
2021 年度 第 51 回 天文・天体物理 若手夏の学校
観測機器 アブストラクト集

毛受 弘彰 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所・助教)

8月24日 10:00–11:00 B会場

高エネルギー相互作用と宇宙線観測

10^{20} eVにも達する高エネルギー宇宙線起源の解明は物理学の残された重要な課題の1つであり、現在も宇宙線観測が活発に行われている。高エネルギー宇宙線は地球大気と衝突して、多数の2次粒子を生成する。2次粒子は衝突を繰り返すことで粒子シャワーとして地上に振りそそぐ(空気シャワー)。高エネルギー宇宙線の観測は、この空気シャワー発達を地上検出器によって捉えることによって行われる。そのため、宇宙線空気シャワー発達から1次宇宙線の情報を精度良く推定するためには、空気シャワー発達によって重要な役割を果たすハドロン相互作用の理解が不可欠である。

現在、超高エネルギー宇宙線観測において、地上で観測されるミュオン数が予測値よりも3–5割も多いミュオン超過が大きな問題となっている。これは現在のハドロン相互作用の理解が不十分であることが原因であり、この解決に向けてさまざまな研究が活発に行われている。この中には宇宙線自体を使った研究とともに、LHCなどの加速器を使ったハドロン相互作用の研究も行われている。特に空気シャワー発達の理解には、LHC-ATLAS実験のような素粒子実験検出器ではカバーされない超前方に生成される粒子の測定が不可欠である。本公演では、宇宙線空気シャワー発達の物理について述べた後、我々がやっているLHCf/RHICf実験について紹介する。

関谷 洋之 (東京大学 宇宙線研究所・准教授)

8月25日 10:00–11:00 B会場

超新星背景ニュートリノ観測をめざす新生スーパーカミオカンデ実現までの道のり

2020年7月にスーパーカミオカンデ(SK)では、タンク中の純水にレアアースの一種であるガドリニウム(Gd)を約5トン導入し、新たな装置として観測をスタートさせた(SK-Gd実験)。SK中の純水にGdを混ぜると、反電子ニュートリノが反応した際に陽電子によるチェレンコフ光が発生するのに加え、生成された中性子が数十~百マイクロ秒後にGdに捕獲されて、ガンマ線を放出するようになる。ガンマ線もチェレンコフ光を発生させるので、特徴的な2回の発光がSKタンク内で起こることになる。したがって、反電子ニュートリノに対するS/Nを各段に向上させることができる。

SK-Gd実験では、まず宇宙の初期から起きてきた超新星爆発によって蓄積されたニュートリノである「超新星背景ニュートリノ」の観測感度が飛躍的に向上する。もし発見に成功すれば、宇宙のどの時期に多くの超新星爆発が起きてきたか、といった「超新星爆発の歴史」やブラックホールや中性子星の形成の理解に進展をもたらす。中性子星合体におけるr-processによる重元素合成が明らかになったが、中性子星自体が超新星爆発を経て形成されるので元素の歴史を辿る上でも超新星爆発の歴史の解明は重要である。また近傍超新星爆発の方向決定精度の向上も期待され、超新星爆発直後の光学観測に重要な役割を果たす。

SK-Gdの実現のためには太陽ニュートリノ観測のバックグラウンドとなる放射線不純物を取り除いた超高純度の硫酸ガドリニウムの開発や、導入したガドリニウムイオンや硫酸イオンを除去しない純化装置の開発など、技術的にも大きな挑戦が必要であった。運用開始後も光の透過率や検出器のダークノイズなど様々な問題に対処する必要があった。これらの検出器開発にまつわる様々な苦労や観測の現状についても講演する。

観測 1

太陽アクシオン探査に向けた TES マイクロカロリメータの熱パスの熱伝導度評価 宮川 陸大 (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 修士 1 年)

アクシオンは強い CP 問題を解決するために導入された仮想粒子で、暗黒物質の有力な候補の一つであるが発見には至っていない。アクシオンの質量については理論的な制限がないため、広い質量領域 (μeV - eV) で探査が必要である。我々は比較的重いアクシオンの探査として太陽核内部で生成されるアクシオン (太陽アクシオン) の検出を目指している。アクシオンは磁場によって光子と互に変換すると予測されており、太陽内部の光子がプラズマの磁場によってアクシオンに変換され、地球に飛来する。更に、太陽アクシオンが ^{57}Fe に共鳴吸収され、脱励起する際に 14.4 keV のガンマ線を放出することが Moriyama 1995 により提唱された。Namba 2007 により、半導体検出器を用いた太陽アクシオン探査が行われた。しかし、 ^{57}Fe で 14.4 keV のガンマ線に変換される割合は約 9% であり、殆どが転換電子や低エネルギー X 線となり Fe 薄膜内部で自己吸収され検出できない。

そこで我々は ^{57}Fe を吸収体とする超伝導転移端 (Transition Edge Sensor; TES) マイクロカロリメータ (TES カロリメータ) の開発を進めている。TES カロリメータは、入射した粒子による素子の温度上昇を超伝導転移端の急峻な抵抗変化を利用して測定する検出器であり、高いエネルギー分解能を実現することが可能である。更に、14.4 keV のガンマ線だけでなく Fe に自己吸収された転換電子や X 線のエネルギーも熱として測定可能であるため、検出効率が 70% 以上になることが期待されている。磁性体である Fe の TES への影響を考慮し、Fe 吸収体を TES から離し Au の熱パスを通して熱を TES へ伝える構造を考案した。熱パスの熱伝導度はエネルギー分解能に依存し、格子欠陥の少ない Au の成膜が必要である。我々は新しく導入した電解析出法によって成膜した Au の熱伝導度を向上させることに成功した。本発表では、太陽アクシオン探査に特化した TES カロリメータの開発の現状と今後について報告する。

観測 2

太陽アクシオン探査を目指した超伝導転移端温度計マイクロカロリメータの開発 八木 雄大 (東京大学 ISAS/JAXA D1)

アクシオンは暗黒物質の有力な候補のひとつである。2020 年、暗黒物質探索実験 XENON1T により、太陽から飛来するアクシオンの兆候らしき超過事象が観測されたが、

精度が不十分のため存在を結論付けることができなかった。我々は直接地上観測を目指し、太陽アクシオンに特化した超伝導転移端温度計 (Transition Edge Sensor; TES) マイクロカロリメータ (以下、TES カロリメータ) と呼ばれる熱検出器の開発を行っている。TES カロリメータは、超伝導転移に伴う急激な抵抗変化を温度計として利用し、個々の粒子を吸収した際に生じる微小な素子の温度変化を精度良く測定できる。太陽アクシオンは、磁気双極子遷移をもつ ^{57}Fe との相互作用により、ある確率で光子に変換され、14.4 keV 輝線が放射されることが考えられている [1]。[2] では、地上で ^{57}Fe 薄膜の近くに Si PIN 検出器を設置し観測を行ったが、検出器立体角を含めた検出効率は約 1% と低く、有意な検出には至らなかった。そこで、我々は 60 倍以上高い分光性能をもつ TES カロリメータと共に、アクシオン吸収体として ^{57}Fe を用いることを考案した。Si PIN 検出器では検出できなかった自己吸収熱を検出できるようになるため、検出効率は 70% 以上と飛躍的に向上する。しかし、強磁性体である ^{57}Fe により、TES の分光性能を劣化させる恐れがあるため、我々は吸収体と TES を横置きにする構造設計を考案した。本講演では、従来とは異なる吸収体デザインの TES カロリメータを用いた X 線照射試験におけるパルスの解析と今後の観測計画について報告する。

1. Moriyama, S., Phys. Rev. Lett, 75, 3222-3225, 1995
2. Namba, T., Phys. Lett. B, 645:398-401, 2007

観測 3

湾曲 Si 結晶を用いたブラッグ反射型偏光計の開発と評価 西山 凜太郎 (中央大学 理工学研究科物理学専攻 M1)

今までの X 線天文観測は、撮像、測光、分光、偏光観測が行われているが、偏光観測が遅れを取るのには偏光の検出器の開発が困難なためである。X 線偏光観測が行われるようになると、ブラックホール周辺の降着円盤の構造などの解明に繋がると期待されている。我々は、鉄輝線を含む 5.5-8.0 keV の帯域の X 線偏光を高いエネルギー分解能で測定すべく、ブラッグ反射の原理を利用した 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成る光学系を考案し、開発を行なっている。これまでの研究では、ブラッグ反射は原理的に単一のエネルギーしか反射できないため、結晶を湾曲させて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を考え、回転放物面形状の金型に Si 結晶と CFRP を

積層する一体成型によって反射鏡を作成した。さらに宇宙科学研究所と中央大学の X 線ビームラインにて集光、分光、偏光能力の評価実験を行った結果、集光能力に関しては、反射鏡表面の凹凸を抑えることによって反射光を一点に集光させることに成功した。分光能力に関しては、反射鏡の焦点からイメージセンサの位置を d [mm] とすると、エネルギー分解能が $\Delta E/E = 5.6/d$ [%] @ 6.4 keV となるという結論が得られた。偏光性能に関しては、鉄の蛍光 X 線 (6.4 keV) における偏光性能の指標であるモジュレーションファクター (M 値) が 89.9 % 以上を有することがわかった。さらに、銅の蛍光 X 線 (8.05 keV) における M 値が 52.00 ± 3.23 % であることがわかった。本公演では、反射鏡の作成方法と性能評価について詳細に説明するとともに、今後の展望についても報告する。

