

観測機器分科会

小川 英夫 氏 (大阪府立大学)

7月26日 13:00 - 14:00 B 会場

「天文学のための装置開発 -電波望遠鏡と私-」

天文学における開発研究を担っている若手は多くはいないと思います。しかしながら、現代のように高精度の観測装置が次々と開発されているなか関心を持っている人が多くいるのではないかと想像します。

私は主に電波天文学に関係した開発を数十年にわたって行ってきました。開発を持続させるモチベーションは何か。私の場合、現状において何ができるのか、何が求められているのか等について観測系研究者と徹底的に議論を行い、これから行う、行いたい開発を整理し、自分なりのストーリーを組み立てるというものでした。関係者と納得するまで話し合うなかで構想が次々と湧いてきた感じがします。

そこで本日は、開発系研究者に求められるもの、新しい観測装置が欲しいと思っている観測系研究者に求められるものは何か等、忌憚のないお話が出来ればと思います。

さらに、私が経験した色々な電波望遠鏡や観測装置 (NANTEN, ALMA, 45 m 鏡, VSOPII, 1.85m 鏡 etc.) を例にして具体的な開発過程等を紹介したいと思います。

1. 宇宙の観測 II 電波天文学 (シリーズ現代の天文学 第16巻)

涌井 伸二 氏 (東京農工大学)

7月28日 14:45 - 15:45 B 会場

「国立天文台の装置開発と若い研究者の参加」

精密装置の振動対策、精密位置決め装置に振動問題が発生したとき、まず振動源が何処に在るのかを探し出し、次に振動モードの特定をおして有効な対策が施せる。振動モードの特定に関しては、実験モーダル解析に代表される組織だった方法論は存在するが、現場においては「感性」を使って有効な対策を立案し実施することができる。対策を施す場合、まず機械的な対策を講じるべきである。具体的には剛性向上あるいはダンピングの付与である。機械的な対応ができない場合に限って、制御を要する制振装置の導入を行う。このような事例を数多く紹介したい。

涌井さまの体調不良により、氏の講演はキャンセルされました。

講演資料についてはポスター会場に掲示予定です。

観測 a1 X 線天文衛星「ひとみ」搭載波形処理装置における波形信号の弁別検証

高橋海斗 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

ASTRO-H「ひとみ」は、2016年2月17日に打ち上げられた日本で6番目のX線天文衛星である。「ひとみ」に搭載された観測機器の一つである軟X線分光検出器SXS(Soft X-ray Spectrometer)は、受光部がX線マイクロカロリメータであり、X線光子が入射することで生じるミリケルビン程度の温度変化を計測し、その光子の持つエネルギーを7 eV(FWHM at 6 keV)以下の高い精度で決定できる分光撮像装置である。温度変化は波形として取得され、波形全体を最適フィルタ処理して、入射光子のエネルギーを評価する。しかし実際に検出された波形データの全てが解析に有用な光子イベントではない。時間的に近接した光子波形が重畳することによって波形処理に適さないものや、宇宙線や電気的クロストークなど様々な原因によるノイズなどが入り得る。このようなイベントデータの弁別は、高精度のスペクトルを得るために必須であり、その最初の識別は、SXSの搭載デジタル波形処理部であるPSP(Pulse Shape Processor)によってなされ、様々なパラメータやフラグの形でイベントデータに付与される。今回の発表では、2015年6月につくばの宇宙センターで行われた衛星の熱真空試験時のデータを用いて、実際にイベント弁別が機能していることを検証し、非正規イベント群が以下のように分類出来ることを確認した。(1) 電気的・熱的なクロストークによるもの。(2) 複数のイベントが重畳しているために波形がゆがんでいるもの。(3) 近接した波形イベントの影響を受けて精度が下がっているもの。そしてPSPのパラメータを用いてこれらのイベントを除去することで、全イベントから高い分解能を実現するイベントを抽出できることを確認した。

観測 a2 裏面照射型 X 線 SOI ピクセル検出器の軟 X 線性能評価

原田颯大 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

我々は、次世代のX線天文衛星計画「FORCE」に搭載予定であるX線観測用ピクセル検出器「XRPIX」を開発している[1]。XRPIXは、SOI(Silicon On Insulator)技術を用いた検出部・読み出し回路一体型の検出器である[2]。現行のX線天文衛星の主力検出器であるX線CCD(Charge Coupled Device)の時間分解能は数sである。それに対しXRPIXは各ピクセルにヒットタイミングを出力させるイベントトリガー機能を実装しているため、ヒットのあったピクセルのみを読み出すことで、10 μ sの高時間分解能を実現できる。この時間分解能の向上により、高エネルギー粒子起源の非X線バックグラウンドを除去する反同時計数処理を採用でき、X線CCDの10 keVをはるかに上回る40 keVまでの硬X線撮像が実現する。超新星爆発の機構の解明などには0.5 keV程度の軟X線観測も

