のグループはバックグラウンドの高効率除去を備えた新しい検出器である電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron Tracking Compton Camera, ETCC) を開発している。COMPTEL ではガンマ線の到来方向を円環へ制限するだけだったが ETCC は新たに反跳電子の方向を測定することにより高品質なガンマ線イメージを取得している。我々のグループは 2006 年にこの ETCC ( $10 \times 10 \times 14 \text{ cm}^3$ ) を用いた気球実験 SMILE-I (Sub-MeV gamma ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment) を行い高いバックグラウンド除去能力を示しサブ MeV 大気・宇宙拡散ガンマ線フラックスの測定に成功した。我々は SMILE-I ETCC を進化させた新しい ETCC ( $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ ) を開発した。300 keV で SMILE-I の 500 倍の  $0.5 \text{ cm}^2$  以上の有効面積を実現した。電子飛跡検出率も約 10% から約 100% へ改善することでコンプトン散乱点の決定精度を向上させることに成功した。我々はこの新しい ETCC を用いて気球実験 SMILE-II を行う予定である。この気球実験は明るい天体であるかに星雲の観測で ETCC の望遠鏡としての実証を目的としている。本講演ではこの SMILE-II の ETCC の装置性能について述べる。

### 観測 a30 電子飛跡検出型コンプトンカメラのバックグラウンド除去性能の評価

宮本 奨平 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

現在の sub-MeV、MeV 領域における天体の観測は他の波長領域に比べて進んでいない。原因として、この領域におけるガンマ線と物質との相互作用はコンプトン散乱が優勢になるために、検出が困難であるということが挙げられる。それに加えて、宇宙線と検出器筐体との相互作用で生まれるガンマ線や、宇宙全体に広がったガンマ線がバックグラウンドとなり、本来観測したいイベントとの分離が困難であるといった問題もある。

我々のグループは、このような観測的な課題を克服し、優れた感度で

全天の観測を行うことを目指し、ガスを用いた全く新しい検出器、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。ETCC はコンプトン散乱によって生成される散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点、散乱電子の三次元的な飛跡とエネルギーをそれぞれ検出する。すると、運動学的な解析から、コンプトン散乱を完全に再構成でき、入射ガンマ線のエネルギーと到来方向が得られるのである。

電子飛跡型コンプトン法はバックグラウンドを非常に強力にカットすることもできる。ETCC のバックグラウンド除去性能を評価するために我々のグループは、水に 140MeV まで加速した陽子ビームを照射し、大量のガンマ線、中性子、荷電粒子を生成することで高雑音環境を作り出し、その環境下でガンマ線源の測定を行った。本講演ではこの実験を踏まえ、高雑音環境下でも、ガス中を通過した粒子のエネルギー損失の分布から、コンプトン散乱による電子とその他の高エネルギー粒子とを分離することができ、これによってバックグラウンドを除去し、ガンマ線源の位置とスペクトルが測定できることを紹介する。

### 観測 b1 広視野多天体補償光学系

高田 大樹 (東北大学天文学専攻 M1)

地上で望遠鏡を用いて観測を行おうとしたとき、大気の揺らぎの影響を無視することはできない。特に、次世代超大型地上望遠鏡 (Extreme Large Telescope, ELT) を用いて精度の良い観測を行うためには大気の影響をなくすための技術が必要不可欠となる。この技術のことを補償光学 (Adaptive Optics, AO) と呼び、近年 ELT のための次世代補償光学の研究が盛んに行われている。ELT のひとつとして 30 メートル望遠鏡 (Thirty Meter Telescope, TMT) が挙げられる。TMT は 2020 年代に運用予定の大型望遠鏡で、AO は必須の技術である。

AO を行うには、大気の「測定」「推定」「補償」を順に行えば良い。ターゲット天体のそばにある明るい天体 (Guide Star, GS) の波面を波面センサー (WaveFront Sensor, WFS) を用いて測定し、測定結果から補償すべき大気の揺らぎを推定し、可変形鏡 (Deformable Mirror, DM) を用いて補償を行う。しかし、従来の方法ではターゲット天体付近に明るい天体が無ければならないが、都合の良い天体はなかなか無い。よって、レーザーガイドスター (Laser Guide Star, LGS) という人工的な GS を用いることでより多くの天体に AO を行うことができ、また複数の LGS を用いることで広視野を補償できる方法が生まれた。このような AO を特に広視野補償光学 (Wide Field Adaptive Optics, WFAO) と呼ぶ。WFAO は主に高度毎の大気の揺らぎを補償を行う多層共役補償光学 (Multi Conjugate Adaptive Optics, MCAO)、地表付近の全ての方向に共通の揺らぎ成分を補償する地表層補償光学 (Ground Layer Adaptive Optics, GLAO)、視野内にある複数の目標天体方向のみに補償を行う多天体補償光学 (Multi Object Adaptive Optics, MOAO) の 3 つがある。