観測 4

フレア観測のための可視光測光・分光観測望遠鏡の導入

甲原 潤也 (中央大学 M1)

自ら光りを放つ天体である恒星ではフレアと呼ばれる突発的な爆発現象を起し、増光により様々な波長で光を放出することが知られている。フレアは突然起こる現象であるため発生からの観測例は少なく、発生機構については未だ解明しきれていない。当研究室では恒星フレアを発生からすぐ観測するために 2021 年 3 月に新たに可視光測光・分光望遠鏡を設置した。この望遠鏡では測光観測、分光観測の両方が同時に行える。経緯台式の鏡台を用い、鏡筒は 40 cm 口径である。最大の特徴は鏡台の移動速度が早いことであり、秒速 20 度で動き天体の導入が非常に速く行える。全天 X 線監視装置 MAXI のアラートメールを受信し天体情報から観測可能か判断し追観測を行うプログラムを備え、フレアの発生の知らせから素早く観測を開始できる仕組みを構築している。分光観測としては高分散分光器 LHIRE3 を用いる。この高分散分光器はスペクトル領域が 4000~7088 Å で、波長分解能は我々の検証の結果約 19000 となっている。また、6~8 等級の恒星を 1 時間露光で撮像すると S/N 比 100 の画像が得られる。これまで当研究室では高分散分光観測にて自転によるドップラー効果のため輝線の位置がずれる現象が確認できており、今後フレア時の観測により Red wing や Blue wing が確認できると考えられる。また、当研究室にて所有する可視光分光観測望遠鏡 SCAT にて得られる低分散分光観測の結果と合わせたフレアの解析も今後行っていく。現在、当研究室では今秋からの本格稼働に向けた準備中であり、瞬時に追観測を開始できる観測システムの作成を目指している。

観測 5

GEO-X 衛星に搭載する超軽量 MEMS X 線望遠鏡の開発

稲垣 綾太 (東京都立大学 宇宙物理実験研究室 M1)

宇宙 X 線観測では天体の画像を取得し、集光するための望遠鏡を用いる。従来の衛星では、共通の焦点を持つ回転放物面と回転双曲面で 1 回ずつ全反射させることによって集光結像させる Wolter I 型望遠鏡が広く採用されている。そこで我々は、超軽量 X 線望遠鏡の開発を行っている。MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を用いて、厚さ 300 μm の薄い Si 基板にドライエッチングで 20 μm 幅の微細穴を無数に形成し、高温水素アニールによって表面粗さ ~ 1 nm rms に平滑化し、側壁を反射鏡として用いる。平行 X 線を集光させるために基板を高温塑性変形により球面変形させた後、側壁での反射率を上げるために原子層堆積法で重金属を膜付けする。そして、2 枚の基板を重ねて Wolter I 型光学系とする。従来よりも 1 桁以上軽量かつ高性能な望遠鏡を実現可能であり、本手法で世界初の X 線反射結像に成功してきた [1-2]。

我々は現在、超小型衛星 GEO-X (2023 年頃目標) [3] に搭載する望遠鏡を開発している。求められる性能は、広がった視野に対して感度を示す $\text{Grasp} > 10 \text{ cm}^2 \text{ deg}^2$ 、角度分解能 < 10 分角を達成する直径 10 cm、焦点距離 250 mm の X 線望遠鏡である。そのため、化学機械研磨と長時間高温水素アニールプロセスを組み合わせた側壁の端のバリ除去のプロセスを導入し、角度分解能 FWHM ~ 2 分角を達成した。また、光学系の焦点距離を決定する変形プロセスでは、目標とする 1000 mm に対して、曲率半径の誤差を約 100 mm から 70 mm に改善した。さらに、ロケットの打ち上げを想定した音響試験と、宇宙空間において望遠鏡が受ける 3 年分相当のプロトン 100 MeV/u、30 krad 及び重粒子を照射した放射線照射試験を行い、GEO-X 用望遠鏡の試作品はいずれも破損なく耐久性を確認した。本講演では、我々の超軽量 X 線望遠鏡の概要と開発状況について報告する。

1. Ezoe et al. 2006, Appl. Opt. 45, 8932
2. Ishi et al. 2020, Appl. Opt. 13, 087001
3. Ezoe et al. 2018, JATIS. 4, 046001

観測 6

シリコンブラッグ反射型 X 線偏光計の開発

上田 陽功

(東京都立大学 理学研究科 物理学専攻 修士 1 年)

宇宙の X 線観測において、空間分布、スペクトル、時間変動に加え、第四のパラメータとなるのが偏光である。例え

ばブラックホール周辺からの X 線を観測すれば、降着円盤での反射成分の偏光からスピンや幾何学構造に迫ることができる。X 線偏光の最も簡単な測定方式はブラッグ反射の利用であり、最初の宇宙 X 線偏光観測でも用いられた [1]。ブラッグ反射型では X 線の偏光方向による反射率の違いを利用するため、光学系が単純である一方で、ブラッグ条件を満たすエネルギーでなければ、偏光を検出できず、また集光のためには結晶をモザイク状に並べる手間が必要であった。

我々はそこで日本発祥の技術である Si 結晶の高温塑性変形技術 [2] を用いた新しい湾曲 Si ブラッグ反射を考案した。我々はすでに変形 Si 結晶表面での全反射に成功してきたが [3]、新たにこれを偏光計として用いる。高温下でプレスすることで結晶面をずらし、基板全体を自由な形状に加工する。従来のブラッグ反射型の課題であった、限られたエネルギーバンドの問題を、結晶を湾曲してブラッグ角に幅を持たせることで解決し、またモザイク状に並べる手間も基板全体を結晶面を保ったまま変形することができるので不要である。

我々は曲率半径 1000 mm で変形した 4 インチ Si 基板に対して、Fe K_{α} X 線 6.4 keV を照射して、本手法で世界初の偏光測定に成功した [4]。一方で、入射ビームの偏光度には不定性があった。そこでさらに変形前の Si 基板をリフレンスとして用い、3 つのエネルギー (Ti K_{α} 4.5 keV, Fe K_{α} 6.4 keV, Cu K_{α} 8.1 keV) で偏光測定を行うことで、変形後の基板の Fe K_{α} 6.4 keV における M 値を 0.71 ± 0.05 と決定した。 M 値とは偏光性能を占めるパラメータであり、1 に近いほど性能が高いことを示す値である。この値は Si 結晶を利用したブラッグ反射型光学系として従来のものと遜色なく、宇宙観測に用いることが可能である。本講演では我々の手法の原理とこれらの測定結果について報告する。

1. M. C. Weisskopf et al., ApJ, 220, L117-121, 1978
2. Nakajima et al., Nature Materials., 4, 47, 2004
3. Ezo, et al., Applied Optics., 48, 3830, 2009.
4. 上田他、2021 応用物理学会 春季年会

観測 7

FORCE 衛星搭載に向けた X 線ピクセル検出器のトリガー性能評価

山田 龍 (京都大学 物理学第二教室 M1)

我々は次世代の X 線天文衛星計画 FORCE に搭載予定の X 線ピクセル検出器 XRPIX を開発している。現行の X 線天文衛星で広く用いられている X 線 CCD 検出器は読み出しが数 s である。したがって非 X 線バックグラウンドと X 線イベントを区別するために $100 \mu\text{s}$ 程度の間隔でイベ

ントを起こす Veto カウンタを利用することが難しい。それに対して XRPIX は各ピクセルに閾値回路とトリガー機能を実装することで数 μs の高い時間分解能を実現する。XRPIX7 は絶縁層に薄いシリコン層を導入して静電シールドを形成する DoubleSOI 構造を持った大型素子である。我々は FORCE 衛星搭載品と同程度の大きさの XRPIX7 を用いて性能評価と課題の調査を行っている。本研究ではトリガー性能に焦点を当て、射出タイミングと射出時間を制御できるレーザー光を XRPIX に照射した。レーザーによる信号電荷量とトリガー閾値を変化させた際のトリガー信号の遅延と揺らぎの振る舞いについて報告する。

観測 8

超小型 X 線天文衛星 NinjaSat に搭載するガス X 線検出器の開発

林 昇輝 (東京理科大学/理化学研究所 M1)

NinjaSat は 6U (10 cm \times 20 cm \times 30 cm) の超小型 X 線観測衛星で、大型衛星にはできない長時間占有観測、全天 X 線監視装置 (MAXI) が発見した突発天体のフォローアップ観測を目的とする。NinjaSat はガス X 線検出器 (Gas Multiplier Counter; GMC) を 2 台搭載している。X 線の検出効率を上げるため、GMC には Xe/Ar/DME (75:24:1) の、原子番号が比較的大きな封入ガスを採用した。また、ガス中で電子信号を増幅する目的で、ガス電子増幅フォイル (GEM) を利用している。X 線と荷電粒子を、反同時計数法により弁別するために、GMC の信号読み出し部は同心円状に内側と外側に分かれている。

