

2020 年度 第 50 回 天文・天体物理 若手夏の学校
観測機器分科会 アブストラクト

武田 伸一郎 (東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構特任助教)

8月24日 13:15-14:15 room 2

装置開発ライフを楽しむ

自分達の手で装置を作り上げることは、大変な苦勞を伴いますが、新しいデータを初めて手にするとき、いつも新鮮な驚きに出会うことができます。硬 X 線・ガンマ線のイメージング技術を発展させ、未知の現象に測定メスを入れることが、私の研究のモットーです。これまで、多くの仲間と共に、宇宙高エネルギー天体用の高感度ガンマ線観測装置の開発、原発事故で飛散した放射性セシウムの可視化実証実験などに取り組んできました。そして、今、生体内のがんの複雑性に、硬 X 線・ガンマ線のイメージングの力によって挑んでいます。

観測 1 新型大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線の観測

寺内 健太 (京都大学 理学研究科物理学専攻 M1)

極高エネルギー宇宙線は地上最大の粒子加速器で到達可能なエネルギーより 7 桁以上も大きいエネルギーを持つ、宇宙で最もエネルギーの高い粒子である。その起源・加速機構を研究することは宇宙の爆発的な極高天体現象の解明へと繋がるのが期待される。検出原理としては、地球大気に入射した極高エネルギー宇宙線が大気中で発する紫外線蛍光発光を地上に設置した光学系で集光し、焦点面にある光電子増倍管で撮像する大気蛍光法が使用されている。しかし極高エネルギー宇宙線の到来頻度は極端に少なく、年間 100 平方 km あたりにわずか 1 粒子しか到来しない。そのため極高エネルギー宇宙線の起源・加速機構を明らかにするためには年間観測事象数を格段に増やす必要がある。Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST) 実験は、極高エネルギー宇宙線への感度を飛躍的に高め、さらに極高エネルギー領域の中性粒子の初検出を目指した次世代の宇宙線観測実験である。FAST 実験では、直径 1.6 m の小型光学系と 4 本の口径 20 cm の光電子増倍管から成る、30 度× 30 度の視野角を持つ低コスト型の新型大気蛍光望遠鏡を 20 km 間隔でアレイ状に展開し、現状よりも一桁多い極高エネルギー宇宙線の年間観測事象数を実現する。FAST 実験の開発研究として、これまでに米国ユタ州のテレスコープアレイ観測サイトに新型大気蛍光望遠鏡を 3 基、アルゼンチン・メンドーサのピエールオージェ観測所に 1 基設置し、日本からの遠隔操作により定常観測を続けている。現在ピエールオージェ観測所に 2 基目の建設へ向けた準備が進行中で、自立稼働に向け高速波形収集回路を新たに開発している。本講演では、極高エネルギー宇宙線の観測の現状と両サイトでの新型大気蛍光望遠鏡の観測状況及び開発中の高速波形収集回路について報告する。

観測 2 ALPAQUITA 実験による南天の最高エネルギーガンマ線天文学の開拓

加藤 勢 (東京大学 理学系研究科 D1)

100TeV 以上の超高エネルギーガンマ線の観測は、ハドロン宇宙線スペクトルの knee 領域の加速源: PeVatron の正体を探る上で不可欠である。2019 年、北半球の Tibet 実験及び HAWC 実験による、カニ星雲からの 100TeV 超のガンマ線観測をもって、超高エネルギーガンマ線天文学の扉が開かれた。しかし、北天では高エネルギーガンマ線天体の数は限られており、またハドロン宇宙線由来のガンマ線に関する確定的な観測結果も存在しない。

一方南天では、H.E.S.S. 実験等により、銀河中心領域をはじめとして、多数の PeVatron 候補が報告されている。南天に

は sub-PeV ガンマ線に感度を持つ実験が存在しないため、超高エネルギーガンマ線天文学が未開拓であり、新たな実験の登場が待たれている状況である。

このような状況の中、南天の宇宙線物理学、及びガンマ線天文学の開拓を目指し、国際共同実験: ALPACA 実験の建設が、ボリビアにおいて行われている。ALPACA 実験は空気シャワーアレイ実験であり、大面積、広視野・連続観測が可能、及び高いバックグラウンド除去率を持つなど、統計数の少ない sub-PeV 領域の観測において大きな利点を持つ。またプロトタイプ実験として、ALPACA 実験の 4 分の 1 程度の大きさを持った ALPAQUITA 実験が、近く観測を開始する予定である。

本研究では、ALPAQUITA 実験の、天体からのガンマ線への感度の向上を目指して、Monte Carlo シミュレーションを用いた、一次ガンマ線の再構成アルゴリズムの最適化を行なった。また、最終的なガンマ線への感度を求め、南天のガンマ線天体に対する、一年観測による sub-PeV ガンマ線の検出可能性を評価した。本講演では、これらの結果について発表を行う。

観測 3 C T A 大口径望遠鏡に用いる光電子増倍管の性能評価

佐々木 寅旭 (埼玉大学 理工学研究科物理機能系専攻 M1)

宇宙線は $10^9 \sim 10^{20}$ eV と幅広いエネルギーに渡るが高エネルギー宇宙線が放射するガンマ線の観測により未解明の加速源についての情報を得る。VHE ガンマ線は地球大気と相互作用して電子・陽電子対生成を起こし大気シャワーを形成する。このシャワー中の電子・陽電子が空気中の光速を超えるとチェレンコフ光を放射する。地上望遠鏡でのチェレンコフ光の観測が GeV、TeV 帯域では有用である。

Cherenkov Telescope Array (CTA) は、20 GeV~300 TeV のガンマ線を従来の望遠鏡よりも 10 倍の感度で観測することを目標としている。本計画では南天北天の 2 サイトに異なるエネルギー帯域に感度を持つ大中小の 3 つの望遠鏡を設置する。日本チームは低エネルギー側 (20 GeV~3 TeV) に感度を持つ大口径望遠鏡 (Large Sized Telescope ; LST) の開発に貢献しており、2018 年 10 月にスペイン領ラパルマ島に LST の初号機が稼働し観測を開始している。LST の焦点面検出器には 1855 本の光電子増倍管 (Photomultiplier Tube ; PMT) が用いられる。300 MHz の夜光ノイズの重複によるトリガーを防ぎかつ電荷積分の幅を狭め SN 比向上のため PMT 出力信号の幅は平均 3.0 ns (FWHM) 以下に抑えることが要求される。また最低エネルギーの閾値を 20 GeV まで引き下げるため、複数の PMT 信号を足し合わせて 1 つの信号にするアナログサムトリガー方式を採用している。正確な PMT 信号足し合わせのために PMT の電子走行時間のばらつき (Transit Time Spread ; T.T.S.) は重要である。運用時 PMT にはチェレンコフ光を集光するライトガイドが装着されるが LST2-4 号機用 PMT についてはライ

トガイド付きでは上述の項目は未測定である。PMT の電子走行時間は光子入射位置によって変化するためライトガイド装着により、光子の入射経路が変化し出力信号の幅や T.T.S. に影響することが分かった。今回これらの物理量を PMT に照射する光量を変化させることで測定し出力信号の幅は全ての印加電圧で 3.0 ns(FWHM) 以下、T.T.S. は印加電圧により標準偏差で 0.45--0.70 ns 程度となることが分かった (2020/6/26 現在の結果)。本発表では詳しい測定方法及び結果を発表する。