我々の研究室では TMT に用いる広視野多天体補償光学系として、MOAO と GLAO を組み合わせた AO を考えている。MOAO を行う前に視野全体の大气揺らぎを補償する GLAO を入れることで AO の性能向上を目指している。この光学系のことを前置補償光学系と呼ぶ。今回の私の発表では、広視野多天体補償光学系中の前置補償光学系の設計について紹介する。

1. M.Hart, et al. (2010). A ground-layer adaptive optics system with multiple laser guide star. nature, Vol 466, 727-729.
2. Benoit Neichel, et al. (2014). Gemini multiconjugate adaptive optics system review - II. Commissioning, operation and overall

performance. MNRAS, 440, 1002-1009.

### 観測 b2 埼玉大学 55cm 望遠鏡用 TRIPOL の開発

潮田 和俊 (埼玉大学教育学部理科専修 天文学研究室 M1)

埼玉大学では 55cm 望遠鏡とフィルターターレットを用いた可視測光観測を行っている。しかし、各波長の観測条件が異なることや、観測時間が長くかかるという問題がある。そのため、観測効率の向上と同一観測条件による多色同時撮像を目的として TRIPOL (Triple-Range Imager and POLarimeter; 3 色同時撮像偏光装置) の開発を行う。TRIPOL の特徴は小型 (大きさ約 35cm 立方) の観測装置であり、堂平 91cm 望遠鏡 (F=18) など他の望遠鏡にも容易に取り付けられることと、レンズを通さない光学系を持つことである。

昨年度は、まず F=10 用の望遠鏡に開発された TRIPOL の組み上げを行い、撮像部において実験室での性能評価、及び試験観測を行った。埼玉大学望遠鏡 (F=6.5) に搭載した際の共通視野は  $8.93' \times 8.95'$  であり、S/N=10 の限界等級 (露出時間 10s  $\times$  5 枚) は g' バンド (15.4 等)、r' バンド (14.7 等)、i' バンド (16.3 等) であった。また、既知のトランジット天体 (WASP-12b) を観測し g' バンド (1.6%)、r' バンド (1.2%)、i' バンド (2.1%) の減光を検出できた。この天体を用いた測光安定性の評価から g' バンド (0.7%)、r' バンド (0.6%)、i' バンド (1.1%) の変動の検出が可能な事が分かった。この結果をもとに埼玉大学望遠鏡用に長波長に感度の高い CCD を新たに用いて r バンド、i バンド、z バンドの 3 バンド同時撮像偏光装置を開発中である。

### 観測 b3 1.85m 電波望遠鏡プロジェクト紹介

切通 僚介 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

我々は、口径 1.85m のミリ波・サブミリ波望遠鏡 (野辺山宇宙電波観測所内に設置) の開発を行っており [1]、2011 年 1 月より科学運用を開始した。本望遠鏡は ALMA 等にも採用されている 2SB ミキサや導波管直線偏波分離器 (OMT : Ortho-Mode Transducer) を開発/導入することで、 $^{12}\text{CO}$ 、 $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J = 2-1$ ) の 3 輝線を高感度に同時観測できることが特徴である。我々は本望遠鏡を用いて 2.7 分角の空間分解能で天の川銀河の広域観測などを推進している。2013 年度は新たに、速度幅の広い天体 (e.g. 銀河中心) の観測に対応するため分光計 XFFTS (帯域幅 2.5 GHz ; 分光点数 32768 点) を導入し、観測に耐えうることを確認した。さらに、我々が独自に開発している導波管型帯域分離フィルターを用いた新方式 2SB ミキサを搭載するなど、更なる改良を行っている。本講演では、この 1.85 m 電波望遠鏡の開発状況、今後の計画についての報告を行う。

1. Onishi et al. 2013 PASJ

### 観測 b4 スペース赤外望遠鏡のための低温可変形鏡の開発

高橋 葵 (宇宙科学研究所 M1)

地上で作られた望遠鏡を軌道上に打ち上げると、重力からの解放により鏡面が変形する。また赤外線観測の場合には、望遠鏡自身からの熱放射

を抑えるため望遠鏡全体を冷却する必要があり、このとき各 부품の熱膨張率の違いによって熱変形が起こる。従来、これらの鏡面変形に対しては設計の工夫、シミュレーション、および地上試験で可能な範囲での検証等による対策がとられてきた。しかし、もし小型の変形鏡（以下 DM）を用いて打ち上げ後に軌道上で波面の乱れを補正できれば、従来を上回る性能の望遠鏡が実現でき、またコスト削減、開発期間の短縮、およびリスクの低減において大きな効用があると考えられる。