GMC フライトモデル (FM) は予備も含め 4 台製作する予定であり、最初の 1 台に対して GEM の選定と組み込み、性能評価を行った。GEM の電子増幅度には面内ばらつきがあるので、それに起因して、エネルギー分解能が悪化することがわかっている。そこで Ar/CO₂ (70:30) 1 気圧ガスフロー下で、⁵⁵Fe 線源からの 5.9 keV X 線を、フライト品候補の GEM に全面照射することでエネルギー分解能を計測し、最も分解能の良いものを選定した。この GEM を FM GMC に組み込み、Xe/Ar/DME ガスを封入し、⁵⁵Fe 線源を用いて全面照射したところ、エネルギー分解能は内側 $26.9 \pm 0.5\%$ 、外側 $26.9 \pm 1.0\%$ (いずれも FWHM) であった。

ガス中の電子増幅過程には温度依存があるので、NinjaSat GMC では、⁵⁵Fe 較正 X 線源 (5.9 keV) を搭載して、常時エネルギー較正を行う必要がある。エネルギー較正線源は 1 秒あたり 1 カウント程度照射することが NinjaSat からの要求である。試作モデルの ⁵⁵Fe 線源のカウントレートを FM GMC で取得すると、1 秒あたり 1.212 ± 0.026 カウントであった。本講演では、FM GMC の電子増幅度の長期変動

や放電耐性、FM ^{55}Fe 線源の開発状況なども含め、詳細な性能評価について報告する。

観測 9

大面積 CMOS イメージセンサの軟 X 線基礎性能評価

盛 顯捷 (青山学院大学 理工学研究科 理工学専攻 基礎科学コース M2)

本研究では、人工衛星搭載を目的とした、大面積 CMOS イメージセンサ (Complementary Metal Oxide Semiconductor: 相補性金属酸化膜半導体イメージセンサ) の X 線に対する検出性能について調べた。

近年、観測装置の技術的進化によって、重力波やニュートリノなどの天体からの光以外の観測が可能となった。天体からの光と光以外の観測を組み合わせる事で、宇宙の謎を解き明かすマルチメッセンジャー天文学は現代宇宙物理学のフロンティアである。現在、注目されているニュートリノや重力波の観測と光の天文学を結びつける難しさはその誤差領域の大きさである。一般的にニュートリノや重力波観測装置によるイベントの誤差領域は数平方度から数百平方度にも渡る。半導体検出器を用いた X 線検出器は位置分解能に優れ、かつ近年の大面積化と相まって、広い空の領域をカバーする事が可能となってきた。また、X 線という波長帯は可視光などと比べ、圧倒的に天体の密度が小さく、ニュートリノや重力波の光の対応天体と考えられている突発天体の同定に対しても非常に有利である。

X 線の半導体撮像素子としては、X 線 CCD イメージセンサ (Charge Coupled Devices: 電荷結合素子) が多く使用されてきたが、CCD 素子は $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度に冷却する必要がある。そのため、常温で動かす事ができる比較的安価な CMOS は人工衛星への搭載において、非常に魅力的な X 線撮像素子である。そこで、我々は中国の Gpixel 社が開発した CMOS GSENSE シリーズに着目した。GSENSE シリーズの CMOS は紫外、可視光用のイメージセンサであるにもかかわらず、軟 X 線に対して高い検出能力を持つ。昨年リリースされた GSENSE 4040BSI は、 $37\text{mm}\times 37\text{mm}$ の大面積を持つ裏面照射型 CMOS であり、広視野、高感度の X 線検出器の開発に繋がる。

我々は ^{55}Fe 線源を用いた X 線検出性能実験を行い、 $\text{Mn-K}\alpha$ (5.9keV) および $\text{Mn-K}\beta$ (6.4keV) に対する検出性能を調査した。今回使用した CMOS は X 線専用の物ではなく、また常温で動作させたにもかかわらず、X 線天文衛星「すざく」の X 線 CCD とほぼ同等のエネルギー分解能を有している事がわかった。また、CMOS の空乏層および中性領域の厚さを見積り、軟 X 線に対する検出効率を求めた。本講演では軟 X 線における検出性能を中心に、GSENSE 4040BSI

の調査結果について報告し、将来ミッションへの利用について紹介する。

観測 10

X 線天文衛星 XRISM の軌道上時刻較正の測定精度の定量化

阪間 美南 (埼玉大学大学院 理工学研究科 M1)

2022 年度打ち上げ予定の X 線天文衛星 XRISM は、2016 年に運用を終了した X 線天文衛星「ひとみ」の後継機として現在開発が進められている。XRISM に搭載される検出器の一つであるマイクロカロリメーター Resolve の絶対時刻精度要求値は 1 msec と定められている。これを満たすため、XRISM の時刻精度が悪化する原因を 7 つのカテゴリに分け、それぞれに時刻精度の要求値を定めてそれを満たすように各機器を設計し、打ち上げ前に各機器への要求値を満たすか検証する。さらに、打ち上げ後には、中性子星パルサーを用いて、他の X 線衛星や天体観測所との同時観測を通じて、XRISM 衛星全体での絶対時刻精度を較正する。この打ち上げ後の較正観測を、軌道上時刻較正と呼ぶ。7 つのカテゴリそれぞれに割り当てられた要求値のうち、Resolve の信号処理系全体に割り当てられた要求値は 0.5 msec であり、そのうち軌道上時刻較正で満たすべき時刻精度は 0.18 msec である。軌道上時刻較正に用いられる中性子星パルサーは一定の周期で電磁波を放射する天体で、銀河系内だけでも 1000 個以上見つかっている。しかし、その周期や光度は中性子星パルサーによって様々であるため、軌道上時刻較正に適した中性子星パルサーを選定する必要がある。周期や光度、パルス幅による選定から、候補として Crab Pulsar、PSR B0540-69、PSR B1821-24、PSR J1937+21、PSR J0218+4232 の 5 天体が挙げられている。本研究では候補の一つである Crab Pulsar が XRISM の軌道上時刻較正に適しているかどうかを評価するため、以下の方法で評価し、必要な観測時間を推定した。

1. XRISM と設計が同じである「ひとみ」衛星による Crab Pulsar の観測データを用いて、メインパルスのピークフラックスの決定精度が 1% になるときの観測時間と時刻決定精度との相関を取る。
2. その相関から要求値 0.18 msec を満たすために必要な観測時間を推定し、Crab Pulsar が XRISM の軌道上時刻較正に適しているかどうかを評価する。

本講演ではその結果の詳細を報告する。

観測 11

MeV ガンマ線観測衛星 AMEGO 計画におけるコンプトン再構成プログラムのスタディー

末岡 耕平 (広島大学 先進理工系科学研究科 M1)

全天 MeV ガンマ線観測衛星 AMEGO は、2030 年頃の打ち上げを目指しており、マルチメッセンジャー天文学に大きく寄与することが期待されている。AMEGO に搭載される検出器は、両面シリコンストリップ検出器を 60 層に積み重ねた SiTracker、CZT 半導体検出器からなる Low-Energy Calorimeter、CsI(Tl) シンチレーターを 6 層に積み上げた High-Energy Calorimeter で構成され、SiTracker においては主にコンプトン散乱と電子陽電子対生成が生じる。数 100 keV から数 MeV のガンマ線を観測する場合には、コンプトン散乱によりガンマ線光子が落としたエネルギーと散乱した位置から、入射ガンマ線光子のエネルギーと到来方向を求めることができ、この過程をコンプトン再構成と呼ぶ。

AMEGO は全天観測により突発天体現象の観測が可能のため、ガンマ線バーストの観測に適している。ガンマ線バーストは、1 MeV より低いエネルギー帯において強いガンマ線を放射する。この放射メカニズムは未だ解明されていないが、AMEGO によるガンマ線偏光観測によって明らかになる可能性がある。

そこで、AMEGO によるガンマ線バーストのガンマ線偏光観測を検討することを目的として、数 100 keV から 1 MeV における AMEGO のコンプトン再構成の検討を行っている。C++ ツールキットの Geant4 を使用することで AMEGO のモンテカルロシミュレータを作成し、検出器とガンマ線光子の相互作用を模擬した。そして、入射する各ガンマ線光子に対してコンプトン再構成を行うためのアルゴリズムを「ひとみ」衛星 SGD の方法を参考にして構成しつつある。このとき、各ガンマ線光子に対してコンプトン散乱が複数回生じる場合についても考慮している。本講演では、コンプトン再構成プログラムの現状について報告する。

観測 12

新型大気蛍光望遠鏡アレイで用いる光電子増倍管の基礎特性試験

長澤 広武 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

最近の観測により、人類の加速限界をはるかに凌駕するエネルギーを持つ粒子“極高エネルギー宇宙線”が到来していることが明らかになってきた。銀河磁場で曲げられずに地球まで到来していると考えられており、その起源・加速機構を研究することで宇宙の爆発的な極高天体現象の解明へと繋がることを期待される。観測手法としては、極高エネルギー宇宙線が大気中で発する紫外線蛍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用いられている。現行の実験により、

57 EeV 以上の宇宙線における到来方向の異方性の兆候が報告されている。しかし、極高エネルギー宇宙線の到来頻度は極端に少ないため、起源・加速機構の研究には年間観測事象を一桁増やす必要がある [1]。

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る次世代の宇宙線観測実験である。直径 1.6 m の小型光学系と 4 本の直径 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、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ある [2,3]。本講演では、2 基目の新型大気蛍光望遠鏡で使用する光電子増倍管の実験室での基礎特性試験について報告する。

1. R.U. Abbasi et al., ApJ Letters, 790, L21 (2014)
2. M. Malacari et al., Astropart. Phys., 119, 102430 (2020)
3. T. Fujii et al., Astropart. Phys., 74, 64 (2016)