観測 4 IACT における Gamma hadron separation について

バクスター ジョシュア稜 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

ガンマ線を観測することで、高エネルギー天体における粒子加速、宇宙線起源、巨大ブラックホールと相対論的ジェットの関係など多様な宇宙現象の解明が有望視されている。現代では宇宙から到来した GeV-TeV ガンマ線を観測する手法として主に (1) 衛星による直接観測 (2) 地上型望遠鏡や空気シャワーアレイなどによる間接観測が用いられている。Fermi-LAT は GeV ガンマ線帯を高感度で観測できる代表的衛星であるが、有効面積が小さく高エネルギー側での光子統計量の不足が課題である。反対に地上型の解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) である MAGIC では 100 GeV 以下のエネルギー帯域の感度が不十分である。そこで (1) と (2) の課題を同時に解決するのが現在建設中の次世代 IACT の Cherenkov Telescope Array (CTA) である。CTA は Fermi 衛星の 10000 倍以上の有効面積を持ち、その感度は MAGIC の 10 倍、そしてエネルギー領域は 20 GeV から 100 TeV である。

到来したガンマ線は大気と相互作用を起こし、粒子カスケード (空気シャワー) を形成する。IACT はカスケード中の荷電粒子によって放出されたチェレンコフ光を観測することで、ガンマ線のエネルギーと到来方向の決定を行う望遠鏡である。ハドロンで構成された宇宙線もガンマ線と同様に大気中でチェレンコフ光を放出し、背景雑音となる。しかしこれら 2 つのシャワーは幾何学的構造に着目することで弁別が可能である。本発表では、空気シャワーモデルの検証の為に LHC forward (LHCf) 実験や RHIC forward (RHICf) 実験といった加速器実験でのデータがどのように用いられているのかについて定量的な言及を行った上で、背景雑音の除去方法として IACT で現状用いられている解析手法のレビューを行う。

観測 5 超小型衛星 SONGS 搭載太陽中性子・ガンマ線検出器の積層プラスチックシンチレータ部の性能評価

宇佐見 雅己 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

本研究の目的は超小型衛星を用いて太陽中性子観測分野を開拓し、宇宙と地球の連携により太陽におけるイオンの加速機構に迫ることである。宇宙には超新星爆発、巨大ブラックホール近傍など様々な粒子加速源があることが知られており、地球に最も近い恒星である太陽でも、太陽フレアに伴ってイオンの加速が起きることが知られている。しかしながら、多くの波長帯で観測されている太陽でさえ、その加速機構はよくわかっていない。宇宙空間で太陽中性子観測を行うことにより、エネルギースペクトルを観測し、太陽フレアによるイオンの加速機構を解明する。そのために太陽中性子観測用の超小型衛星を打ち上げるべく、検出器である積層プラスチックシンチレータの性能評価を行う。今回搭載予定の太陽中性子検出器はプラスチックシンチレータの角棒を層状にして弾性散乱による反跳陽子の飛跡を捉え、同時にコンプトン散乱を利用してガンマ線を検出する原理である。中性子は太陽から来ていると仮定し、検出器で得られた反跳角とエネルギー損失からその入射エネルギーを決定する。プラスチックシンチレータの両側に光検出器として SiPM を用いることにより、軽量化を実現しつつ、両側での光量の比から飛跡の位置を特定する。4 mm × 4 mm × 64 mm の一本のプラスチックシンチレータバーについて表面状態を擦りガラス状にし、反射材としてアルミ蒸着マイラを巻いたものを衛星搭載予定の集積回路 (ASIC) を用いて評価し、60 keV 起源のガンマ線の信号を検出した。また、放射線源として Cs137 を用い、プラスチックシンチレータバーの両側読み出しによる位置依存性について評価し、線源の位置を変更しながら読み出しを行うことにより、4 mm の精度で位置決定精度を算出した。

本講演では、プラスチックシンチレータバーの両側読み出しによる位置依存性やスペクトルの確認、複数本のプラスチックシンチレータバーで実験を行った際の性能評価の結果について報告する。

観測 6 集積回路 ASIC を用いた超小型衛星搭載用太陽中性子・ガンマ線検出器の性能評価

野橋 大輝 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M2)

宇宙線の発生源の中で最も地球に近い天体として太陽が挙げられ、これまでにフレアによる粒子加速機構の解明のために太陽中性子を対象とした観測が地上の中性子モニターで行われてきた。中性子は太陽磁場や太陽地球間の惑星空間磁場に影響せず生成時の情報をほとんど保持した状態で観測することができるが、地球大気中で相互作用し減衰してしまうため地上での検出

は困難であり、これまでの検出数は限られている。そこで我々の研究グループでは宇宙空間からの太陽中性子観測を行うための超小型衛星搭載用中性子 \backslash UTF{00B7}ガンマ線検出器の開発を行っている。

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

観測 7 銀河系内外拡散 MeV ガンマ線観測のための高角度分解能化を目指した SMILE-3 計画

吉田 有良 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

数百 keV から数十 MeV にかけての MeV ガンマ線領域では、様々なサイエンスが期待できる。例えば、超新星爆発によって合成された放射性同位体や励起状態の原子核からは原子核の大きさ程度の波長を持つ MeV の領域でラインガンマ線が放射するため、これを観測すれば超新星爆発時における元素合成の過程を直接知ることができる。しかし MeV ガンマ線のエネルギー帯域ではコンプトン散乱優位となること、宇宙線が観測器と相互作用することによって生じた雑音が多いことが原因で観測が難しく、進んでいない。MeV ガンマ線天文学は光子による天文学の中で最も未開拓と言える。

この状況を打破するために、我々は SMILE 計画として電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) の開発を進めてきた。ETCC は、散乱ガンマ線を検出するシンチレーション検出器と、反跳電子を検出するガス検出器から構成される。ETCC は入射ガンマ線のコンプトン散乱における散乱点と散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点、電子の反跳方向と運動エネルギーを測定するので 1 事象毎に入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を一意に再構成できる。そのため疑似信号が少なく、宇宙線等が観測器と相互作用して生成する雑音ガンマ線は到来方向により除去可能となるので、SN 比が良く広視野であることが特徴である。実際、SMILE-2+ 計画ではかに星雲を 3σ で、銀

河中心領域の 511 keV 付近の事象を 5σ で検出し、気球高度での ETCC の天体観測能力を実証した。

次期計画である SMILE-3 では、銀河系内外拡散ガンマ線や、銀河中心領域の電子陽電子対消滅線の分布の観測を目的としている。そのためには PSF5 度の角度分解能と観測可能なエネルギー帯域は $200\text{ keV} \sim 5\text{ MeV}$ が求められる。本発表では SMILE-3 で期待される観測と、ETCC の開発状況を報告する。

観測 9 太陽アクシオン探査に特化した超伝導遷移端型 X 線マイクロカロリメータの開発

八木 雄大 (東京大学 JAXA/宇宙科学研究所 理学系研究科物理学専攻 M2)

宇宙物質の 85% を占める正体不明の「暗黒物質」を検出するため、世界中で研究開発が行われている。とくに理論上の粒子「アクシオン」は最有力候補のひとつであり注目が集まっている。2020 年 6 月には暗黒物質探索実験 XENON1T により、太陽アクシオンの兆候らしき超過事象を観測したことが発表されたが、精度が不十分でアクシオンの存在を結論付けることはできていない。

アクシオンは素粒子標準模型の枠組みを超える未知の素粒子であり、素粒子物理や宇宙物理において存在が期待されているものの、膨大な質量範囲の探索が必要であり、検出を困難にしている。ところが、太陽内部で生成された「太陽アクシオン」は、 57Fe と共鳴し光子に変換し、 14.4 keV の輝線を出すことが提唱され (Moriyama+95)、探査すべきエネルギー範囲が明確である。そこで我々は 14.4 keV の X 線帯域に高い感度をもち、輝線測定に強みをもつ「超伝導遷移端型 (Transition Edge Sensor; TES) X 線マイクロカロリメータ」の開発を進め、太陽アクシオン検出を目指している。