そこで我々は、Micro Electrical Mechanical Systems（以下 MEMS）技術を用いた DM に着目した。この DM はクーロン力によって変形されるので、その効用は温度によらず低温でも働く。さらにこの技術は、軽量かつコンパクトで素子数の多い可変形鏡を実現するのに適している。したがって、MEMS 技術を用いた DM（以下 MEMS-DM）には、スペース赤外望遠鏡の波面補正鏡として使用できる可能性が大いにある。

我々はこれまで、32 素子からなるプロトタイプの MEMS-DM を製作し、これが 95K で問題なく動いて冷却サイクルにも耐えうることを実証した。またこのプロトタイプは、衛星打ち上げを想定した音響試験、振動試験、急速減圧試験もクリアしている。そして現在、より高精度の波面補正のため素子数を 1020 素子に増やした、極低温（～5K）で運用できる新しい MEMS-DM を開発し、実証実験を進めている。

このような極低温 DM の本格的な開発は、世界的にもユニークである。多素子化した極低温用 MEMS-DM の開発が成就すれば、多くのスペース赤外望遠鏡に対して有効であり、特に系外惑星探査のためのコロナグラフに対して大きな役割を果たすことが期待される。

1. K.Enya et al. Proc.SPIE 8146 81460Q (2011)
2. K.Enya et al. PASP 121 260 (2009)

## 観測 b5 断熱消磁冷凍機上での TES 型 X 線マイクロカロリメータの分光性能の向上

小竹 美里（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 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、100 mK 以下の極低温で動作させることにより、 $E/\Delta E > 1000$  の優れたエネルギー分解能を実現する。中でも、超伝導遷移端を高感度の温度計として利用した TES（Transition Edge Sensor）型 X 線マイクロカロリメータはエネルギー分解能の更なる向上が見込めるため、DIOS 衛星等の次世代 X 線観測衛星への搭載が考えられている。軌道上で 100 mK 以下の極低温を実現するには断熱消磁冷凍機（ADR）が最も現実的であるが、冷却サイクル中に強い磁場を発生するため、超伝導を利用した TES カロリメータとの干渉が問題となりうる。そこで、我々は冷凍機とセンサを一体のシステムとして開発している（神谷他、2014 年夏の学校）。

高倉他（2013 年夏の学校）では、自作 ADR の超伝導マグネットに対する磁気シールドの改良により急峻な超伝導遷移特性が得られたことを報告したが、5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能は 17 eV（FWHM）にとどまり、目標性能である数 eV には達していなかった。本研究ではさらなる分光性能の向上を目指して、クライオスタットと信号読み出し回路のヘッドアンプ、その他の駆動装置、計測装置とを接続するケーブルのシールドや各装置の接地方法を見直してノイズを低減し、センサの温度制御（温度安定度）の改善に努めた。また、センサの周囲に施した超伝導体と強磁性体の二重磁気シールドの材質・組合せを変えて性能の違いを実験的に調べ、最適化を図った。その結果、エネルギー分解能は  $3.8 \pm 0.4$  eV まで向上した。本講演ではこれらの対策と結果につ

いて、詳細に報告する。

## 観測 b6 広視野望遠鏡 WIDGET-2 の撮像画像におけるフラットフレームの評価

榎本 淳一（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）

WIDGET-2 とは埼玉大学と理化学研究所で共同開発したガンマ線バースト観測のための超広視野可視光望遠鏡である。可視光観測によって得られた画像は、ダークノイズや集光ムラを補正する一次処理を行う必要がある。WIDGET-2 によって撮像されたライトフレームは、自動的にダークノイズを補正するパイプラインを通る仕組みが確立されている。しかし、フラット処理は自動化されておらず、観測者各自に任されている。WIDGET-2 では、夜空の違う場所を撮影した複数枚のフレームを合成して一枚のフラットフレームにするというスカイフラットと呼ばれる手法をとっている。しかし、WIDGET-2 の撮像フレームにおいて、最適なフラットフレームの作成方法は確立されておらず、作成時に用いるフレームの選び方や枚数などはフラットフレーム制作者に依っている。そこで、フラットフレーム作成方法の確立を目指し、複数の方法でフラットフレームを作成してその評価を行った。具体的には、用いるフレームの枚数、各フレームの時間間隔、フレーム合成方法の 3 つ要素について作成条件を変化させてフラットフレームを作成し、実際の観測で得られたライトフレームに処理を施して補正の効果を評価した。本講演では、この検証方法とその結果について報告する。