観測 13

MeV ガンマ線観測のための ETCC の性能と SMILE-3 計画

小林 滉一郎 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

天文学の進歩により広いエネルギー領域での観測が進歩している一方、数百 keV から数 MeV のガンマ線の観測は他に比べ遅れている。MeV 領域のガンマ線観測が進まない原因として、宇宙線と観測機器との相互作用、地球大気からのガンマ線・中性子などの雑音事象が存在すること、また、コンプトン散乱優位のために入射ガンマ線のエネルギーや到来方向を失いがちであることなどが挙げられる。これらの状況を打破し MeV 領域での観測が進歩すれば、超新星爆発時からの核ガンマ線の測定による超新星爆発時における元素合成のプロセスの解明や銀河面に広がる長寿命の放射線同位体の分布による元素の宇宙拡散などの解明ができると期待される。我々は SMILE 計画として電子飛跡検出器コンプトンカメラ (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。ガンマ線が ETCC に入射するとガス検出器でコンプトン散乱を起こし、その散乱点、散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点、反跳電子

の反跳方向と運動エネルギーを測定することで、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。そのため多くの雑音ガンマ線をその到来方向から除去可能になり、高いSN比での観測を実現できる。実際、SMILE-2+では高雑音下でかに星雲を有意度4 σ で、銀河中心領域からの放射を10 σ で検出し、MeV領域におけるイメージング分光が実現されたことが示された。

SMILE-3計画では、さらなる検出感度を目指しており、期待される性能(有効面積10cm²、角度分解能5度以下)から、例えば電子陽電子消滅線の放射が銀河面に集中しているか、銀河中心領域にハロー状に分布するものか、切り分け可能になる。SMILE-3ではCOMPTELの検出感度越えも期待され、MeVガンマ線領域の観測の発展が望まれる。本講演では、SMILE-3に求められる有効面積・角度分解能実現のためのガス検出器の開発状況を報告する。

観測 14

ALPACA 実験による銀河系中心付近からの sub-PeV 領域拡散 γ 線観測 横江 諒衡 (東京大学宇宙線研究所 D1)

宇宙線の地上で観測されるスペクトルを横軸エネルギー、縦軸フラックスのグラフにすると、4 PeV の領域で“knee”と呼ばれる折れ曲がりがあることが知られている。knee 領域のエネルギーまで宇宙線を加速させる天体“PeVatron”の存在が考えられている。PeVatron の最大有力候補天体として、超新星爆発残骸が理論的に考えられているが、これを実際に同定した実験は存在しない。

2021年、TibetASガンマ実験において、北天の銀河面付近からの sub-PeV 領域拡散ガンマ線の観測が行われ、同定はできていないが、PeVatron が「存在する」もしくは「存在した」観測結果が得られた [1]。南天の観測に関しては、2016年に H.E.S.S. の銀河系中心付近からの拡散ガンマ線の観測が行われたのを皮切りに、VERITAS(2016年)[2]、MAGIC(2020年)[3]でも同様の観測が行われている。これら観測結果から、銀河系中心付近に宇宙線の加速機構が存在することが示唆されている。しかし、これらの実験のデータは数十 TeV までしか取れておらず、PeVatron の兆候を捉えるには 100 TeV 領域 (sub-PeV 領域) の観測が必要になる。

以上の銀河系中心付近の観測を受け、銀河系中心が視野に入る ALPACA 実験の建設開始が 2022 年に予定されている。この ALPACA 実験を計画するにあたり、空気シャワー粒子を観測することでプライマリーの到来方向及びエネルギーを決定する空気シャワーアレイの配置を検討する必要がある。本発表では、ALPACA 実験の同検出器配置に関し、銀河系中心に対する γ 線感度を評価する。

1. K.Kawata, "First Detection of sub-PeV Diffuse Gamma Rays from the Galactic Disk: Evidence for Ubiquitous Galactic Cosmic Rays beyond PeV Energies", (2021)
2. A. Archer et al, "TEV GAMMA-RAY OBSERVATIONS OF THE GALACTIC CENTER RIDGE BY VERITAS" arXiv:1602.08522v1 (2016)
3. MAGIC Collaboration: V. A. Acciari et al, Astronomy and Astrophysics, "MAGIC observations of the diffuse γ -ray emission in the vicinity of Galactic center" (2020)

観測 15

ALPACA 実験に向けた 2 インチ光電子増倍管の特性調査 川島 輝能 (東京大学宇宙線研究所 M1)

講演者は現在、南半球のボリビアで計画が進行中の ALPACA 実験において、使用を検討している 2 インチ光電子増倍管 (2" PMT) の特性調査に取り組んでいる。

ALPACA 実験はボリビアとメキシコ、日本の共同研究であり、南半球で初の 100 TeV 宇宙ガンマ線の観測を目的としている。ガンマ線は大気分子の相互作用に空気シャワーを発生させる。この空気シャワーを検出するために、チャカルタヤ山中腹標高 4,740 m の位置に、計 401 台の 1 m² シンチレーション地表粒子検出器を 83,000 m² の範囲で設置することを計画している。また、各検出器には 1.5" PMT と 2" PMT を 1 本ずつ使用する。本研究では 2" PMT に焦点を当て、2 つの観点からその特性を調査する。

調査項目の 1 つは、2" PMT の入出力線形性である。一般的に PMT は入力信号の光量が大きくなると、空間電荷効果によってダイノード間の電圧が弱められ、入力信号に対する出力信号の大きさの線形性が破れてしまう。そこで ALPACA 実験では、2" PMT の線形性が損なわれる場合は、比較的ゲインの小さい 1.5" PMT から得られる信号を採用する。従って 2" PMT の線形性の把握は、どの程度の光量まで 2" PMT の信号を採用するかを決める上で重要なことである。

もう 1 つの調査項目は、2" PMT の信号伝達時間の分解能の評価である。ALPACA 実験では、各地表検出器の相対的な検出時間を用いてガンマ線の到来方向を決定する。2" PMT の時間分解能は、観測装置の到来方向決定精度を評価するためのモンテカルロシミュレーションにおいて、パラメータの 1 つとして使用する重要な指標である。

現段階では、予備実験を通じた実験データの理解や解析手順の確認、2" PMT の分圧回路の開発を行なっている。本講演では以上の項目に関して研究進捗を報告する予定である。

観測 16

ALPACA 実験のプロトタイプアレイを用いた南天の 100 TeV ガンマ線天文学の開拓可能性 加藤 勢 (東大宇宙線研究所 D2)

近年、Knee エネルギー領域宇宙線 (~ 4 PeV) の加速天体である 'PeVatron' の直接同定を目指し、北半球において Tibet AS γ 実験 [1]、HAWC 実験 [2]、LHAASO 実験 [3] が、天体からの 100 TeV 超ガンマ線観測を行っている。これまでに複数の PeVatron 候補が発見されているものの、北天に存在する天体数は少なく、銀河系での PeV 宇宙線の加速に必要なエネルギー注入量を説明するには、天体数が不十分である。一方南天では、HESS 銀河面サーベイ [4] により数 TeV \sim 数十 TeV で 100 個近いガンマ線天体が検出されており、幾つかの天体に対して PeVatron を示唆する結果も存在する [5,6]。以上の状況を鑑み、南天での 100 TeV 超ガンマ線観測による PeVatron の直接同定を目的とし、空気シャワーアレイ型実験を用いる ALPACA 実験計画が進行中である。そして 2021 年、プロトタイプアレイである ALPAQUITA 実験の開始が予定されている。本研究では、Monte Carlo シミュレーションを用いて ALPAQUITA 実験のイベント再構成手法・解析条件の最適化を行い、同実験の各種性能を詳細に評価した。その結果、100 TeV ガンマ線に対し、 $\sim 20\%$ のエネルギー分解能、 $\sim 0.2^\circ$ の角度分解能を達成した。また地下の水チェレンコフ型ミューオン検出器を用いて、100 TeV 領域で $\sim 99.9\%$ のバックグラウンド宇宙線除去率を達成し、ガンマ線への感度を 10 倍程度高めることに成功した。さらにこの高いバックグラウンド除去能力により、一年間の観測で、南天の PeVatron 候補天体である HESS J1702-420A [6] からの 200 TeV 超ガンマ線の検出が期待出来、同天体の高エネルギーガンマ線放射機構について議論出来る可能性が十分であると結論付けた。従って ALPAQUITA 実験による観測は、プロトタイプとしての性能実証のみならず、最新のサイエンスの議論を可能とする。本講演では、ALPACA 実験計画及び ALPAQUITA 実験の概要を始め、上記シミュレーション研究の結果や考察について詳説する。

1. The Tibet AS γ Collaboration, Nature Astronomy 5, 460, 2021
2. A. U. Abeysekara et al., Physical Review Letters 124, 021102, 2020
3. Cao, Z., Aharonian, F.A., An, Q. et al., Nature 594, 33, 2021
4. HESS Collaboration, Astronomy & Astrophysics 612, A1, 2018
5. HESS Collaboration, Nature 531, 476, 2016

6. H. Abdalla et al., arXiv:2106.06405v2, 2021

観測 17

CTA-LST 初号機 +MAGIC 同時観測データの解析と新トリガーシステムの実装現状 Joshua Ryo Baxter (東京大学大学院 M2)