TES カロリメータは極低温下で、高いエネルギー分解能を誇る最新の X 線熱検出器であり、半導体検出器に比べ 60 倍以上高い感度で観測ができる。吸収体に 57Fe を用い、 14.4 keV の太陽アクシオンを共鳴させることで光子に変換する。この光子のエネルギーを吸収体で熱に変え、熱の微小な温度上昇を超伝導遷移端における急激な抵抗変化として測定することで高感度を実現する。しかし、強磁性体である 57Fe のつくる磁場は、TES の超伝導特性や分高性能を劣化させてしまう。そこで、磁場の影響を低減するために吸収体 57Fe と TES を離して横置きにする新構造を考案し、磁気と熱伝導性をシミュレーションすることで、構造の最適化を行ってきた。本講演では、シミュレーションをもとに試作した新構造の TES カロリメータの物性評価および X 線パルス取得試験の結果と、今後の観測計画について報告する。

観測 10 TES 型マイクロカロリメータにおけるインピーダンス測定

田中 圭太 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

NASA の WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) による宇宙マイクロ波背景放射の観測から、宇宙の物質のほとんどが暗黒物質であることがわかっている。宇宙の約 5% を構成しているバリオンでさえ、その半分は観測されておらず、未検出のバリオンはダークバリオンと呼ばれている。暗黒物質の有効な候補としては、未知の粒子アクシオンが挙げられており、ダークバリオンは宇宙流体シミュレーション (Renyue+1999, 2006) から、銀河団同士をフィラメント状にたぐ 10 万-100 万程度程度のガスとなって分布していることが示唆されている。

我々の研究室ではダークバリオンやアクシオンの探査、さらには地球近傍の地球外物質分析のために、高いエネルギー分解能を持つ TES (超伝導遷移端) 型マイクロカロリメータアレイの開発を行ってきた。TES 型マイクロカロリメータは、光子のエネルギーを吸収体で熱に変換し、温度上昇を超伝導-常伝導遷移端における抵抗値の急激な変化として捉えることで、高いエネルギー分解能を達成している。TES 型カロリメータで高い分光性能を達成するには、TES 型カロリメータ自身の構造や、それに起因するノイズを正しく評価し、改善していく必要がある。詳細に TES の内部状態を知る方法として、Lindeman+ (2004) によって提唱されたインピーダンス測定がある。インピーダンス測定は TES に交流バイアスを印加することで測定が可能であり、熱・電氣的なモデルとその結果を比較することで、温度感度 α 、電流感度 β 、熱容量 C などを詳細に求めることができる。この結果から、構造の最適化やノイズの原因を探ることが可能となり、設計や製作にフィードバックすることで、より性能の高い TES 型マイクロカロリメータの開発が期待される。加えて、宇宙マイクロ波背景放射偏光観測衛星 LiteBIRD に搭載予定である TES ボロメータの性能評価への応用も期待される。本発表は、TES 型マイクロカロリメータにおけるインピーダンス測定について概説する。

観測 11 超伝導量子干渉計を用いた断熱消磁冷凍機下での X 線検出機読み出し環境の構築

小林 紘之 (埼玉大学 理工学研究科物理機能専攻物理学コース M1)

X 線マイクロカロリメータは従来の X 線 CCD に比べ優れたエネルギー分解能を持ち、また非分散型検出器のため広がった天体に対してもこの分解能は劣化しない。X 線マイクロカロリメータを用いたひとみ衛星での観測はペルセウス銀河団の高温プラズマのスペクトル観測によるプラズマの視線速度や含有イオン存在比などのこれまでにない精度での測定で優れた成

果を残している。

入射光子のエネルギーを素子の温度上昇として測定する X 線マイクロカロリメータを高い分解能 ($E/\Delta E \geq 1000$) で動作させるには、 ~ 100 mK の極低温環境が必要である。我々は安定したマイクロカロリメータ動作のため、パルスチューブ冷凍機と自作した断熱消磁冷凍機を併用してこの冷却環境の構築を進めているが、依然として目標としているマイクロカロリメータ駆動温度を保持することはできていない。

またセンサー素子として、超伝導遷移端での抵抗変化から温度変化を読む TES 型マイクロカロリメータの使用を目指しており、その信号の読み出しには超伝導量子干渉計 (SQUID) を用いている。この SQUID の不安定なグラウンド環境に起因する外部ノイズが大きく、内部のジョンソンノイズなどよりも測定に影響を与える可能性が高い。150 mK に置かれたマイクロカロリメータで入射 X 線に Mn K α 線を仮定した場合の入射エネルギー 5.9 keV を受けた際に、分解能 100 eV を達成することを考えると、現状のノイズ (おおよそ 10^{-2} Hz で 10^{-8} A/(Hz $^{1/2}$)、 10^{-4} Hz で 10^{-10} A/(Hz $^{1/2}$)) を 1 - 2 桁落とす必要がある。

本研究ではまず現在の冷却試験データからの熱流入の概算、及び考えられる熱損失要因を踏まえた冷却性能の見積もりを行った。またグラウンド環境の改善としてポンプとの電氣的遮断、新たに設置した金属板をグラウンドとした信号系ノイズの安定化を試み、その前後での SQUID の読み出しノイズの測定を行った。冷却性能の見積もりでは熱損失原因を考慮しきれず現在の環境を再現できなかった。SQUID のノイズレベルは全ての周波数帯で 10^{-10} A/(Hz $^{1/2}$) 以下程度まで低減することができたが、複数回の測定試験でのデータの再現性がないため、より安定したグラウンド整備が必要であると考えられる。

観測 12 X 線マイクロカロリメータ用断熱消磁冷凍機の常磁性体カプセルの開発

加藤 颯 (埼玉大学 理工学研究科物理機能系専攻 M1)

我々は次世代の X 線天文衛星搭載に向けた X 線分光器 X 線マイクロカロリメータの開発を行っている。X 線マイクロカロリメータは、入射した光子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、高いエネルギー分解能を持つ。さらに、広がった天体にも性能が劣化しないことから、銀河団などの観測においても威力を発揮することが期待される。X 線マイクロカロリメータのエネルギー分解能は温度に強く依存し、安定した極低温環境 (~ 100 mK) が不可欠である。極低温環境の構築には、断熱消磁冷凍機 (ADR) を用いる。ADR は、冷媒として常磁性塩を用い、磁場を与えることでエントロピーを下げ、断熱状態にした後に磁場を取り去ることにより冷却する。

我々は、ADR を用いて ~ 400 mK の冷却に成功したが、設計上の最低温度 250 mK には達していない。原因として常磁性体カプ

セルの劣化に着目した。磁場を印加した時に発生する磁化熱を解析した結果、過去の実験値から予想される値と1%の差であり、ほぼ劣化していないと分かった。冷えない原因は、輻射等の熱流入と予想される。また新たにX線マイクロカロリメータのための極低温環境として「130 mKを3時間保持」を目標とし、常磁性体カプセルの開発を行った。常磁性塩の質量を増加させると冷却能力は向上し、カプセルの質量を減少させると熱損失を抑えられる。数値計算から、目標のためには、常磁性塩の質量 M_f [g] とカプセルの質量 M_s [g] は $M_f > 0.43M_s + 31$ を満たさなければならない。さらに、ADRの大きさからカプセルは高さ10 cm、直径4.3 cm以内でなければならない。これらの条件に、熱伝導率の向上等の工夫を加えて、設計を行った。また製作に向けて、金線のアニール処理と常磁性塩の析出及び磁化測定を行った。磁化測定では、理論値の60%の磁化を確認出来た。原因は常磁性塩が測定時に風解していたと考えられるが、製作時には表面の風解した部分を取り除くなどの工夫で対処出来ると考えている。

観測 14 CMOS イメージセンサを用いた硬 X 線撮像偏光計の開発

畠内 康輔 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M2)