## 観測 b7 CALET ガンマ線バーストモニター (CGBM) 地上ソフトウェア開発の現状報告

瀬沼 一真（青山学院大学大学院 M1）

2014 年度打ち上げ予定、現在開発中の宇宙電子線観測装置 CALET (CALorimetric Electron Telescope) は国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟「きぼう」に設置され、5 年間を目標として観測予定である。CALET には我々吉田研究室が中心となり開発中である CALET ガンマ線バーストモニター (CGBM) の搭載が決定している。CGBM は宇宙で最も明るい爆発現象の一つであるガンマ線バーストなど、宇宙での突発現象を、X 線、ガンマ線の領域で観測するシンチレーション検出器である。

CGBM で観測したガンマ線バーストを解析するためには解析ソフトウェアが不可欠である。既存ソフトウェアを利用するためには共通のデータ形式への変換が必要となる。また既存のソフトウェアが利用できない場合は新たに解析ソフトウェアを開発しなければならない。そこで、既存のソフトウェアをできるだけ利用できるように FITS 形式に変換するソフトウェアの開発をした。また観測したライトカーブ及びスペクトルからバックグラウンドを差し引くための新たなソフトウェアの開発も行った。本発表では開発したソフトウェアの詳細と実際の観測されたデータに開発したソフトウェアを適用した結果について報告する。

1. 日本評論社 シリーズ現代の天文学 8 ブラックホールと高エネルギー現象
2. 日本評論社 シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 III 高エネルギー天文学
3. NASA CALET-Web サイト : <http://calet.phys.lsu.edu/>

## 観測 b8 Astro-H 衛星・軟ガンマ線検出器のための集積回路の最適化

木下 将臣 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M1)

Astro-H は非常に優れたエネルギー分解能と 0.3 から 600 keV での広帯域観測を可能にする JAXA の次期 X 線衛星である。搭載観測機器の一つである軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector, SGD) は、超新星残骸での粒子加速の研究、ブラックホールへの質量降着やそれにもなうジェットによるガンマ線放射機構の解明やガンマ線での偏光観測などを科学目的とする。

SGD は、BGO シンチレーターのアクティブシールドに囲まれた、多層のシリコン (Si) とテルル化カドミウム (CdTe) 半導体検出器より構成されるコンプトンカメラである。SGD では、入射光子が Si 中でコンプトン散乱を起こした後、CdTe により光電吸収される事象を検出する。その際、散乱電子と光電吸収のエネルギーと位置情報を測定し、コンプトン運動学を利用して到来方向を逆算する。こうして逆算した到来方向とアクティブシールドによって制限される視野の整合性を要求し、視野外に起源を持つバックグラウンドを除去することで、従来と比較して感度を 10 倍以上向上させる。

SGD の実現には、コンパクトなコンプトンカメラにできるだけ多くの半導体検出器を組み込み、高い検出効率を達成することが本質的である。そのためには、半導体検出器からの信号を低雑音で処理し、デジタル化などの必要な機能をすべてかねそなえた集積回路が不可欠である。SGD で使用する集積回路は、プリアンプ、波形製型回路、トリガー回路、デジタル回路など多くの機能を有し、その性能を最大限に発揮するためには、多くの回路パラメータを調整する必要がある。現在、私は集積回路の回路パラメータと雑音性能やトリガー性能の関係を測定し、エネルギー分解能とトリガー効率を最適化することで SGD の性能のさらなる向上を目指している。

本講演では、SGD が目指すサイエンス、検出器構成の概要と集積回路の最適化について紹介する。

## 観測 b9 Fermi-LAT のイベント再構成とバックグラウンド識別

高橋 光成 (東京大学宇宙線研究所 M2)

Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡の Large Area Telescope (LAT) は高エネルギーガンマ線観測の決定版のプロジェクトである。ガンマ線観測の最大の障害はガンマ線よりはるかにフラックスの大きい宇宙線バックグラウンドである。LAT では 3 つの検出器からの情報を元にイベントの特徴を示す多数のパラメータを導出し、モンテカルロシミュレーションに基づく Classification Tree にかけることでバックグラウンドを排除している。本講演ではこの解析がどのように行われているかについてレビューするとともに、今後数十 GeV から数百 GeV でのイベント数を増加させる解析法の研究について述べる。

1. W. B. Atwood et al. APJ. 697 1071 (2009)
2. L. Rochester et al. ArXiv 1001.5005. (2010)
3. M. Ackermann et al. APJ. 203 4 (2012)

## 観測 c1 市販冷却 CCD カメラ BN-52E の性能評価

倉橋 拓也 (明星大学 M1)