銀河系外背景光 (EBL) とは紫外・可視光・遠赤外線領域の背景光である。赤方偏移 z にわたる EBL の強度を測定することで、星や銀河の進化モデル [1] に制限を与えることができる。

MeV-GeV 帯域の観測を担う *Fermi*-LAT は遠方 AGN ($z > 1.5$) から到来する数十 GeV 以上のガンマ線に対する感度が足りておらず、 $z > 1.5$ における星形成率の不定性 [2] は未だ大きいままである。現行 IACT の MAGIC は AGN フレアのような突発現象に対する感度が *Fermi*-LAT の約 10^4 倍 [3] 良いものの、エネルギー閾値が約 55 GeV と高い。遠方領域の EBL の強度推定のためには IACT のエネルギー閾値を下げ、カットオフまで含めたスペクトルの観測を IACT のみで行う環境構築が必要である。

現在、次世代ガンマ線望遠鏡 CTA の大口径望遠鏡初号機 LST-1 の試験運用が開始されている。LST-1 は 20 GeV の低エネルギー閾値 [3] を持つが、単機で運用されているためその感度は隣接した MAGIC を下回っている。そこで、LST-1 と隣接した MAGIC に新トリガーシステムを導入し、LST-1 と MAGIC の同時観測を可能にする計画が進行中である。このシステムにより 2 倍の感度上昇・30 % のエネルギー閾値低下が推定されており、 $z > 1.5$ における星形成率の推定により厳しい制限をつけることが期待される。

新トリガーの実装後、同時観測イベントの解析は、現在開発中のソフトウェアレベルでの解析手法 [5] に基づいて行われる。本公演では、新トリガーを用いた遠方 AGN 観測へ向けた準備として、トリガー導入前に LST-1 と MAGIC で同時観測された 1ES 0647+250 と PG 1553+113 の解析結果について報告する。さらに新トリガーシステムの実装状況、解析パイプラインの構築現状、トリガー導入後の観測計画について発表する。

1. M. Hauser, et al., A&A 2001, 39, 249
2. Robertson et al. 2015 ApJ, 802,19
3. cta-observatory.org/science/cta-performance/
4. cta-observatory.org/science/cta-performance/
5. Y. Ohtani, et al., Proceedings of Science, ICRC, 2021. (in prep.)

観測 18

CTAにおけるガンマ線とハドロン事象の弁別について 三輪 柁喬 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

高エネルギー天体の現象を調べる際の主な情報源は、それらが放射する宇宙線や電磁波である。その中でも特に、電荷を持たないガンマ線は磁場の影響を受けずに地球に到達するため、到来方向の情報を得られるという意味で非常に重要である。

このガンマ線観測手法の一つに、解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) が挙げられる。高エネルギーのガンマ線や宇宙線が地球大気に入射すると、大気中の原子核との相互作用により2次粒子が生成される。さらにこの2次粒子も連鎖的に相互作用を起こすことにより、大気中には大量に2次粒子が生成されていく。このような現象を空気シャワーと呼び、増殖した荷電粒子がチェレンコフ光と呼ばれる光を放出する。IACTはこのチェレンコフ光を集光し、カメラに入射した光子数を測定する。測定結果はパラメータ化され、シャワー像の明るさと形状から、ガンマ線のエネルギーや到来方向を推定し、また背景事象の除去を行う。

主な背景事象としては陽子等のハドロンがあり、空気シャワーが発達する際の形状の違いに注目してガンマ線との区別を行う。両者とも大気中で空気シャワーを生成するものの、ガンマ線が生成する電磁シャワーと陽子が生成するハドロンシャワーでは、特に横方向の広がりが大きく異なるという違いがある。

現在観測が行われている IACT には H.E.S.S.、MAGIC、VERITAS などがあるが、それらの 10 倍以上の感度を持つ大気チェレンコフ望遠鏡群として現在建設されているのが、Cherenkov Telescope Array (CTA) である。感度を上げるための工夫はいくつかあるが、本発表では、特に前述したガンマ線とハドロン事象の弁別について、より詳細に説明を行う。

観測 19

CTA 大口径望遠鏡のための SiPM カメラの開発 橋山 和明 (東京大学大学院 修士 2 年)

パルサーは高エネルギー粒子の加速源候補として知られているが、加速機構についての明確な理解は無い [1]。ガンマ線によるパルサー観測は、衛星望遠鏡による直接観測と地上大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) による間接観測で行われてきた。しかし、数十 GeV 以上のエネルギー帯におけるパルサーのガンマ線フラックスは小さく、現行の望遠鏡では感度が不足している。そのため、多くのパルサーで数十 GeV 以上のパルス検出に至っていない [2]。

衛星望遠鏡は有効面積が小さく、フラックスが小さい GeV ガンマ線の観測には不向きである。そのため、IACT の感度向上が数十 GeV 以上のパルス検出に重要となる。ガンマ線が地球大気に入射すると、大気と相互作用し、チェレンコフ光を放射する。IACT はこれを望遠鏡の焦点面カメラで撮像することで間接的にガンマ線を観測している。IACT においては、角度分解能や集光性能に加え、ガンマ線とハドロンの弁別性能が望遠鏡の感度を決定する。それは、陽子などのハドロンからもチェレンコフ光が生じるためである。

現在、大中小の口径の異なる IACT からなる次世代ガンマ線天文台 CTA の建設が進んでいる。既に GeV 帯に感度を持つ大口径望遠鏡 (LST) の初号機は完成しており、試験観測中である。LST のカメラには光電子増倍管 (PMT) が採用されている。LST の感度をさらに向上させる手段として、ピクセルの細分化が挙げられる。ピクセルの細分化によって、ガンマ線とハドロンの弁別性能の向上が見込めるからである。さらに、ピクセルを細分化させるにあたって半導体素子 SiPM の採用が可能となる。SiPM は PMT の約 1.5 倍の量子効率を持ち [3]、望遠鏡の光検出効率が大きく改善する。本講演では、SiPM カメラの LST への搭載可能性を検討するために行った SiPM の基礎特性評価についての成果を報告する。

1. E.Aliu et al., Science, 322, 1221–1224, 2008
2. A. A. Abdo et al., The Astrophysical Journal Supplement Series, 208, 17–76, 2013
3. C.Perennes et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 984, 164485, 2020

観測 20

FPGA のみで実現する完全デジタルな電波分光計 (ARDS): 傾斜型 ADC シミュレータの開発 松英 裕大 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙学専攻 M2)

我々は傾斜型 ADC と FFT 演算器を同じ FPGA 上に実装し、1 チップで構成できる電波分光計 (ARDS) の開発に取り組んでいる。この方式を利用することで部品点数を少量化でき、低コストで広帯域な分光計を製作できる。現時点では FPGA 評価ボードの PYNQ-Z1 (Digilent 社) に 600 MSPS, 6.6 bit の ADC と 1024 点の FFT を搭載した試作機 (Nishimura et al, PASJ 2021) が完成し、Orion KL に対して行った実証試験で観測に成功している。一方で傾斜型 ADC は時間・電圧の量子化間隔が不均一なため、ENOB

や SFDR の低下が起こる。現時点での試作機はまだこれらの指標が低い(それぞれ 1.4 bit, -19.9 dBc @63 MHz)、観測に影響する可能性がある。本講演では Python を用いて作成した傾斜型 ADC の動作シミュレータについて報告する。このシミュレータは傾斜型 ADC の振る舞いへの理解を深めることで上記の課題の解決策を模索し、今後の広帯域化に備えるために製作した。仮想的な入力信号と参照信号の時系列電圧値を与えることで傾斜型 ADC の演算を再現し、得られる分光スペクトルを導出するものである。試作機に信号発生器からの信号を与えた際に発生するスプリアスの発生周波数・強度と SFDR について、シミュレータを用いて導出した結果と良く一致することが確認できている。今後はこのシミュレータを利用して 1. 最適な参照波の形状や 2. タイムインターリーブを実装した際にどの程度性能が向上するか の 2 点について検討を行いたいと考えている。また、S/H 回路を実装した場合の挙動や ENOB, SFDR が悪い場合、サイエンス観測での観測効率にどう影響を与えるかについても検証を行う予定である。

観測 21

ひきずり 3 点法による鏡の形状計測の精度評価 徳地 研人 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

天体望遠鏡に使われる鏡は、その形状精度が望遠鏡の結像性能に直結するため、 $\lambda/10$ 程度の非常に高い精度での、メートルサイズの鏡の加工と形状計測が求められる。近年では、鏡の形状計測には、干渉計が使われることが多いが、これは、対象面と形状既知の参照面の 2 つについて、反射波を干渉させる、という手法である。干渉計の精度は望遠鏡の光学系の仕様を十分満たしているが、凹面鏡の場合は、その焦点距離に対応した自由空間を確保する必要があり、凸面鏡の場合は、反射光が拡散するため、鏡と同サイズ以上の参照面を用意する必要がある [1]。いずれにしても、測定装置の巨大化が避けられず、コスト面で課題になっている。