X線帯域の偏光観測は、高エネルギー天体の磁場や散乱体の構造に対する強力な観測手段であり、ブラックホール周辺の時空構造や中性子星表面付近の強磁場環境、粒子加速メカニズムの解明に不可欠な情報を提供する。8 keV以下の軟X線はIXPE衛星(2021年)により観測予定であり、30 keV以上の硬X線はPoGO+(Chauvin et al. 2017)等で近年成果が報告されている。一方で非熱的放射が卓越し、光子フラックスが十分な10~30 keV帯域における撮像を含めた偏光観測は実現の目処が立っていない。そこで我々は、この帯域をターゲットに超小型衛星搭載を視野に入れた撮像偏光計の開発を行っている。偏光測定には半導体検出器を利用し、光電吸収に伴う光電子放出方向と到来光子が持つ偏光角の相関に基づき、光電子の運動をトラッキングして偏光を測定する。また撮像系には符号化開口マスクを使用し、広視野観測を超小型衛星のサイズで実現する。

我々は2019年に、SPring-8での偏光・撮像観測評価実験を行った。偏光測定評価実験では、偏光検出能力を表す指標として使用されるモジュレーションファクターを測定し、10, 16, 24 keVの硬X線ビームでそれぞれ4, 12, 16%という結果を得た。16, 24 keVでは先行研究(Asakura et al. 2019)との比較において整合しており、本実験ではさらに低い10 keVでも偏光感度があることを示した。また16 keVのビームを用いた撮像性能評価実験では、ステージの首振りにより、半径60'の円環状放射源を模擬した撮像実験を行った。画像再構成により円環が再現可能であることを確認し、以上の結果から偏光撮

像の性能を実証できた。本講演ではこれらの結果に加え、正確な空間分解偏光解析に必要な不可欠な検出器のピクセル性能評価の結果も報告する。

観測 13 硬 X 線偏光撮像システムを搭載した超小型衛星のための軌道上バックグラウンド評価

渡邊 泰平 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

X線帯域での偏光観測は天体の幾何構造や磁場構造を得るのに強力な手段である。しかしながら、非熱的放射が卓越する10 keV以上の硬X線帯域での偏光撮像は未だ実現の目処が立っていない。そこで我々は現在、このエネルギー帯をターゲットとしたX線偏光撮像システムの開発を進め、超小型衛星への搭載を目指している。偏光測定には必要体積の小さい半導体検出器を、撮像系には符号化開口マスクを利用する。

人工衛星による宇宙空間での天体の信号観測においては、宇宙空間におけるバックグラウンドの影響を考慮する必要がある。衛星軌道上のバックグラウンドの要因としては宇宙線、宇宙背景X線放射(以下CXB)、地磁気束縛粒子、大気ガンマ線等が挙げられる。

それぞれの要因によるバックグラウンドレベルをモンテカルロシミュレーションにより予測し、かに星雲を想定した観測の実現可能性を検討した。衛星軌道にはASTRO-H衛星と同じ高度575 km、軌道傾斜角31度の軌道を仮定し、バックグラウンド粒子として陽子、電子、ガンマ線を想定した。シミュレーションの結果、衛星を厚さ1 mmのアルミニウムシールドで覆うことで、10-20 keV帯域においてCXBは覆う前の約7%、地磁気束縛電子は約0.2%にレベルを抑えられることが分かった。本講演では、シミュレーションの詳細と結果について述べる。

観測 15 湾曲 Si 結晶を用いたブラッグ反射型偏光計の分光性能評価

井上 諒大 (中央大学 理工学研究科物理学専攻 M1)

天体からの軟X線偏光の有意な検出には、これまでかに星雲のみしか成功しておらず、未開拓領域として残されている。例えば、ブラックホール近傍の幾何構造は、降着円盤からの偏光X線を高い分解能で分光観測することにより解明されること、などが期待されている。我々は鉄の蛍光X線(6.4 keV)に着目し、5.5 - 8.0 keV帯域の、X線偏光を高いエネルギー分解能(~10 eV)で測定できるよう、ブラッグ反射の原理を利用したSi(100)結晶と炭素繊維強化プラスチック(CFRP)から成る反射鏡と、焦点付近に位置したX線イメージセンサからなる光学系を考案し、開発を行っている。

ブラッグ反射は、反射するX線のエネルギーと反射角が1対1で対応しているため、平面の結晶では分光観測ができない。そ

ここで、我々の反射鏡は9枚の台形の結晶を1つの回転放物面形状に成型し、焦点からイメージセンサをずらすことにより、エネルギーごとの検出位置の違いから分光観測をすることが可能となっている。また、その原理から、焦点からずらしたイメージセンサの位置 d によってエネルギー分解能が変化する。

本研究では、宇宙科学研究所の標準 X 線ビームラインにおいて鉄ターゲットを用いて反射鏡に X 線を照射し、 $-10 \leq d \leq 40$ mm の範囲で分光性能評価を行なった。その結果、検出された Fe-K α と Fe-K β 間の距離は $0.19 \times d$ mm となり、この式とエネルギー差から、エネルギー分解能は $\Delta E/E = 5.6/|d| \% @ 6.4$ keV となる、という結論が得られた。実際に、 $d = 40$ mm において Fe-K $\alpha 1$ と Fe-K $\alpha 2$ (13 eV 差) を分離して検出することに成功した。今回の実験により、我々の反射鏡は偏光測定能力と同時に、マイクロカオリメータに匹敵する高い分光能力 ($0.14\% @ d = 40$ mm) を持ち得ることを実証した。

観測 16 高温塑性変形技術を用いた湾曲ブラッグ結晶偏光計の開発

内野 友樹 (東京都立大学 理学研究科物理学専攻 M1)

X 線天文観測において、空間分布、スペクトル、時間変動に加えた第四番目のパラメータとして偏光観測が進展しようとしている。宇宙 X 線偏光観測は 1978 年のかに星雲が最初であり (M.C.Weisskopf et al. 1978 ApJ)、2021 年には X 線偏光観測衛星である IXPE が打ち上げ予定である (M.C.Weisskopf et al. 2016 Res. Phys.)。超新星残骸の磁場構造、ブラックホール周辺の降着円盤などの解明に繋がると期待されており、特にこれらの高エネルギー天体から生じる鉄輝線は発光強度が強く、このバンドで偏光を観測する意義は大きい。

X 線偏光観測の最も簡単な手法がブラッグ反射であり、Si(100) 結晶における鉄輝線 (6.4keV 付近) のブラッグ角は 45.5° となる。その結果、反射面に垂直な偏光成分の反射率がほぼ 0 となるため、高い感度で偏光を検出することができる。これは、最初の宇宙 X 線偏光観測でも用いられた。しかし、ブラッグ反射型偏光計では、ブラッグ条件を満たすエネルギーでなければ、偏光を検出することができないという欠点があった。

そこで我々は新たに湾曲 Si 基板を用いた手法を開発している。我々が独自に開発を進めてきた超軽量 X 線望遠鏡 (Ezoe et al. 2010 MST) の製作プロセスの一つである、Si 高温塑性変形技術という手法を用いて、結晶面をずらすことで、エネルギー帯域の拡大と集光が可能になると考えている。変形後の形状が保たれるため、構造上安定であり、また厚い基板にも使えるので衛星の打ち上げ環境にも耐えうる。私はまず Si(100) 結晶の平板に、JAXA 宇宙科学研究所 30m ビームライ

ンにて Fe K α 6.4keV の X 線を照射して、光源の偏光度を確かめた。現在、球面変形した Si(100) 結晶を準備中であり、X 線による原理実証を行う予定である。本発表では、我々の手法の原理と開発状況について報告する。

観測 17 金沢大学超小型衛星搭載広視野 X 線撮像検出器 T-LEX の撮像性能試験とその評価

橘 建志 (金沢大学 自然科学研究科数物科学専攻 M1)