天体観測で幅広く使われる CCD カメラの原理・構造の理解と把握を前提として市販冷却 CCD カメラ BN-52E の性能評価を行い、研究対象の CCD カメラが測光観測等の天体観測に適しているか否かを判断する。精度の決定や観測方法に貢献することを目的として行うものであり屋内での測定を行い正確な観測データを得て CCD カメラの性能評価を理解していく。観測上重要になるのは、(1) 暗電流の時間安定性、(2) 暗電流の温度依存性、(3) CCD 画素の input level に対する output level の線形性、(4) 検出器の Read out Noise、gain の大きさである。(1) はダークフレームをどの程度の間隔で取得すべきか重要な情報であり、(2) は CCD 素子の冷却温度を決める際に重要な情報であり、(3) は適正な露出時間や予想される入射光子数に対する検出される光子数の線形からのずれ、(4) 観測によって得られたデータの精度の際に重要な情報である。これらはメーカーカタログ等に記載がないので独自の室内実験で確かめ、ダークフレーム・バイアスフレームの安定性、暗電流、リニアリティ、読み出しノイズがどの程度の安定性を持つかを発表する。当大学には CCD カメラ等の観測機器についての先行研究が少ないため冷却 CCD カメラの基礎実験の現在と今後について議論したい。

1. K. Matsuda, S. Narusawa and H. Naito Nishi-Harima Astron. Obs. 17, 1624 (2007)

## 観測 c2 OCTAVE システムを用いた SiO メーザー広帯域 VLBI 観測の技術開発

桑原 翔 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 チリ観測所 M1)

SiO メーザーは漸近巨星分枝 (AGB) 星等の星周外層から生じる誘導放射であるがその励起機構はいまだ理解がされていない。今回、我々はこの励起機構の解明のために広帯域での VLBI 観測を行い、同時刻における複数の振動レベルの SiO メーザーの分布を明らかにしようとした。この観測では新しい記録装置を用いたので、位相残差補正を行うために新たに補正用スクリプトを開発した。また、野辺山 45m 電波望遠鏡 (NRO45) を広帯域観測で使用するために、私は NRO45 の GPS 測位を行って局位置誤差を改善し、更にアンテナ変形による遅延残差補正のスクリプトを開発して位相残差補正を行った。

この結果、SiO メーザーの異種 3 輝線を同時に撮像することに成功し、29SiO  $v=0(J=1-0)$  メーザー輝線を撮像することに成功した。更に、29SiO  $v=0(J=1-0)$ 、SiO  $v=3(J=1-0)$  共にメーザー輝線の他の輝線に対する相対位置については先行研究 (Soria-Ruiz et al., 2005 ; Imai et al., 2010) の結果にほぼ一致した。

1. Soria-Ruiz et al., 2005 A&A,432, L39L42
2. Imai et al., 2010,PASJ,62,431439

## 観測 c3 FFAST が切り開くサイエンス

今谷 律子 (大阪大学 常深研究室 (X 線天文グループ) M1)

FFAST 衛星の概要

FFAST(Formation Flying Astronomical Survey Telescope) プロジェクトは、2機の小型衛星にそれぞれスーパーミラーとSD-CCDを搭載し、編隊飛行(Formation Flight)技術を利用し、低高度地球周回衛星で軌道望遠鏡を成立、前例のない高エネルギー領域を広範囲で観測する計画である。理学的には10~80KeV領域で広領域にわたり隠されたブラックホールの発見を始めとする精密な観測に挑戦、工学的には世界で初めて編隊飛行によるX線望遠鏡システムを実現し、FF技術を実証する計画である。

#### 理学的な目的と価値

これまでの研究から超巨大質量ブラックホールSMBHと銀河の共進化が示唆されている。SMBH形成のプロセスが質量降着か銀河同士の合体かという謎を解くことは、銀河進化を理解する上で不可欠である。そのための観測ターゲットが活動銀河核AGNである。物質がSMBHに落ち込む際に解放する重力エネルギーによって明るく輝くAGNは、まさにBHの成長の現場である。ガスや塵に深く埋もれたAGNを観測するには、ガス等の吸収に関わりなくAGN光度を純粋に反映する硬X線領域が求められる。この領域の高感度観測には長焦点距離の望遠鏡が必要となる。これを1基の衛星で実現するには重量の増大、支持構体の柔軟性に起因する高精度制御の困難さに直面する。またBHは急成長し、埋もれたAGNの周りのガス等が噴れて吸収の少ないクエーサーになる。その数少ない高光度星を見つけるため、広範囲の観測が求められる。これらを解決するのが、FF技術を応用したFFASTである。

#### 工学的な目的と価値

FF技術は衛星サイズの物理的な制約を打破する画期的な技術である。これを観測衛星に応用し走査観測と集中的観測を行うことで、FFによる長焦点距離のX線望遠鏡の軌道上実証に加えて将来の最先端ミッションに必要な技術の実証を目指す。