必要となるが、XRPIXの表面側(回路層側)には8 μ m程度の回路層が存在する。軟X線を表面側から照射すると、回路層で2 keV以下の軟X線が吸収され検出するのは困難である。そのため不感層の薄い裏面照射型素子の開発が必須となる。FORCEの不感層厚の要求性能は1 μ mで、最終目標は0.1 μ mである。我々はこれまで様々な裏面処理を行った素子を開発し、不感層0.5 μ mを達成している[3]。今回発表する最新のXRPIX6bDは裏面にレーザーアニールとイオンインプラント処理を行っている。前回作成したものと処理は同じだが不感層をより薄くするためレーザー出力等のパラメータを変更している。また軟X線の検出効率を上げるため、読み出しノイズを低く、分光性能を高くする改良も施している。このXRPIX6bDを計測し評価した結果を発表する。

- 1 T.G. Tsuru, et al., Development and performance of Kyoto Xray astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor, Proc. SPIE9144 (2014) 914412.
- 2 Y. Arai, et al., Development of SOI pixel process technology, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 636 (2011) S31.
- 3 伊藤真音, 京都大学, 2017, 修士論文.

観測 a3 積層配線 TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発

布村光児 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

我々の研究グループでは、中高温銀河間物質を含むダークバリオン探査を目的とする小型科学衛星DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)への搭載を目指したTES(Transition Edge Sensor)型X線マイクロカロリメータ(以下TESと表記)を開発している。TESは超伝導金属と常伝導金属の二層薄膜構造をしており、超伝導金属の相転移時の急峻な抵抗変化を利用することによって、1eV台の優れたエネルギー分解能を実現できる検出器である。我々はこれまでにTi/Auの4 \times 4アレイを用いて5.9 keVにおいて2.8 eV(FWHM)のエネルギー分解能を達成した(Akamatsu et al. 2009 AICP)。

DIOSでは、有効面積を大きくするため非常に大きな検出器アレイが必要となるが、アレイを大型化すると基板上的配線スペース不足や、配線クロストークの問題が生じる。そこで、我々はこれらの問題を克服することができる積層配線(積層構造)のTESアレイを産総研と共同でインハウス製作している(Ezoe et al. 2015 IEEE TAS)。

我々は20 \times 20ピクセルの積層配線TESアレイの開発を行ってきたが、正常な超伝導転移をしないという問題があった。そこで、我々はTESの表面粗さが転移の有無に影響を与えていると考え、新たに化学機械研磨を用いた配線を考案し、Si基板とほぼ同等の表面粗さ0.4 nm rms(5 μ mスケール)を達成した(Kuromaru et al. 2016 JLTD)。さらに、TES成膜時の

逆スパッタの条件を緩和し 150 W, 3 min から 100 W, 1 min へ緩和し、基板へのダメージを低減させた。その結果、我々のグループではじめて 20 × 20 ピクセルの積層配線 TES アレイの正常な超伝導転移を確認した。TES 膜厚は Ti/Au=100/20 nm であり、転移温度は 360 mK、臨界電流 >1 mA と良好である。

本研究で目標としているエネルギー分解能を達成するためには転移温度を 100mK 程度にすることが必要である。転移温度は基本的に Ti と Au の膜厚比で決定されるが、Ti の膜厚が大きすぎると近接効果が効きにくくなり転移温度を下げるのが難しい。そこで、Ti/Au=100/20 nm で TES の転移が確認できたため次のステップとして Ti の膜厚を薄くすることによって転移温度の調整を行っている。そのため、現在は Ti/Au=60/120 nm の基板を作成し TES 転移するか確かめる予定である。

観測 a4 ガンマ線バースト偏光観測衛星 SPHiNX 計画

内田和海 (広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 M2)

ガンマ線バーストは、約 1 日に 1 回の頻度で数秒間に 10^{45} J ものガンマ線が突発的に観測される天体現象である。その起源は、星の最後の超新星爆発、ブラックホールや中性子星連星の合体と考えられているが、どのようにして光速に近い速さをもつジェットが形成されるのかは不明である。これまでのエネルギースペクトルの研究からは、ジェットからガンマ線が放射されるメカニズムに 2 つのモデルが提唱されている。そこで我々は日本とスウェーデンが共同で開発し 2021 年打ち上げ予定の SphiNX 衛星により、1 年間で約 30 個のガンマ線バーストの偏光度を決定し、その偏光度の頻度分布から放射メカニズムを切り分ける計画である。これまでに GAP 検出器により、数例のガンマ線偏光が報告されているが、SphiNX では検出数を 10 倍程度に増やし、統計的な議論を目指す。