短時間ガンマ線バースト (SGRB) の発生源の一つである中性子星を含む連星の衝突・合体はそれと同時に重力波を発生させると言われている。しかし重力波干渉計のみでは重力波源の位置を即座に同定することは難しい。そこで私たちの研究グループは SGRB の X 線観測に着目し、母天体の位置・時刻同定および地上への即時アラートをすることで重力波源の早期多波長観測を促進する。重力波源の電磁波対応天体を観測することで、ブラックホールの形成メカニズムや放出されるジェット機構の解明などが期待されている。

現在、金沢大学が独自に研究・開発を行っている超小型衛星には、広い視野で X 線突発天体をモニターし、SGRB から放出される電磁波を X 線帯域で観測することで、その発生位置と時刻を即座に同定・アラートする広視野 X 線撮像検出器 T-LEX が搭載される。T-LEX の要求性能は、エネルギー帯域 4-20keV、視野 1 ステラジアン以上、方向決定精度 15 分角である。私たちはこれらの要求を達成するように設計したランダムな開閉パターンを持つコーデッドマスクとストリップ型シリコン半導体検出器による撮像を採用している。

本研究ではまず、実際に宇宙に打ち上げるフライトモデル (FM) のマスクの性能評価をするため、検出器・筐体・マスクのうちマスクのみ FM を用いて X 線の入射角を変えながら方向決定精度を検証した。その結果、方向決定の誤差は最大で 4 分角程度に収まり、要求される精度を達成している事が確認できた。

本講演では金沢大学超小型衛星の概要をはじめ、搭載される検出器 T-LEX の FM 撮像性能試験の進捗について報告する。

1. 宮尾耕河, 金沢大学衛星搭載広視野 X 線撮像検出器フライトモデルの性能評価 (2020)

観測 19 MEMS 技術を用いた Schmidt 配置 Lobster eye 光学系の開発

作田 紗恵 (東京都立大学 理学研究科物理学専攻 M1)

我々は MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡を開発している [1]。Si 基板に微細穴を空け、側壁を反射鏡として用いる手法であり、2 枚の基板を組み合わせて Wolter I 型光学系とする。我々は新しく

Lobster eye 光学系の開発に着手した。甲殻類の目のような四角穴が球面に格子状に並んだ構造の光学系である。X線を四角穴の側壁に2回反射させるため、集光像は十字となるが、広視野と高い有効面積が実現できる。

私は、Schmidt配置のLobster eye光学系の開発を行っている。Lobster Eye光学系には正方形の四角穴によるAngel配置と、スリット状の穴を2段に重ねたSchmidt配置の2つがある[2]。前者は1枚の基板でいいが、四角穴の加工時の丸まりや、側壁の形状評価が困難であった[3]。後者では、長方形スリットを直交させて重ねることで正方形穴とするため、穴の丸まりや評価が容易になる。私はそこでSchmidt配置用フォトマスクを設計し、それをを用いて4インチ、300 μm 厚のSi基板をドライエッチング加工することで、微細穴構造を自作した。側壁粗さは、100 μm で17nm rms程度と、良好であり、今後、確立してきた高温アニールで側壁平滑化し、高温塑性変形で球面状にして、X線で性能を確かめる予定である。本発表ではこれらの開発現状について報告する。

[1] Y.Ezoe et al., 2019, Microsystem Technologies, 16, 1633

[2] Pina et al., 2017, "Lobster eye as a collector for water window microscopy", SPIE, 103870D

[3] R.Otsubo et al. 2019 "First demonstration of Lobster eye X-ray optics fabricated with deep reactive ion etching". MNC

観測 20 Athena 衛星に搭載する SPO 望遠鏡の DLC コーティング

芳野 史弥 (中央大学 理工学研究科物理学専攻 M2)

Athena (Advanced Telescope for High-Energy

Astrophysics) は 2030 年代に ESA から打ち上げ予定の大型 X線天文衛星である。Athena のミッションは (1) 宇宙の大規模構造がどのように形成されてきたか (2) 巨大ブラックホールがどのように成長してきたのか、の二つを X線観測によって解明することである。Athena は X線の集光系に口径約 3 m、焦点距離 12 m の Wolter I 型望遠鏡 Silicon Pore Optics (SPO) を搭載している。SPO は、Ir コーティングした Si 基板を積層することで角度分解能約 5 秒角、有効面積は 1 keV において 1.4 m^2 を実現可能である。さらに Ir 面上に 10 nm 以下の炭素膜をオーバーコートすることで、積分反射率の向上を見込んでいる。当初炭素膜はグラファイトを用いていたが、SPO を化学洗浄する際にグラファイト膜が剥離する問題が生じている。そこで代替素材に、グラファイトと同等の積分反射率を有しながら耐薬品性に優れる Diamond-Like Carbon が期待されている。今回我々は中央大学プラズマ CVD 装置を用いて 10 nm 以下の DLC 膜を作成した。まず DLC を 10 nm 以下で成膜できる条件を見出すために、Si 基板上で蒸着を行った。AFM による膜厚測定の結果、 C_2H_2 ガスの流量を 10 SCCM、パルス電圧を

4 kV、蒸着時間を 2 分以下とすれば膜厚を 10 nm 以下にできることがわかった。SPO に対しても同様の条件で蒸着し、膜厚 7.7 nm で表面粗さ (Ra) が 0.25 nm 及び膜厚 3.8 nm で Ra が 0.22 nm の DLC 膜の蒸着に成功した。さらに、作成した試料でラマン分光解析を行った結果、DLC 由来の $1700\sim 1100\text{ cm}^{-1}$ にわたるブロードピークを持つラマンスペクトルが得られた。

観測 21 鹿児島大学 1m 望遠鏡用可視光 2 波長同時撮像装置の開発

川本 莉奈 (鹿児島大学 理工学研究科物理・宇宙専攻 M2)

中性子星連星合体による重力波源の可視光・赤外線追観測において、可視光と赤外線で光度の変化が異なる結果が得られていることから、重力波源に対して多波長同時観測することが求められる。その他にも、短いタイムスケールで可視光と赤外線の光度の振る舞いが異なる激変星や突発天体の観測など、可視・近赤外同時観測が有効な天体が存在する。

そこで我々は鹿児島大学 1m 望遠鏡用の近赤外 3 波長同時撮像装置 (以下、赤外カメラ) の開発に加え、可視域も観測可能な可視光 2 波長同時撮像装置 (以下、可視カメラ) の開発を始めた。これら 2 つの撮像装置が完成すると、5 つの波長帯の同時撮像が可能となり観測効率が大幅に向上し、日本で最多級の波長を同時撮像できる観測環境が実現する。

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

本研究では、焦点距離の変換 (F 比の変換) 及び、像面収差の補正を行う補正レンズ系の設計、ダイクロイックミラーによる非点収差が最小になるウェッジ角度、配置などの設計を行った。光学シミュレーションの結果、視野全面において g' band では RMS radius 7.40 μm (0.19 ["])、 i' band では 14.1 μm (0.36 ["]) のスポットが実現できている。現在、光学素子を固定・配置するための機械部品の設計・製作が完了し、光学試験の準備を進めている。

観測 22 せいめい望遠鏡における近赤外偏光撮像装置のための波長板回転機構の設計と製作

沖中 陽幸 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

我々の研究グループでは岡山県に建設された口径 3.8m のせいめい望遠鏡に設置する近赤外偏光撮像装置の開発を進めている。国内最大の光学望遠鏡を用いて星間偏光や散乱偏光を観測することによって、星間空間や降着円盤のダストの詳細な情報

を得ることを目標としている。

開発する近赤外偏光撮像装置は J,H バンドの 2 バンド同時観測を目的としており、検出器および、再結像のためのオフナー光学系など装置の大部分は真空容器内部で冷却する。ただし 1/2 波長板のみ冷却せず容器の外側に設置する。