### 観測 c4 宇宙観測用アバランシェフォトダイオードのシングルイベント効果のシミュレーション研究

荻田 竜平(横浜国立大学 M2)

最近の高エネルギー宇宙放射線の直接観測においては、結晶シンチレータなどを用いたカロリメータが多くの実験で使用されている。そのシンチレーション光の読み出し用光センサーとして、高いゲインをもつリバース型APD(アバランシェフォトダイオード)の開発研究が行われ使用されている。リバース型APDは荷電粒子に対しても反応し、SET(シングルイベント過渡)現象と呼ばれる現象を引き起こすことがある。これはシンチレーション光測定においてはノイズとなりうる。更に生成された電荷はデバイス内をドリフト運動し、過渡の電流増幅や、構造の破壊による故障の原因となる。これらにより、高エネルギー放射線環境である宇宙空間での、数年にわたる長期的な宇宙線観測においては、測定結果の誤差や放射線劣化によるノイズ増加など様々な悪影響が予想される。我々は荷電粒子が直接APDに入射した際の挙動を重イオン照射実験と数値シミュレーションから明らかにする研究を行っている。ビーム照射実験や電気特性測定を忠実に再現する数値モデルによる計算ができれば、装置打ち上げ後に検証が難しいさまざまな現象についても詳細な調査が可能となる。これまでにエネルギー6MeVと15MeVの炭素原子の照射実験を行いバイアス電圧とゲイン変化のSETによる影響等を調査した。重イオンエネルギーの差異は飛程として現れ、飛程の違いが増幅過程へ影響していることが分かった。この現象を更に詳しく調べるため、半導体デバイスシミュレーター(Synopsys社製TCAD)を用いて、APD内部の不純物密度構造の調査と共に数値計

算による加速器実験の検証を行っている。本発表ではこれまでに行った実験と数値計算結果の現状を報告する。

1. Quenching of impact ionization in heavy-ion induced electron-hole pair plasma tracks in wide bandwidth avalanche photodiodes

### 観測 c5 結晶反射鏡のモザイク化による積分反射率の向上

泉谷 喬則(中央大学 天体物理学(坪井)研究室 M2)

天体からやってくるX線から得られる情報のうち時間変動、スペクトル、イメージは盛んに観測が行われているが偏光X線観測はその検出器の開発の難しさから遅れており、新規開拓分野である。

我々は新しいX線偏光計開発のために高い偏光検出能力を期待できるブラッグ反射の原理に着目し、X線天文学で重要とされる鉄輝線を捉えるための反射鏡の素材にSi100を採用した。また、ブラッグ反射には反射できるエネルギーが狭いという欠点があったが、反射鏡を湾曲させることで反射できるエネルギーに幅をもたせることに成功した。

我々はさらなる反射鏡の高性能化を目指すために、湾曲結晶をモザイク化することを考えた。モザイク化した結晶は積分反射率が上がることが知られているからである。まず我々は第一段階として平らな結晶においてモザイク化を施し、その処理による表面形状の変化と積分反射率との間に関係を見いだした。本発表では、この関係について定量的に報告する。

### 観測 c6 100 GHz 帯超伝導ミクサの広帯域化に向けた開発

上月 雄人(大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

星間分子輝線の電波領域での分光観測は、ヘテロダイン受信機を搭載した電波望遠鏡によって行われる。電波望遠鏡の同時観測可能な周波数帯域が増大すると、複数の輝線を観測するために観測帯域をずらす操作が不要となるので、観測の効率が向上する。CO( $J=1-0$ )など多くの星間分子輝線の存在する100GHz帯では、受信機広帯域化への要請は極めて強かった。私は電波望遠鏡の観測帯域の広帯域化のために、広帯域デジタル分光計システムの開発および100GHz帯広帯域SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)ミクサの開発に取り組んでいる。

分光計の帯域を超える周波数帯を観測するには、受信信号をより低い周波数(数GHz程度)にダウンコンバートするミクサが必要となる。ミリ波・サブミリ波帯では低雑音(量子限界の数倍程度)なSISミクサが、ALMAなどの受信機にも広く用いられている。SIS素子は二つの超伝導体を1nm程度の絶縁層で隔てたサンドイッチ状の構造をしている。このSIS接合の持つ強い非線形性がミクサとして利用されている。従来のSISミクサのIF帯域は4-8GHzが主流であったが、近年では4-12GHzへの広帯域化が盛んに行われている。

現在私はRF帯80-120GHz、IF帯4-12GHzの広帯域・低雑音SISミクサの開発を行っている。新ミクサの開発では、導波管回路・平面回路での電磁界解析とSISの変換特性の計算をもとに、インピーダンス変換回路の不連続点の考慮や、SIS素子上のIF取り出し回路を設ける等の検討を行っている。本講演では新SIS素子の開発の現状について報告す