我々は、より汎用的で廉価なシステムで、且つ高精度の形状計測が可能な方法として、センサを鏡面上で引きずる方式の逐次 3 点法による形状計測方法の開発に取り組んできた。3 つのセンサの値から局所的な曲率を求め、それを測定パス上で順次繰り返すことで断面形状を算出する、という手法である [2]。また、従来の逐次 3 点法と違い、鏡面に接触しながら測定を行うため、精密な機械制御を必要としない他、自由曲面の計測が可能といった利点がある。既に先行実験により、平面鏡の形状計測にて、 $RMS = 7.0\text{nm}$ の精度を達成しており、任意の点で曲率が等しい球面でも同様の精度が達成できると思われる。しかし、放物面や軸外し面、その他の自由曲面の場合は、測定点によって曲率が

異なってくるため、測定点の誤差が結果に与える影響が懸念される。

そこで、具体的な検討として、京都大学のせいめい望遠鏡の副鏡(放物面)のパラメータを用いて、鏡面計測の際に起こりうる誤差について数理解析を行い、その許容範囲について考察した。本講演では、ひきずり 3 点法の計測原理の紹介と、せいめいの副鏡を用いた誤差の数理解析について紹介する。

1. Jiang et al., SPIE, Volume 8450, pp 11, 2012.
2. Gao et al., Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology 26, pp 279-288, 2002

観測 22

補償光学系 Tip-Tilt 補正の性能評価 赤澤 拓海 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M1)

天体を地上から撮像する場合、大気揺らぎによって光の波面が乱れ、像がぼやけてしまう。このような乱れた波面を補正しハイコントラストの像を得るための技術を補償光学 (Adaptive Optics, AO) という。

補償光学系は、波面の乱れを検知する波面センサー (WaveFront Sensor; WFS)、表面を変形し波面の乱れを補正する可変形鏡 (Deformable Mirror; DM)、WFS で検知した波面から DM に与えるべき変形量を計算し信号を送る制御システムの 3 つから構成されている。この 3 つの間でループを回すことで、時々刻々と変化する大気揺らぎに対応した補正を行うことができる。

波面収差は Zernike 多項式という直交多項式で展開され、各モードが光学系の収差の特徴に対応している。その中で最も低次のモードは Tip-Tilt 成分と呼ばれ、天体像で見ると重心位置の移動に相当する。そして観測条件によっては、Tip-Tilt 成分を補正するだけで大気揺らぎの影響の多くを取り除くことができることがわかっている。

本研究では Tip-Tilt のみを補正する DM を採用した光学系を組み上げ、その性能を評価するために MATLAB というソフトを用いて光学系をシミュレーションで再現し、最適化することを目標にしている。今回は現在の研究の進行状況について発表する。

観測 23

「超々小型衛星群による超大型光学望遠鏡のための回折光学素子の設計開発」

森下 弘海 (東京都立大学 理学研究科 物理学 専攻 宇宙物理実験研究室 M1)

宇宙における最初の天体の探査や、大地や海を識別できるレベルの超高解像度での系外惑星の直接撮像は、現代天文学の大きな課題の一つである。この課題に対して、我々は km を超える口径を持つ超大型宇宙望遠鏡の実現を目指している。このような大口径の宇宙望遠鏡の実現は、技術的にチャレンジングであるだけでなく、莫大な費用が必要である。我々はその実現に向け、1つ1つが数 10 cm の大きさを持つ超々小型衛星群を数百万個飛ばし、各々に回折光学素子を搭載することで、フォーメーションフライトによる大口径の望遠鏡を実現することを検討している [1]。我々は Fresnel interferometric imager [2] をモデルにした、地上での基礎実験を開始した。超々小型衛星に搭載する回折光学素子を半導体パターン用フォトマスクで作成し、離れた位置にある 2 つの回折光学素子による合成結像が実現できるかを検証する。フォトマスクの材質は合成石英であり、表面に黒色 Cr を成膜することで、任意の設計したパターンを形成できる。設計パターンは焦点距離 1000 mm (波長 632.8 nm 用) のフレネルゾーンプレート (FZP) であり、光軸対称に配置された 1 辺 60 mm の正方形 2 枚を切り出すことで、それらのペアによる合成結像を実験的に検証する。我々はマスクパターンの設計を、シミュレーションで性能を評価した。本講演では超々小型衛星計画の概念と実験の現状について報告する。

[1] 野田篤司, "超々小型衛星群による軌道上再構成システムの検討", 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 2020 年 [2] Koechlin, Laurent, et al. "The Fresnel interferometric imager." *Experimental Astronomy* 23.1 (2009): 379-402

観測 24

三点支持による大型鏡面の超精密研削 橋ヶ谷 武志 (京都大学 M2)

光赤外望遠鏡の鏡に要求される形状精度は数十ナノメートル (観測波長のおよそ 1/10) である。鏡の加工では固定砥石による高速な研削につづき遊離砥粒による修正研磨が行われる。研削加工では砥石の軌道 (位置) が鏡面に転写されるため、鏡は強固に保持される。しかし、保持治具の熱変形や保持による応力は予測不能な変形を鏡に引き起こす。特にせいめい望遠鏡の主鏡のように薄い鏡 (アスペクト比 30) では深刻である。そこで、我々は主鏡の鉛直方向を裏面の 3 点で支持する方法を提案した。3 点支持では研削抵抗によって鏡が $\sim 3 \mu\text{m}$ 変形するが、研削抵抗を予測できれば、有限要素解析によって変形量をシミュレートすることで、補正研削が可能となる。しかし、研磨加工の際に縁ダレが生じた。

そこで、我々は鏡の周囲にヤトイと呼ばれる余剰な領域を付加した上で研削・研磨し、最後にヤトイの部分を切断することで、縁ダレの抑制を試みた。それに伴い、ヤトイ材が付加した状態での研削抵抗による変形を有限要素解析で再検討した。解析の結果を研削後の鏡と比較したところ、研削抵抗は 28N、変形量は最大で $2.5 \mu\text{m}$ であることが推定され、おおむね 400nm の精度で実測値を再現できることが分かった。したがって、この精度の補正研削と研磨加工の短縮が期待できる。なお、この精度には加工誤差と計測誤差も含まれる。本講演では、以上の検討と解析結果の詳細について述べる。

観測 25

高赤方偏移銀河の干渉計データを用いたスパースモデリングによる超解像イメージング 今村 千博 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

ダストは宇宙再電離期の銀河において、金属量や星形成史を理解する上で大きな役割を果たす。 $z = 8.312$ にある銀河 MACS0416_Y1 は、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) の band 7 の観測データからダストの放射が報告されており、約 0.3Gyr 前から重元素の合成が行われてきたことが示唆されている [1]。この銀河のダストの放射を用いた更なる解析には、より空間分解能の高い観測が必要である。しかしながら、従来より用いられてきた CLEAN アルゴリズムによる干渉計データの画像復元では、PSF (点拡がり関数) による制約が存在するため達成できる空間分解能に限界がある。近年、スパースモデリングによる干渉計データの画像復元によって、従来よりも高品質な天体画像を得られることが注目されている。この手法は、天体の輝度分布がスパースかつ滑らかであるという仮定のもとで、天体の構造を高品質に推定する統計的手法であり、M87 の中心に存在する超大質量ブラックホールの直接撮像の際にも用いられた [2] 有効な手法である。

本講演ではスパースモデリングを用いた原始惑星系円盤 HD 142527 の低品質データの超解像イメージングにより、このデータより約 3 倍高品質なデータを CLEAN でイメージングした天体画像と無矛盾な画像が得られ、PSF より詳細な構造を推定したことについて報告された論文 [3] のレビューを行う。また、この研究で用いられたスパースモデリングによる干渉計データのイメージングツール PRIISM を用いて現在私が行っている ALMA の band 7 のデータによる MACS0416_Y1 のダストのイメージングの研究を報告する。

1. Tamura et al., *The Astrophysical Journal*, 874, 13, 2019

2. Event Horizon Telescope Collaboration et al., The Astrophysical Journal Letters, 875, 17, 2019a
3. Yamaguchi et al., The Astrophysical Journal, 895, 14, 2020

観測 26

CMB 偏光観測に用いる回転アクロマティック半波長板の開発および性能評価

杉山 純菜 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

宇宙背景放射 (CMB) は宇宙を満たす最古の電磁波であり、初期宇宙や宇宙の進化についての情報を豊富に含んでいる。インフレーション理論によると、宇宙初期の指数関数的膨張が原始重力波を発生させ、原始重力波は CMB を B モードと呼ばれる奇パリティのパターンに偏光させる。この原始重力波の B モード偏光を観測することで、インフレーション理論を実験的に裏付けることができる。偏光信号の前景放射は、高周波数帯ではダスト放射、低周波数帯ではシンクロトロン放射があり、CMB の偏光信号を測定するためにはこれらを除去する必要がある。次世代地上 CMB 観測実験 Simons observatory (SO) では、偏光を精密に観測するために直径 50 cm の「回転アクロマティック半波長板」という光学素子を用いた変調器を使用する。変調器は入射信号のうち偏光信号のみを変調し、(1) 無偏光の大気ノイズより高い周波数帯に入射偏光信号を変調することで大気ノイズの影響を低減する、(2) 入射偏光と望遠鏡内で生じた偽偏光を区別する、(3) 1つの検出器で直交する両偏光を検出できるため、2つの検出器を用いた場合に生じる感度の違いによる系統誤差を避けられる、という恩恵をもたらす。アクロマティック半波長板 (AHWP) の特徴は広い周波数帯で偏光を変調できることであり、CMB、ダスト放射、シンクロトロン放射を観測する3つの周波数帯についてそれぞれ開発する。本講演では、3つの周波数帯における AHWP および変調器全体の開発状況について報告し、開発における課題とその解決方法について述べる。