1/2 波長板は入射した偏光を 90 度回転させる性質を持ち、検出器と波長板の間に偏光子を置いたうえで波長板を回転させると検出強度が周期的に変調し、これを解析することで偏光状態を導出することができる。ところが 1/2 波長板は波長依存性を持つため、2 バンド同時観測を行う場合には遅相量が 1/2 λ からずれてしまい、波長板を回転させる際に生じる検出強度の変調が不規則になり、また波長板を透過した後の偏光度が低下するという問題が生じる。そのため複数のバンドで同時観測を行う場合は通常、複屈折性を持つフィルムを積層させ広帯域に対応させた波長板を用いる。しかし、検出強度の変調から偏光状態を導出する際の計算方法を改良すれば、広帯域波長板を用いずとも偏光観測が可能になると考えた。

本発表では、まず近赤外偏光撮像装置の概要を紹介した後、広帯域波長板を用いず 2 バンド同時観測を行う場合の偏光状態の導出方法について説明し、さらに 1/2 波長板の回転機構の製作の詳細について発表する。

観測 23 「小型屈折型補償光学装置 CRAO の開発：AO シミュレーションによるエラーバジェットの評価」

坂部 健太 (京都産業大学 理学研究科物理学専攻 M2)

補償光学 (AO) とは、地球大気の擾乱によっての乱れた天体光の波面を補正し、高コントラスト像を得ることができる光学技術である。AO は光赤外線天文学において必須の装置となりつつあるが、広視野もしくは高補正性能 (高ストレール比) の次世代 AO や中小望遠鏡への標準装備 AO の実現のためには、装置の小型化と低コスト化が急務となっている。そこで、我々京都産業大学神山天文台のグループでは「小型で安価な AO」の試作機である小型屈折型補償光学装置 (CRAO) の開発を行っている。CRAO は可視域 (400~700nm) での AO で、12 × 12 素子数の SH 波面センサーと 40 素子の可変形鏡 (最大ループ速度 200Hz) を搭載している。最大の特徴は小型化を図るために屈折光学系を利用していることである。既に開発した 1 号機では、補償後の最良シーイング^{2.4"}@550nm が得られており (神山天文台サイトにおける標準シーイングは 3-4 ")、この結果は目標性能である < 1 "には到達していないことを意味する。そこで、発表者は CRAO の性能未達成の原因調査を実施した。まず、AO シミュレータ YAO (Rigaut et al., 2013) を用いて、現行システムの限界性能の推定を行った。シミュレーションにおける大気パラメータとして風速は気象庁のラジオゾンデ観測結果を Greenwood wind モデルに適用させたものを用い、大気モデ

ルとして Von Karman スペクトルを用いた。また、望遠鏡口径は 1.3m とした。シミュレーションの結果、オンスカイ観測で得られている値と同等のシーイング値が得られ、現行システムはすでに限界補償性能に達していることが分かった。次に、システムを構成する各光学素子が持つ波面補正エラー (エラーバジェット) の評価を実施した。得られた各素子の補正エラーを Zernike 係数に分解することで、目標性能未達成の原因をより詳細に把握することを試みた。本発表では AO シミュレーションの詳細と結果のまとめに加え、各素子のエラー評価結果が示唆する 2 号機の改良案について紹介する。

観測 24 極限補償光学における tip/tilt 補償装置の開発

渥美 直也 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

1995 年に初めて主系列星を公転する系外惑星が検出されて以来、現時点で 4200 以上の系外惑星が検出されてきた。その多くは木星型であったが、太陽系の惑星とは異なる性質を持っており、惑星形成理論に新たな問題を投げかけた。木星型惑星の温度や大気組成を得ることで、惑星形成理論に制約を与えることが期待されるが、従来の間接法からは得られない。一方で惑星の光を直接捉える直接観測法であれば、それらを知ることができる。我々のグループでは、せいめい望遠鏡 (京大岡山 3.8m 望遠鏡) を用いて木星型惑星の直接観測を目指している。

しかし、地上からの観測では地球大気の揺らぎにより、光の波面は歪み、空間分解能は低下する。また、惑星は主星に比べて非常に暗いため、主星の散乱光により惑星の光は隠されてしまう。そこで我々は、空間分解能を向上させる補償光学と、主星の散乱光を打ち消すコロナグラフという二つの要素から成る観測装置、SEICA (Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao) を開発している。コロナグラフが正しく機能するためには、前置光学系である補償光学において、星像の位置を 0.01 秒角未満で安定化させ、ストレール比を 0.9 以上にすることが求められる。この二つの条件を達成するために、我々は高いストレール比が望まれる極限補償光学を選んだ。さらに、波面の歪みを tip/tilt、低次の歪み、高次の歪みの三段階に分けて考え、段階的に補償するシステムを採用した。

本研究では、tip/tilt と呼ばれる星像のふらつきを補償する装置の開発を行う。この装置では、tip/tilt をセンサで計測し、それを補正するように光路中の鏡を高速制御することで、星像の位置を 0.01 秒角程度で安定化させることを目標にする。本講演では、現在の装置の開発状況について述べる。

観測 25 近赤外線輻射輸送計算による生体光イメージング：甲状腺癌の診断に向けて

佐藤 大樹 (筑波大学 理工情報生命学術院数理物質科学研究群物理学学位プログラム M1)

宇宙空間ではエネルギーの流れの大半を輻射によるエネルギー輸送が占めており、この輻射の振る舞いや伝播を解析する上で輻射輸送方程式の数値解析が発展してきた。また、すばる望遠鏡による近赤外線観測によって、近年遠方銀河が数多く検出されてきた。

近赤外線は生体内へ数ミリメートル程度浸透し、生体内の情報を獲得出来る可能性がある。したがって、近赤外線検出技術は、現在天文学だけでなく、医療診断への応用も進められている。この医療診断手法の一つが生体光イメージングである。この診断手法は生体内に照射した近赤外線のうち、生体内の組織や臓器によって散乱を受け、外部に出てきた光を測定し、画像再構築を行うことによって生体内の診断画像を得るというものである。

近年、Fujii, et al. (2016) によって甲状腺を想定した2次元輻射輸送計算が行われた。本研究では、まずFujii, et al. (2016) の論文より、甲状腺周辺における気管の存在や気管内部と周辺組織間での屈折率の不一致を考慮に入れた場合に首の表面において測定される拡散光の強度や、首の内部における光の強度分布について議論を行う。

その後、現在我々が取り組んでいる光音響トモグラフィーについて紹介する。

光音響トモグラフィーは、生体内で血管などが光を吸収することによって生じる光音響波を生体表面で測定し、画像の再構築を行い、生体内の診断画像を得る手法である。これと光拡散トモグラフィーを組み合わせる事で診断精度が飛躍的に向上する可能性がある。本講演では一様媒体に血管を想定したテスト計算について議論を行う。

観測 27 データ科学的装置開発によるサブミリ波分光観測の高感度化

谷口 暁星 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 PD)

本講演では、観測データが持つ統計的な性質に注目して観測や解析の方法をデザインし直すことで、ソフトウェアの面からミリ波・サブミリ波分光観測の感度向上を目指す「データ科学的装置開発」の概要と成果を発表する。

ミリ波・サブミリ波は、ダストによる減光を受けずに分子・原子ガスの分光観測が可能な波長帯として、近傍から遠方宇宙にわたる星形成活動の研究に使われている。ALMA 望遠鏡 (干渉計) による高感度・高空間分解能を生かした個別天体の観測成果は今や枚挙にいとまがない。一方、空間・周波数の3次元空間の大規模探査による普遍的な星形成史の解明のためには、干渉計では難しい広視野観測が可能な単一望遠鏡 (単一鏡) の役割が重要となる。現在、口径50m級の次世代単一鏡計画 (LST・AtLAST など) や、超広帯域の分光装置開発 (DESHIMA など) が精力的に進められている。ところが、単一鏡の分光観測やデー

タ解析の方法論は、驚くべきことに電波天文学が誕生した半世紀前からほとんど検討・改善がなされていない。特に、同波長帯では地球大気の熱放射の除去が問題となるが、従来の除去方法を使った観測では、装置が本来達成可能な感度を未だ実現できずにいる。