2 つの放射モデルとは、ジェット中で、密度が高く光学的に厚い領域の表面から放射される「光球面モデル」と、物質が磁場に巻き付いてシンクロトロン放射をしていると考える「シンクロトロンモデル」である。偏光に着目すると、「光球面モデル」は無偏光に近いのに対し、「シンクロトロンモデル」では最大 70% 近い偏光が予想される。よって偏光度の頻度分布が、無偏光に近ければ「光球面モデル」、平均で 40% 近い偏光度があれば「シンクロトロンモデル」と区別されるのである。

私はこれまで、SphiNX 衛星のガンマ線偏光計で利用予定である GAGG シンチレータの特性評価を行ってきた。この結果、ガンマ線に対する放射線耐性が軌道上の数年の運用で問題ないレベルであること、数 cm 程度の大型サイズになるとシンチレーション光は減少するもののエネルギー分解能は 7%(662keV) と十分な性能が発揮できることが分かった。

本講演では、SphiNX 衛星の紹介と私が行った検出器開発の状況について発表する。

1 M. Axelsson et al. 2012, ApJ 757,L31

観測 a5 X 線望遠鏡用受動型熱制御素子サーマルシールドの開発

二村泰介 (名古屋大学 Ux 研 M1)

X 線望遠鏡は直接宇宙をみるため望遠鏡からの輻射によって熱が奪われ低温になる。X 線望遠鏡に用いられる反射鏡は複合材料であるためにバイメタル効果によってその形状に温度依存性が現れる。そのため望遠鏡内の温度を地上試験時の温度を含めた動作温度内に制御する必要がある。この要求を満たすための熱計装として受動型熱制御素子サーマルシールドの開発が進められた。サーマルシールドの主な構成要素は、プラスチックフィルム、フィルム支持材としての金属メッシュ、機械強度部材としての金属フレームである。フィルムに数十 nm 程度の厚さのアルミニウムを蒸着し、低い太陽光吸収率と赤外線放射率を持たせることで熱の流入を防ぎ受動型熱制御の機能を果たす。

名古屋大学はこれまでにあすか、すざく、ひとみ用にサーマルシールドの開発を行ってきた。そして現在では NASA が主導で開発を行い 2020 年に打ち上げが予定されている X 線偏光観測衛星 IXPE 搭載用のサーマルシールドの開発を行っている。IXPE ではその観測エネルギー帯やロケット打ち上げ時の空力加熱等を考慮し、フィルムには $1 \mu\text{m}$ 程度のポリイミドフィルムを用いる予定である。

現在、IXPE 用メッシュ、フレームの設計検討を終え、厚さ 0.25 mm、線幅 0.1 mm のステンレスメッシュ、厚さ 4 mm、直径 300 mm のアルミフレームを採用することにした。また可視光にてフィルムに蒸着されているアルミの厚さを定量的に評価したところ目標値の 30 nm に対し 15 nm 程度であったが、厚みムラとしては 1 nm 程度でひとみ HXT 搭載品と同等である事を確認した。今後は本設計とほぼ同等のサンプルを試作し、打ち上げ時の振動を想定した振動試験や音響試験を見据えての静加圧試験を行い機械強度を評価する。また打ち上げ時の熱環境に対しても熱シミュレーションの結果を元に加熱試験を行い耐熱性を評価し、加熱後のサーマルシールドを用いて加圧試験を行うことで機械強度の変動をみる予定である。

観測 a6 超小型衛星 HaloSat の性能評価とサイエンス検討

石原雅士 (名古屋大学 Ux 研 M1)

宇宙組成に占める baryon の割合は 5% ほどと言われている。その中でも半数近くが未検出であり、これらは missing baryon と呼ばれている。missing baryon の多くは温度百万度程度のガスとして、銀河間や銀河内に存在すると考えられている。HaloSat は Iowa 大学と NASA が主導で進めている 6U サイズ

(100×200×300mm)の超小型観測衛星であり、2018年打ち上げ予定である。本衛星は世界初の銀河系内高温ガスの温度・強度の全天マップの作成を目的としている。本衛星は結像系は搭載せず、約12度の視野で3台のシリコンドリフト検出器を用い、1年をかけて全天観測を遂行する。