観測 27

CMB 偏光観測に用いる広帯域多層反射防止膜の製作と光学性能評価

坂栗 佳奈 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M2)

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は宇宙誕生後約 38 万年から届く宇宙最古の電磁波であり、初期の宇宙が指数関数的な膨張を起こすインフレーションの情報を持つ。インフレーション中に生成される原始重力波を観測し、B モード偏光と呼ばれる特殊な偏光パターンを測定できればインフレーションの証拠となる。最大規模の地上 CMB 実験である Simons Observatory(SO) 実験では、B モード偏光を世界最高感度で測定することを目指している [1]。

高精度な CMB 実験の実現に向けて、近年光学系由来の系統誤差を低減する装置開発が進められている。本研究では、特に、望遠鏡に用いられる光学素子の半波長板用サファイアや IR フィルタ用アルミナのための反射防止膜 (AR coating) の開発を行った。サファイア・アルミナは屈折率が 3.1 程度と大きく、そのままでは多くの光を反射してしまうため、届いた信号を最大限検出器に送るための AR coating の開発が必須となる。CMB 観測の周波数帯で比帯域が 30% 程度の広帯域の AR coating を実現するには、多層かつ各層の厚さを数十ミクロンの単位で調整する必要がある。さらに、素子を低温で用いるため、冷却で剥離しないコーティングの作製と低温での性能評価が不可欠である。本講演では、最適なコーティングの開発と性能評価状況について述べる。

1. The Simons Observatory Collaboration, J.Cosmol.Astropart. Phys. 056 (2019)

1. The Simons Observatory Collaboration, J.Cosmol.Astropart. Phys. 056 (2019)

観測 28

波長可変レーザーによる三次元評価システム開発 池本 拓朗 (総合研究大学院 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻 M1)

インフレーション理論が正しいとすると、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic microwave background :CMB) は E-mode と B-mode と呼ばれる 2 種類の偏光が存在する。E-mode 偏光は主に宇宙初期の密度ゆらぎを起源とし、B-mode 偏光は原始重力波を起源とする。それぞれが異なる起源をもつので、B-mode 偏光には原始重力波の信号が含まれ、そこから宇宙初期の情報を読み解くことができる。そのため、CMB の観測は非常に重要なものとなっている。地上でも CMB の観測実験は行われているが、地上の場合、大気中の塵や水蒸気といったノイズからの影響を除去する事が難しい。そこで、地上を離れ人工衛星を用いた宇宙空間での、より高感度な CMB 観測を実現させる為に観測衛星 LiteBIRD 計画が提案された。また、宇宙空間での観測は全天観測を可能とし、よりインフレーションの観測に特化した観測を実現させる。LiteBIRD は宇宙科学研究所により戦略的中型 2 号機に選定され、2020 年代後半での打ち上げを予定している。LiteBIRD に搭載する予定の超伝導転移端センサー (TES) ボロメータは、その高感度さ故に CMB だけでなく宇宙線の影響も受けてしまう。対応策として、宇宙線由来のノイズを可能な限り低減する特別なデザインのセンサーが現在日米の共同で開発されつつある。

ただ、実験室で実際の宇宙線を用い、検出器の性能を評価することは現実的ではない。そこで、宇宙線の代わりとしてレーザーを照射するシステムの開発が行なわれている。本発表では、開発の初期段階として実施する常温で動作する半導体検出器を用いた性能試験について報告する。

観測 poster1

Pictor A 西側ホットスポットを用いた *Chandra* ACIS 検出器の低エネルギー応答の再検討 森本 有咲 (埼玉大学大学院 理工学研究科 M1)

活動銀河核 (AGN) には両極にプラズマ流のジェットが噴き出され、その末端にホットスポットが観測されるものがある。ホットスポットでの電子や磁場のエネルギーは、ジェット活動やジェットと銀河間物質との相互作用を探る重要な指標となる。Pictor A もジェットをもつ AGN の一つで西側にはホットスポットが観測されているが、このホットスポットから興味深い振る舞いが報告された。すなわち、*Chandra* 衛星の ACIS 検出器で観測されたこのホットスポットからの X 線放射には数年という短い時間スケールでの変動が見られたというのである [1]。この時間変動が実際に起こっているのであれば、それはこのホットスポットでの電子や磁場のエネルギー推定にも有益な情報を与える。しかしながら同時期に観測された超新星残骸 E0102 も、有意ではないものの、似たような変動を示していた。すなわち、ホットスポットで観測された変動は天体ではなく検出器由来のものである可能性があり、慎重な検討が必要である。そこで本研究では、Pictor A ホットスポットの観測時期の異なるデータのスペクトルを詳細に調べ、変動が 1 keV 以下の帯域でより大きいことを見いだした。これを定量的に評価するために、中性ガスによる光電吸収を受けたべき関数型の連続放射モデルを用いて X 線スペクトルを評価した。その結果、星間吸収のパラメータである水素柱密度の変動のみで、光度変動を説明できることがわかった。ホットスポットは、数 100 pc のサイズを持っていると考えられるので、数年で吸収がこれほど変動するとは考えにくい。また変動は、柱密度の単調増加として現れているので、むしろこれは検出器入射面に蓄積する分子コンタミネーションが、検出器チームが推測した速度より早く進んだと考えるほうが自然に理解できる。講演では、今回見つけた分子コンタミネーションの影響を、キャリブレーション論文で示された予測と比較して議論する。

1. M. J. Hardcastle, E. Lenc, M. Birkinshaw, J. H. Croston, J. L. Goodger, H. L. Marshall, E. S. Perlman, A. Siemiginowska, L. Stawarz, D. M. Worrall, MNRAS, 455, 3526-3545, 2016

観測 poster2

私は如何にして X 線天文衛星用 CdTe 半導体検出器を医学イメージングに用いる事になったか 南 喬博 (東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 M2)

我々は、宇宙観測や医学イメージング分野などの様々な分野への応用に向け、硬 X 線イメージャーである CdTe 半導体両面ストリップ検出器 (CdTe-DSD) の開発を行っている。CdTe-DSD は、元々 ASTRO-H 衛星など宇宙観測に向けて開発された検出器であり、5-80 keV に感度を持ち、約 10.0 cm² の大きな検出面積と優れたエネルギー・位置分解能を持つ。この検出器には、各面 128 本のストリップ上の電極が 250 μm 間隔で直交するように配置されており、入射した X/γ 線により発生する電子・正孔を各面で検出し両面の情報を取得することができる。

医学研究において、小動物に放射性元素でラベリングした薬剤を注射し、特定の臓器や腫瘍に集積した元素からの X/γ 線を撮像する実験が非常に重要であり、短時間に、高い画像分解能でその集積を撮像するための高感度検出器が求められている。しかし、現状において、シンチレーション検出器が用いられることが多く、ピークの近い複数の放射性元素の使用が制限されたり、位置分解能の不足から細かな集積イメージが取得できない等の課題がある。我々は、CdTe-DSD の利点を活かすとともに、新たな高効率化を目指した検出器の開発、性能評価を通じて、これらの課題解決を目指している。

医学研究で要求されるイメージング検出器の性能、あるいは解析技法は、これまで宇宙観測で用いられてきたものと異なるものもあり、その要求を満たすことで、検出器のさらなる向上がみこまれる。それが、さらに宇宙観測のためのセンサー技術の進歩につながることを期待される。本講演では、このような「技術循環」についても述べる。

CdTe-DSD の開発の現状と、いかにしてそれを医学分野へ応用するようになったか、そして今後の展望について報告する。

観測 poster3

超小型 X 線天文衛星 *NinjaSat* に搭載するアナログ信号処理基板の開発 大田 尚享 (東京理科大学/理化学研究所 M1)

超小型 X 線衛星 *NinjaSat* は、6U 規格の CubeSat であり、2022 年の打ち上げを予定している。大型衛星では困難だった特定の明るい X 線天体の長期観測や、全天 X 線監視装置 MAXI などが発見した突発天体を起動性を活かして追観測することを主な目的としている。1U サイズの非撮像型

ガス X 線検出器 (Gas Multiplier Counter; GMC) を 2 台搭載している。観測エネルギー帯域は 2-50 keV、5.9 keV のエネルギー分解能は 20% を予定している。X 線とガスの光電効果により発生した電子を、ガス電子増幅フォイルにより電荷増幅する。その電荷を前置増幅器により電圧信号に変換し、後段のデータ取得 (Data Acquisition; DAQ) ボードへ送る役目をするのがアナログ信号処理基板 (Front-end card; FEC) である。FEC は 1U サイズに収まる $9 \times 9 \text{ cm}^2$ の基板で、GMC への高電圧印加も担い、運用時の最大消費電力は、2 チャンネルあるアナログ信号処理部を含め、約 130 mW である。

エネルギー分解能に影響する電圧信号の S/N 比向上のため、DAQ ボードに信号を送る前に、FEC 上でオペアンプを用いて信号増幅を行う。当初は片側 +5 V 電源の非反転オペアンプ回路を用いていたが、出力信号が 100 mV (5 keV 相当) 以下の領域で入力に対する出力が非線形になり、低エネルギー側の信号取得に影響が出るという問題が生じた。5 keV 以下は有効面積が大きくなる領域なので重要である。そこで、2 つの反転増幅回路を組み合わせることにより、100 mV 以下の信号を正しく出力できるようにすることで、0-1 V の全ダイナミックレンジに渡り、非線形性を改善することができた。また、増幅回路を変更したことで、付随する受動素子のパラメータも変わったが、信号波形が変化しないように値を最適化した。