そこで我々は、単一鏡分光観測の時間×周波数の行列データにおいて、大気放射が周波数方向に相関する性質 (低ランク性) や、天体信号がデータに占める割合が小さい性質 (スパース性) を積極的に利用して大気放射の除去手法を開発した。低ランク性を利用した周波数変調観測では、従来のポジションスイッチ観測に比べて1/3の観測時間で同等の感度を達成できることを示した (Taniguchi et al. 2020)。さらに、スパース性を利用した解析では、従来観測の取得済みデータの感度をも $\sqrt{2}$ 倍向上できることを示した。本講演では、実際の観測データを使った実用例とともに、将来計画における応用も紹介する。

観測 28 NASCO 受信機の搭載から現在までの開発進捗

松英 裕大 (名古屋大学大学院 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

我々名古屋大学天体物理学研究室とNANTENグループはチリアタカマにあるNANTEN2望遠鏡を用いて、超広域でCO輝線を観測するNASCO (NANTEN2 Super CO survey as legacy) 計画を推進している。本計画を遂行するためには高感度な受信機が必要であるため100GHz帯で4ビーム/両偏波/SSB、200GHz帯で1ビーム/両偏波/2SBのマルチビーム受信機であるNASCO受信機を開発した (山本・藤城他2020年春季年会)。2019年9月のファーストライト時点では受信機初段の冷却アンプ複数台の性能が出ておらず、観測に使用できるIF数は100GHz帯で全16IFのうち4IFのみだった。2020年3月に修理した冷却アンプを再度受信機に搭載し、分光計での入力パワー調整のため常温アンプを追加した。その結果良いIFでは150K程度の T_{sys} を得られるなど性能が向上し、200GHz帯と合わせた全5ビームでのCO輝線の観測成功した。さらに、IRC+10216の9点ポインティング観測やOrion KL、M17SWのOTF試験観測に加えて太陽・月を用いたビームスキントの測定、惑星の連続波観測によるビームパターン測定を5ビームで行なった。NASCO受信機はビームローテーター非搭載であるため、ビームスキントの測定結果をもとにソフトウェア上で回転補正を行なった。また、複数ビームを重ね合わせることで短時間よりS/N比の高いマップを得ることに成功した。本講演では2020年3月に行われた受信機作業に加えて試験観測で得られた結果をもとにNASCO受信機の性能評価を報告する。

観測 29 1.85m 電波望遠鏡の新 IF 回路の検討

南 大晴 (大阪府立大学 理学系研究科 M1)

我々大阪府立大学宇宙物理学研究室では、長野県の国立天文台野辺山に設置している口径 1.85m の望遠鏡を開発・運用している。この望遠鏡では星形成の母体となる分子雲を観測しており、多くの物理情報をトレースする CO 同位体の輝線をメインに銀河面や星形成領域を観測してきた。これまでは主に 230 GHz 帯に存在する CO(J = 2 - 1) の同位体 3 輝線を観測しており (Onishi et al. 2013)、現在南米チリのアタカマに移設し 210 - 375 GHz に存在する CO 同位体 6 輝線 (J = 2 - 1, 3 - 2) を観測する計画を進めている。加えて IF 帯域が従来の 4 - 8 GHz からより広帯域な 4 - 21GHz を出力する SIS mixer (Kojima et al. 2017) を導入し広帯域観測を実現する受信機を開発を推進している。

チリの移設予定地では 0 - 2.5 GHz にかけて多くの携帯電波や WIFI 等が混雑しており、現在の分光計に入力している帯域 0 - 2 GHz に影響が出る可能性がある。これを避けるために分光計帯域 0 - 2.5 GHz のエイリアシングを利用して 2.5 - 5 GHz で性能を損なわず分光可能か検討し、分光計まで導く 2.5 - 5 GHz の IF 回路の設計・評価を行っている。

我々はこれまで 0 - 2 GHz の信号を XFFTS 分光計に入力し運用してきたが、2.5 - 5 GHz の入力帯域においてこの分光計で性能に問題なく運用できるかを確認するために以下の実験を行った。(1) 信号発振器を用いた 0 - 20 GHz にわたる分光計への入力強度と出力強度の線形性調査、(2) 連続性の信号を用いた 0 - 5GHz までの線形性調査。(1) の実験では 0 - 6 GHz まで線形性を確認したが、3 GHz を境に 5 GHz まで徐々に強度の減衰が見られた。(2) の実験においては入力強度が -5 - -40 dBm までの線形性を確認した。これらの結果から 3 - 5 GHz にかけての減衰を補正するために分光計へ入力する前のアナログ回路でイコライザーを用いて強度の平坦化を検討している。今後、XFFTS 分光計で 2.5 - 5 GHz 入力の性能が保証できれば、本望遠鏡への搭載も検討していく。本講演ではこれらの測定結果及び XFFTS の性能を比較・検討しその結果を報告する。

観測 30 1.85m 電波望遠鏡の新制御システム開発

松本 健 (大阪府立大学 理学系研究科物理科学専攻 M1)

我々の研究室では、口径 1.85 m の電波望遠鏡を国立天文台野辺山にて運用、開発を行っており、銀河系に存在する分子雲に対して主に CO (J = 2-1) を用いて広域観測を推進してきた。現在、本望遠鏡を南米チリに移設し、210-375 GHz 帯の広帯域受信機を搭載することで、銀河系やマゼラン雲に存在する分子雲に対して CO (J = 2-1, 3-2) 輝線の同時・広域観測を目指している。

チリ移設に伴い、従来の制御システムの複雑さ、計算機の老朽化などから、望遠鏡の制御システムを一新している。1.85m 電波望遠鏡の新制御システムには、従来と同様に、多数の装置の同時制御・正確なアンテナ駆動を実現し、それに加え、(1) 海外で運用するための徹底的な監視と遠隔操作、(2) 観測の完全自動化、(3) 将来の新装置等に柔軟に対応できる拡張性、が新たに求められる。これらの要求を満たすために、新制御システムには、ロボット工学でよく使われているソフトウェアプラットフォームである ROS (Robot Operating System) を採用した。これにより、多数の装置の分散処理を容易に実現している。我々は、ROS を使用した受信機・アンテナ駆動のための新制御システムの設計・実装を概ね完了し、駆動性能の確認と観測データの解析ツールの作成を進めている。

2020 年春に、新制御システムを用いて、望遠鏡性能評価、試験観測を実施した。望遠鏡性能評価としては、太陽、木星、IRC+10216 を用いた電波ポインティング試験を行い、その結果から指向誤差 20' を実現した。これは、旧システムと同等の駆動性能をもち、345 GHz 帯での分解能 2' に対して、十分な精度である。試験観測では、230 GHz 帯での標準天体の PS 観測、Orion-KL の OTF 観測を実施し、旧システムでの観測結果と観測誤差の範囲で一致することを確認した。現在、観測の自動化などの新規機能の開発を進めている。

観測 31 半波長板の結晶軸のずれが CMB の B モード偏光観測に与える系統誤差の評価

星野 百合香 (埼玉大学 理工学研究科物理機能系専攻 M1)

現代宇宙論における未解決問題を補完する理論として、インフレーション理論が提唱されている。この理論はいまだ仮説であり、実証が必要とされる。宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) の偏光パターンとして B モード偏光が、インフレーションによる原始重力波の痕跡として刻まれると予測されている。現在のインフレーション理論より、B モード偏光の検出のためには、テンソル・スカラー比 $\delta_r \leq 0.001$ の感度での観測が必要である。次世代衛星 LiteBIRD は、この原始重力波 B モード偏光の観測を目的とした JAXA 戦略的中型衛星である。LiteBIRD では 1/f ノイズや機器の系統誤差を削減するために、連続回転半波長板 (Half-Wave Plate; HWP) を搭載した偏光変調器を利用する。出力信号は、HWP の回転角度や光学軸のずれ、透過率等に依存し、理論的には DC 成分と、HWP の回転周波数の 2 倍波項、4 倍波項で記述できるはずである。しかし各値の不定性から生じる系統誤差の結果として、HWP の回転周波数の 1 倍波項や 3 倍波項等の、理論的に予測できない信号が存在し、その原因は定かではない。本研究ではこの原因を究明するために、系統誤差の原因の候補の一つであると考えられる理想的な A カットサファイアからの光学軸のずれに焦点をあてる。HWP には複