る。

## 観測 c7 鹿児島大学 1 m 光赤外線望遠鏡への減光フィルターの導入

井上 幹一朗 (鹿児島大学 M1)

鹿児島大学 1 m 光赤外線望遠鏡では VERA と連携してミラ型星の周期光度関係の高精度化を目指している。しかし、そのために観測しているレーザー源は近赤外 K バンドで 0.4 等と非常に明るい星である。しかし現在の赤外線天体観測ではとても明るい星は検出器がサチレーションを起こすため観測ができない。そこで、サチレーションを起こさないような観測手法として減光フィルターを導入した観測を検討している。

従来、鹿児島大学 1 m 光赤外線望遠鏡ではサチレーションを回避する方法として、星像をわざとぼかすデフォーカスという方法で観測を行ってきた。しかし、この方法ではサチレーションは回避できるが、同じ視野内の参照星も暗くしてしまい相対測光ができなくなることがある。その場合には別の領域の測光標準星を用いて等級の校正を行う必要があるが、この方法は天候に左右されるため、十分な精度が得られる日が限られる。また、デフォーカスをするとき星像が大きくなるため、星が混み合っている領域では星像が重なり合ってしまう。

デフォーカスをせずに明るい星を観測するための手段として、全面減光フィルターを使いサチレーションを回避させることで精度向上を見込んで試験観測を行った。しかし、視野全体を減光するため、目的星がサチレーションを起こさないような減光を施すと、多くの参照星が写らなくなってしまう、デフォーカスと同等の問題が発生した。

そこで、部分減光フィルター (視野の一部だけ減光するフィルター) を使うことを検討している。目的星のみ減光することでサチレーションを回避し、それ以外の大半の視野は一切減光されず、全面減光フィルターのように参照星を暗くしないので相対測光が可能になる。現在までに部分減光フィルターを取り付ける準備が完了している。今後、実際に部分減光フィルターを使った試験観測を行い、性能評価を行う。

## 観測 c8 「あかり」近赤外グリズム分光観測の二次光を考慮したフラックス較正

馬場 俊介 (宇宙科学研究所 M2)

赤外線天文衛星「あかり」に搭載された Infrared Camera (IRC) の近赤外チャンネルは、ゲルマニウム製のグリズムを用いた分光観測機能を持つ。観測可能な波長範囲は 2.5–5.0  $\mu\text{m}$  で、波長分解能は 3.6  $\mu\text{m}$  において  $\lambda/\delta\lambda \sim 120$  である (Ohyama et al. 2007)。

このグリズム分光観測のフラックス較正は、K 型星などの青いスペクトルをもつ標準星から求めたレスポンス曲線で行われていた。しかし、赤いスペクトルをもつ天体の観測データを解析する場合、レスポンスを介して求めたフラックスが波長 4.9  $\mu\text{m}$  以上で急激に減少する不自然な結果になると分かった。この現象は、長波長側の一次光に短波長側の二次光が混入しており、赤いスペクトルでは標準星に比べ二次光の混入が少ないため、フラックスを過小評価していると考えられる。そこで我々は、二次光の混入を考慮した新たなフラックス較正を行った。

二次光の寄与を加味して一次光と二次光のレスポンスを求めめるため、一般的な標準星に加え、滑らかで輝線や吸収の少ない赤いスペクトルをもつ活動銀河核を標準天体として利用した。ここで用いた活動銀河核のスペクトルは、2MASS (Two Micron All-Sky Survey)、WISE、Spitzer の観測結果から推測した。二次光の波長と入射するピクセルの関係を、グリズムの設計とゲルマニウムの屈折率から計算した。各ピクセルで受

かるカウント数は、フラックスとレスポンスの積を、一次光と二次光について足し合わせたものと考えられる。標準星と活動銀河核の 2 種類の観測結果から連立方程式を立てることで、一次光と二次光の 2 つのレスポンス曲線を同時に求めた。本講演では、この手法で得られた新たなレスポンス曲線と、それらを用いたフラックス較正について報告する。

1. Ohyama, Y., Onaka, T., Matsuhara, H., et al. 2007, PASJ, 59, 411

## 観測 c9 多天体補償光学系試験装置 RAVEN のすばる望遠鏡での観測における大気揺らぎ成分の解析

山崎 公大 (東北大学天文学専攻 M1)