本ミッションにて、名古屋大学は散乱測定及び環境試験を担当する。まず我々は、散乱測定にて検出器筐体内で散乱して入射する迷光成分の入射角・方位角依存性を調べるため、自動スキャンが可能な治具を設計した。迷光評価は高温ガスの温度および強度の正確な見積りに必須となる。熱真空試験では、衛星運用時の温度を再現した環境で実際にX線を当て、検出器性能の変化を評価する。評価にはフッ素の輝線を用いる予定であり、カーボンナノ構造体を電子源として利用する、200mm角程度のコンパクトな独自の評価システムの構築を進めている。

また、本ミッションのサイエンス実現性の検討および観測時間の最適化を図るため、実データに基づいたシミュレーションを行った。例えば典型的な輝度を仮定した場合、観測時間10ksでは、地球近傍(<100 pc)を取り囲む100万度程度の高温プラズマ成分の温度および強度はどちらも10%程度、銀河系X線ハロー成分は各々20, 50%程度の決定精度であることを示した。今後は様々な輝度を仮定した場合の決定精度の観測時間依存性や、North Polar SpurやCygnus superbubbleなどの観測を想定したシミュレーションも実施予定である。

観測 a7 広視野 X 線撮像検出器に実装するバースト判定システムの開発と評価 太田海一 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

高密度天体同士の衝突・合体の際には強力な重力波放射が発生する。2015年にLIGOにより初の直接観測がなされ重力波天文学の幕開けとなった。2018年度よりVirgoとKAGRAを加え本格的な重力波観測ネットワークが稼働するが、重力波干渉計による発生源の方向決定精度は10 - 100平方度と非常に粗いため母銀河を特定するには至らない。一方ブラックホール・中性子星連星や中性子星連星の衝突・合体の際には重力波放射と同時にX線やガンマ線による強力な電磁波放射(Short gamma ray Burst: SGRB)が起こるとされ、重力波源の特定を電磁波による同時観測でフォローすることが可能である。また重力波放射と電磁波放射の時間差を10 msec以上の精度で観測できれば、SGRBのジェット駆動源を解明することも期待される。

金沢大学では重力波観測が本格化する2018年度末の打ち上げを目指して独自の超小型衛星を開発しており、我々は重力波源の特定を目指した広視野X線撮像検出器(T-LEX)の開発を進めている。SGRBに付随して起こる軟X線超過成分の放射(extended Emission: EE)やその他様々なX線突発天体の観測も可能な1 - 20 keVに観測帯域を設定し、方向決定は1次元コードマスクとシリコンストリップセンサーを用いて1 sr以上の視野と15分角の精度での観測を目指す。バースト検知は、デジタル回路の処理によって複数の時間スケールに binning されたライトカーブを用いて CPU が処理する。本講演ではライトカーブを用いたバースト検知のアルゴリズムの振る舞いに加え、BATSEの観測データによるバースト本体の検知能力の評価と、Swift/BATの観測データを長時間 binning して行った EE によるバースト検知能力の評価について報告する。

1 B.P. Abbott et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. Phys. Rev. Lett., Vol. 116, p. 061102, February 2016.

- 2 Norris JP, Bonnell JT. 2006. ApJ 643:266-275

観測 a8 大気チェレンコフ望遠鏡 CTA のモンテカルロシミュレーションによる評価 三浦智佳 (茨城大学理工学研究科理学専攻物理系 M1)

高エネルギーのガンマ線は大気との相互作用で電子対生成を起こし、その電子は大気中で制動放射を起こしてガンマ線を出す。この電磁シャワーに伴うチェレンコフ光を観測するのがチェレンコフ望遠鏡である。一方、陽子などのハドロン由来の高エネルギー宇宙線もまた、大気中に入射すると核カスケードによりハドロンシャワーを起こし、チェレンコフ光を放つ。大気チェレンコフ望遠鏡を用いたガンマ線観測において、このハドロンシャワーが主要なバックグラウンドとなる。ハドロン由来の2次粒子は大きな横方向の運動量をもつため、ハドロンシャワーは電磁シャワーと比べてより広がりをもった形状となる。このシャワーの形状の差に伴って、チェレンコフ光を反射望遠鏡でとらえたときに焦点面でつくられるイメージの形状もガンマ線とハドロンで異なる。このイメージの形状の差を利用してガンマ線とハドロンを識別する。このようにしてガンマ線によるチェレンコフ光を観測する方法がImaging Atmospheric Cherenkov Technique(IACT)である。