屈折材が用いられるが、その光学軸が入射偏光に対して完全に垂直でない場合、HWPの変調効率は低下してしまう。本講演ではRCWA法(厳密結合波解析)によるシミュレーションを用いて、光学軸のずれが観測に与える影響について議論する。

観測 33 CMB 偏光観測に用いる TES の電氣的・熱的特性評価および光学試験の進捗状況

西ノ宮 ゆめ (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M2)

初期宇宙や宇宙進化の理解を深めるために、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) の観測が進められている。宇宙開闢直後の急速膨張「インフレーション」の際に生成される原始重力波が、CMB 偏光の奇パリティ成分である「B モード」のパターンをつくり出すが、まだ観測で発見されていない。この CMB の B モード偏光を観測してインフレーション理論の証拠を探索することが、CMB 実験の大きな目的のひとつである。

現在開発が進められている地上 CMB 観測実験の望遠鏡には、超伝導転移端センサー (Transition Edge Sensor: TES) を用いた検出器が使用されている。超伝導体の転移温度付近における急峻な抵抗値変化を利用する、高感度な TES 検出器を多数並べて同時観測することによって、統計誤差を低減することができる。2016 年に発足した史上最大規模の地上 CMB 実験である Simons Observatory (S0) 実験では、0.1K という極低温環境をつくり出す強力な冷却力を持つ希釈冷凍機を導入して、検出器の雑音をさらに低減する。したがって、その環境に最適化した TES を開発するために、TES の性能を評価して開発者へフィードバックすることが必要である。

そこで、TES の電氣的・熱的パラメータを評価する測定環境を構築し、性能評価手法を開発した。これらのパラメータは検出器の雑音と密接な関係があるため、設計目標に達しているか評価することは、重要なことである。本講演では、その性能評価について報告するとともに、TES の光学的特性を評価する環境・手法の準備状況についても述べる。

観測 34 次世代 CMB 偏光観測実験 Simons Observatory の小口径望遠鏡に搭載する偏光角較正装置の製作と性能評価

村田 雅彬 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M2)

宇宙再電離時に生成された宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic microwave background: CMB) には E モード偏光と B モード偏光と呼ばれる 2 種類の偏光成分が存在する。これらの偏光成分のうち、大きな角度スケールの B モード偏光にはインフレーション期に生成された原始重力波の痕跡のみが残されていると予想されている。原始重力波由来の B モード偏光

の温度は 0(10 nK) 程度で、E モード偏光の温度と比べて 100 倍以上小さいと期待されている。また、これら 2 つの偏光成分の偏光角を見誤った場合、E モード偏光が B モード偏光に漏れ込む。したがって、原始重力波由来の B モード偏光を観測するためには検出器の角度較正が極めて重要となる。今回、次世代 CMB 偏光観測実験 Simons Observatory(S0) の小口径望遠鏡 (Small aperture telescope: SAT) に搭載する偏光角較正装置の製作を行った。装置は平行に張った金属ワイヤーを人工偏光光源として用いる。金属ワイヤーが入射光を反射することで偏光を生成し、生成された偏光を読み取ることで偏光角の較正を行う。偏光角は金属ワイヤーに沿った方向となるので、ワイヤーの向きを追跡することで偏光角の同定を行うことができる。本装置では、ワイヤーの重力に対する向きを追跡することで、偏光角を同定する。ワイヤーの向きはエンコーダーと傾斜計の出力をタイムスタンプで同期させることで追跡する。エンコーダーはワイヤー平面内でのワイヤーの向きを測定し、傾斜計はワイヤー平面の重力に対する向きを測定する。講演では、較正装置の製作状況とデータ取得系の性能評価について報告する。

観測 35 CMB 偏光観測に用いるマイクロ波多重化読み出し回路の性能評価

寺崎 友規 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

インフレーション理論の検証、ニュートリノの総質量の決定などの重要な宇宙論的情報を得るためには CMB の偏光を観測することが必要である。微弱な CMB 偏光を高感度で捉えるため、近年の CMB 実験では超伝導転移端センサ (TES) が用いられている。TES は超伝導体の転移温度付近での急峻な抵抗値の変化を利用した高感度なボロメータであり、1 素子当たりの感度は入射光子の揺らぎによる原理的な限界に達している。そのため近年の CMB 実験では検出器素子の数を増加させることで統計誤差を減らし、感度を指数関数的に向上させてきた。次世代 CMB 実験 Simons Observatory(S0) では合計約 6 万素子での観測が予定されている。

検出器への熱流入を防ぎ、多数の TES を 0.1K という極低温で動作させるためには、少ない配線本数で多数の素子を読み出す多重化が必要となる。S0 ではマイクロ波共振器と超伝導量子干渉計 (SQUID) を使い、それぞれの TES を異なる共振周波数の共振器に割り当てるマイクロ波多重化 (μ MUX) が用いられており、1 対の同軸線当たり 1,000 素子を読み出すことを予定している。

また、さらに大量の検出器が必要となる将来実験に向けて、比較的低い作製コストでありながらも、TES と同等の感度が達成でき、かつ μ MUX と同じ読み出し方法で 0(1,000) 個の同時読み出しが可能な力学的インダクタンス検出器 (MKIDs) の開発も行われている。

本講演では、Simons Observatory 等の次世代の CMB 実験に向けて開発された μ MUX 読み出し回路の性能評価のための測定系の構築の状況について報告する。また同じ測定系を使って MKIDs を評価することについても言及する。

観測 36 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 実験で用いる反射防止膜 (AR coating) の作成と性能評価

坂栗 佳奈 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

宇宙初期の情報を含む CMB は偶パリティの E モードと奇パリティの B モードの 2 つの偏光パターンを持つ。このうち原始重力波由来の B モード偏光が観測できれば、初期の宇宙が指数関数的膨張を起こすインフレーションの証拠となる。これらは初期宇宙への理解へつながり、さらには宇宙の大規模構造を通じてニュートリノ総質量を決定できるなど物理学全体の発展に貢献する。最大規模の地上 CMB 実験である Simons Observatory (S0) 実験では、この B モード偏光をテンソルスカラー比について $\sigma(r)=0.003$ と世界最高感度で測定することを目指している。このように精度の高い実験を必要とするため、系統誤差をできるだけ小さくして感度を向上させることが重要となる。地上で反射した光が偏光として観測されたり、望遠鏡内で光が反射したり、光学系には系統誤差を生じる原因が複数存在する。これらを正確に見積もり誤差を最小限に抑える装置の開発・導入をすることが必要である。S0 で使用する望遠鏡の光学素子の 1 つであり、入射した偏光信号に変調を加える半波長板に使われるサファイアやアルミナフィルタは屈折率が 3.1 程度と大きく多くの光を反射してしまう。大気の吸収線を避け、広い周波数帯で低い反射率を実現しなければならないため、サファイアやアルミナフィルタの上に屈折率の違う誘電体である反射防止膜 (AR coating) を置き反射率を下げる。サファイアなど実験装置は低温下に置かれるため、そのような環境でコーティングがはがれることのないよう熱膨張率の差が小さく、圧縮弾性率が低い物質を選ぶ必要がある。以上から数値計算によって導出した最適な屈折率をもつ物質やそれらの厚み、そこから作成した反射防止膜の製作・性能評価状況を述べる。