多天体補償光学とは回折限界に迫るような星像を望遠鏡の広い視野にわたって得ることを可能にする技術であり、将来的に建設が予定されている TMT にもその概念を取り入れた装置の導入が提案されている。しかし実際にこの概念を適応するには、開ループ波面補償制御やキャリブレーションなどの技術的な課題が多く残されている。このような多天体補償光学の実証実験を実際の望遠鏡での観測を通して行うことを目的としてビクトリア大学のチームを主として開発された装置が RAVEN である。RAVEN には全部で 6 個のシャックハルトマン型波面センサーがあり、それぞれが開口部面上の異なる方向の波面揺らぎを測定している。これはトモグラフィの手法で波面補償を行うことを可能にするための設計である。また RAVEN は日本の国立天文台の協力の下、すばる望遠鏡の近赤外ナスマス架台に装着することを想定し多天体補償光学系の実証実験及び科学的対象のデータを取得することを目的として開発が進められ、今年 5 月には最初の on-sky データを取得するに至った。今回紹介するのは RAVEN で測定された実際の大气揺らぎの成分の解析である。例えば波面の Tip-tilt 成分の時間変動を解析した結果、いくつかの周期的な振動成分が存在していることが判明した。このような振動は大气由来のものではなく望遠鏡や装置自身の振動が反映されていると考えられ、そのうちのいくつかは補償光学系作動時に得られる星像に影響を及ぼす成分であることも確認された。今後は、望遠鏡による影響の検出のみならず、大気揺らぎの性質やその変動の時間スケールについて詳しい評価を行うことを目的としてより高次の成分の時間変動についても解析を進める。

1. Raven, a Multi-Object Adaptive Optics technology and science demonstrator

## 観測 c10 次世代ガンマ線望遠鏡 CTA における大口径望遠鏡の分割鏡の形状測定

長 紀仁 (茨城大学理工学研究科理学専攻物理学系 M1)

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、大・中・小と口径が異なる 3 タイプのチェレンコフ望遠鏡群を用いて、これまでになく高感度で 20 GeV から 100 TeV 以上に渡る広エネルギー帯において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 8 台建設される予定である。この望遠鏡の 23 m の口径を実現するために、1 台あたり六角形の対辺が 1.51 m の分割鏡を約 200 枚



も使用する。この大口径望遠鏡開発に伴い、大量の大型分割鏡の形状を高精度かつ効率よく評価することが必要不可欠であり、現在この評価方法として Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法という方法を採用している。PMD 法とはドイツのエアランゲン大学で開発された 3 次元形状測定方法で、液晶スクリーンを使い対象の鏡面に位相模様を映し、正反射によって生じた像の鏡面形状による変形を 4 台の CCD カメラでステレオ撮影した画像を解析することにより、鏡面形状、法線を測定する方法である。これまでグループでは、PMD 法で得られた鏡面情報から光線追跡シミュレーションを行い、スポットサイズや焦点距離の評価を行ってきた。

本講演では、直径 0.3 m の試験鏡を用いて、非接触 3 次元形状測定装置による測定と PMD 法の測定の比較を試みたので、その結果について報告する。また、新しい分割鏡の 2f 法による測定で得られた画像データについても解析を行う予定で、その結果についても報告する予定である。今後は、非接触 3 次元形状測定装置による測定や 2f 法によって得られたデータを解析する方法を確立し、PMD 法の結果と比較し精度を評価することを目指す。

1. 馬場浩則, 2013 年度, 茨城大学修士学位論文

## 観測 c11 京大岡山 3.8m 望遠鏡計画：副鏡計測技術の開発

江見 直人 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

京大岡山 3.8m 望遠鏡計画は京都大学、名古屋大学、国立天文台および (株) ナノオプトクスエナジーの共同により、国立天文台岡山天体物理観測所隣接地に分割鏡による光赤外望遠鏡を建設するものである。本講演では望遠鏡製作において重要な要素となる副鏡計測技術の開発状況について説明する。本望遠鏡の副鏡は  $\phi$  1066 m の非球面の凸面鏡で、表面精度は構造関数に従うと最低でも  $\text{RMS } \leq 100 \text{ nm}$  が必要である。そのため計測技術の仕様としては、まず非球面の凸面が計測可能であること、そして測定精度が  $\text{RMS } \leq 50 \text{ nm}$  であることが求められる。開発中の計測技術は、変位計を 3 軸ステージで機械的に走査させ、得られる点情報から面形状を生成することを原理とする。従来この機械的な計測方法は超精密な運動を実現できる特別な機械が必要だったが、我々が開発した「引きずり逐次 3 点法」を使えば、精密な機械運動なしで計測することができる。このシステムで実際に平面上の同じ直線パスを繰り返し測定した時の出力値の再現性は、RMS で 0.2 nm という実験結果を得た。さらに得られた点群情報を面形状に生成するためのデータステッチング方法も新しく開発し、1 m の平面を本研究の方法で測定したときに推定される測定精度をシミュレーションしたところ、全面で 13.6 nm という結果となった。