さらに、FEC 以外のコンポーネントと組み合わせるときに検出器としての性能に問題がないかを検証するため、実際に FEC を GMC と DAQ に接続した状態で、高電圧の印加と信号の読み出しを確認する統合試験も実施した。これらの結果についても本講演にて報告する。

観測 poster4

解像型大気チェレンコフ望遠鏡による大天頂角ガンマ線観測

阿部 正太郎 (東京大学理学系研究科 M2)

暗黒物質の正体は宇宙物理学と素粒子物理学両分野において議論となっている。有力視されている暗黒物質候補として、数 100 GeV から数 10 TeV 程度の質量を持つ TeV スケール新素粒子がある [1]。

暗黒物質探索手法の中でも特に、MAGIC や H.E.S.S. など解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACTs) による、天の川銀河中心領域からのガンマ線観測は、TeV スケール新素粒子を着実に検証してきた [2]。しかし、発見には至っておらず、感度向上が必要である。

複数の IACT からなる次世代地上型ガンマ線望遠鏡 CTA の北半球サイトは、MAGIC と同じ天文台にて現在建設中である。現在、CTA 大口径望遠鏡 1 号機 (LST-1) が完成

し試験運用中である。また、MAGIC と LST-1 による同時観測計画が進行している [3, 4]。

北半球に位置する MAGIC と LST-1 は、南半球に位置する H.E.S.S. と比較して、銀河中心領域の観測を大きな天頂角 (小さな仰角) で長時間行うことができる。IACT の観測特性として、大天頂角観測はガンマ線に対する有効面積が大きくなるため、特に数 TeV 以上のエネルギー帯において一般にガンマ線感度が向上する [5]。

本講演では主に MAGIC の銀河中心領域観測に関する論文 [5, 6] に基づき、IACT による大天頂角観測について概観する。

1. G. Jungman, et al., Physics Report, 267, 5-6, 195-373, 1996.
2. H.E.S.S. Collaboration, Physical Review Letters, 120, 20, 201101, 2018.
3. F. Di Pierro, et al., Proceedings of Science, ICRC, 2019.
4. Y. Ohtani, et al., Proceedings of Science, ICRC, 2021. (in prep.)
5. M. L. Ahnen, et al. Astronomy & Astrophysics, 601, A33, 2017
6. MAGIC Collaboration, Astronomy & Astrophysics, 642, A190, 2020.

観測 poster5

雷活動に由来するガンマ線の観測プロジェクト : 2021 年 1 月の gamma-ray glow のコリメータスペクトルの詳細解析

大熊 佳吾 (名古屋大学 M1)

自然界における粒子加速にはまだわかっていないことが多い。雷活動では、雷雲中の静電場によって相対論的速度まで加速され雪崩増幅した電子による制動放射ガンマ線が観測される。そのエネルギーは 30 MeV にも達し、磁場の関与しない自然界で唯一観測可能な静電場による粒子加速として注目されている。[1] 特に数十秒-数分間に渡って続く放射は gamma-ray glow と呼ばれているが、放射の起源となる電子加速域のサイズや高度、それが数分にわたって安定に存在するメカニズムや発生・消滅条件はまだ詳しく分かっていない。

2021 年 1 月 9 日に観測された gamma-ray glow について、高度測定用検出器 GOOSE を用いた上向き、傾き +/-30 度のコリメータ検出器 3 台とコリメータのない検出器 1 台の計 4 台で MeV 電子からの制動放射ビーミングのスペクトルが得られたが、上空から電子を真下方向に照射した大気伝搬のシミュレーションと比較するとビーム角に広がり

あることが示唆された。[2]

本研究では、観測で得られたスペクトルを詳細に解析し Geant4 による検出器応答も含めたシミュレーションと比較することにより、電子加速領域の終端高度やビーム開口角の広がり制限を調べた。

1. Gurevich, A., Milikh, G., and Roussel-Dupre, R. 1992 “Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm,” Physics Letters A 165, No. 5, 463 - 468, DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(92\)90348-P](https://doi.org/10.1016/0375-9601(92)90348-P).
2. 久富章平, 「雷雲中の電子加速器の誕生消滅の観測とその高度測定用検出器の開発」, 修士論文, 名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻, 2020

観測 poster6

ROS 2 を用いた電波望遠鏡制御のための分散コンピューティングシステムの負荷試験 西川 薫 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

電波望遠鏡の制御システムは同時に多数の機器と通信し、大量のデータを適切に扱う必要がある。我々はロボット制御のためのオープンソースのフレームワークである Robot Operating System (ROS) を用いることで、望遠鏡全体を統一的に扱える制御システム NECST (NEw Control System for Telescope) を開発し、大阪府立大学 1.85-m 望遠鏡および NANTEN2 望遠鏡の柔軟なシステムを実現している (Nishimura+2020a)。

ROS は node と呼ばれる小さなプログラムを組み合わせてシステムを構成する。node 同士は多対多通信で情報をやりとりするため、機能の追加や変更が容易にできる。しかし従来の ROS (ROS 1) の多対多通信は TCP による 1 対 1 通信を多数確立することで実装されているため、NECST の開発においても通信量の過多が表面化してきた。ROS 2 では通信方式が UDP をベースに通信の質を指定するパラメータ Quality of Service (QoS) を実装した Data Distribution Service (DDS) に変更されたため、多対多通信が増加した場合にも通信量の増加が抑えられるようになった。さらに個々の通信の質もユーザーが設定できるようになり、NECST をネットワークの状態に左右されにくく、より冗長性の高いシステムへと更新することが可能となる。

そこで我々は ROS 2 を用いた新しい NECST の設計を行った。新 NECST はシミュレータモードを含めることでさらに開発のしやすいシステムとする。これまでに行った性能試験で ROS 2 の 1 対 1 通信における遅延は ROS 1 と同等であることが確認された。今後は多数の PC を使い、実

際の望遠鏡システムに近い環境での負荷試験を行った上で、通信の信頼性等についても確認を進める予定である。

観測 poster7

インドネシア近赤外撮像カメラの設計と評価 黒須 公人 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

現在、岡山にある 3.8m せいめい望遠鏡の姉妹機を、インドネシアに建設する計画が進んでいる。我々は、このインドネシア望遠鏡に設置予定の近赤外撮像カメラ (以下、近赤外カメラ) の開発を行っている。インドネシアで赤外観測を行うことは、南半球という立地を活かし、銀河系中心の観測が可能である点において特に有意義である。本装置では、Y (1020nm)、J (1220nm)、H (1530nm) の 3 バンドでの観測において、視野 8.7 分角、ピクセルスケール 0.4 秒角の画像を得ることを目標にしている。近赤外カメラは、光を平行光に直すコリメータ系と検出器に結像させるカメラ系に分けることができ、現在は設計済みのコリメータ系の評価とカメラ系の設計とを同時並行で進めている。

赤外観測においては、スカイだけでなく、装置自体からの熱放射がノイズになってしまうという問題がある。装置の赤外線放射を低減するためには、真空・冷却の環境下 (~270K) にカメラ系を固定する必要がある、外部からの熱伝導や冷却による熱収縮を考慮した上で設計を行うことが重要である。我々は、断熱板として赤外装置によく用いられるガラスエポキシ板をカメラ系の周囲に風車状に配置し、固定する方法を採用した。

また、高い結像性能を得るためには光学系を構成するレンズ群の光軸が一致することが理想であるが、実際には組み立ての際に各レンズにずれが生じてしまう。そこで、各レンズで組み立ての許容誤差を設定し、許容誤差内で組み立てられることを確認するためにレーザーを用いたアライメント実験を実施した。コリメータ系で結果の評価・検討を行ったところ、許容誤差内で組み立てられることを確認した。

本講演では、赤外カメラの概要と設計の進捗を説明するとともに、アライメント実験の測定方法と結果について発表する。

観測 poster8

CMB 偏光観測実験に用いる偏光角較正装置の開発 飯島 健五 (東京大学理学系研究科物理学専攻)

宇宙再電離期に生成された宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) の偏光は偶パリティの E-mode 偏光と奇パリティの B-mode 偏光からなる。B-

mode には原始重力波由来の情報が刻印されていると考えられており、CMB の B-mode 偏光観測に成功すれば初期宇宙の指数関数的膨張「インフレーション」の決定的な証拠となる。

CMB 偏光のほとんどは E-mode 成分であり、B-mode 成分は E-mode 成分の 1/100 倍以下であると見積もられている。また、角度較正を見誤ると E-mode から B-mode への漏れ込みが生じるため、角度較正の不確かさが作る B-mode 偏光成分への不確かさは非常に大きい。従って高精度での B-mode 観測において角度較正は非常に重要な役割を果たす。次世代 CMB 実験である Simons Observatory(SO) では偏光光源として金属ワイヤーを平行に張ったワイヤーグリッドという装置を用いる。ワイヤーグリッドを透過する光の偏光角はワイヤーの向きを測定することで同定可能である。SO ではエンコーダーと重力参照計を用いることで絶対角の同定を行う。本講演では絶対角較正の原理とその開発状況、性能評価について報告する。