Cherenkov Telescope Array(CTA)計画は、大中小の口径を持つチェレンコフ望遠鏡を複数台配置し、現行のチェレンコフ望遠鏡と比較し観測可能なエネルギー領域を20 GeV-300 TeVに広げ、10倍の感度の向上を目指すガンマ線観測計画である。北半球はスペイン領カナリア諸島のLa Palma島、南半球はチリのParanalに建設される予定である。大中小のチェレンコフ望遠鏡のうち大口径望遠鏡(LST)は20 GeV-1 TeVの低エネルギー領域を観測し、現在La Palma島に1号機の建設が開始している。本講演ではLa Palma島に設置される大口径の大気チェレンコフ望遠鏡4台について、配置や検出器の特性値などより現実に近いパラメータ設定を取り込んだシミュレーションを行い、ガンマ線点源と広がった天体に対する感度を評価する。

- 1 K. Bernlohr et al. Astropart. Phys. 43 (2013)
- 2 M. Actis et al. Exper. Astron. 32 (2011)

観測 a9 CTA 大口径望遠鏡に用いる PMT の性能評価

砂田裕志 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

エネルギーが数 10GeV を超える高エネルギーガンマ線が地球大気に侵入すると大気中の原子核と相互作用によって電子・陽電子対生成を起こし二次粒子を生成する。この二次粒子が制動放射によってガンマ線を生成し、このガンマ線が再度対生成を起こす。この過程を繰り返すことで電子のシャワーが生じる。電子シャワーからのチェレンコフ光を捉えることで高エネルギーガンマ線の観測する望遠鏡を大気チェレンコフ望遠鏡という。大気チェレンコフ望遠鏡は、チェレンコフ光を鏡で反射・集光し焦点面検出器で検出する。Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は大口径望遠鏡 (LST), 中口径望遠鏡 (MST), 小口径望遠鏡 (SST) の三種類の大気チェレンコフ望遠鏡を複数台組み合わせた望遠鏡群を北半球のラパルマ島、南半球のパラナルに建設し、高エネルギーガンマ線を観測する計画である。各望遠鏡は異なるエネルギー範囲に感度を持ち、全体で 20 GeV ~ 300 TeV のエネルギー幅を持ちつつ現行の大気チェレンコフ望遠鏡よりも一桁高い感度での観測を行う。LST は 20 GeV ~ 1 TeV の低エネルギー側に感度を持つ。LST の開発は日本チームが中心となって開発を進めており、現在 1 号機の建設が始まり 2 号機以降の開発が開始している。LST の焦点面検出器には光電子増倍管 (PMT) が使用されている。光量が微弱で発光時間の短いチェレンコフ光を検出するために LST 用の PMT には厳しい性能要求が課せられる。LST 1 号機と 2 号機の間で使用される PMT に設計変更を行ったため、2 号機以降用の PMT が性能要求を満たしていることを確認する必要がある。今回の講演では 2 号機以降用 PMT の諸特性の測定方法及び、その測定結果を報告する。

観測 a10 CTA 大口径チェレンコフ望遠鏡に搭載する読み出し回路の性能評価

平子丈 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

宇宙では、天体活動により様々な波長の宇宙線が放射されている。ガンマ線は波長により性質が異なるが、地球に入射した高エネルギーガンマ線は大気との間で電子対生成を起こす。作られた電子は制動放射によって二次ガンマ線を放射し、再び電子対生成が起きる。ガンマ線と電子はエネルギーを失うまで連鎖的に生成され、その結果生じた電子シャワーから出てくるチェレンコフ光により高エネルギーガンマ線を観測するのが大気チェレンコフ望遠鏡である。CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は、LST (直径 23 m)、MST (直径 12 m)、SST (直径 4 m) の異なるエネルギー観測範囲を持つ大気チェレンコフ望遠鏡を並べる計画であり、北半球のラパルマ島、南半球のチリ・パラナルに建設される予定で、全体で 20 GeV~300 TeV のレンジを持つ。その中でも、LST は 20 GeV~1 TeV の低エ

ネルギー側のレンジを受け持ち、京都大学は LST に搭載される検出器の読み出し回路を開発してきた。低エネルギー側では大気チェレンコフにより生じる光子数が少ないため、夜光によるバックグラウンドノイズの除去が重要な課題の一つになってくる。夜光は 200 MHz 程度の割合で光子として検出され、観測するガンマ線は数 ns 程度の広がりを持つ。ゆえに時間分解能への要請として、サンプリングは ~ GHz 程度で行われる必要がある、そのための回路素子が DRS4 である。DRS4 は 4096 個のキャパシタを 1 ns ごとに切り替える Domino Ring Sampler と呼ばれる構造を持つが、実際にはキャパシタごとに 1 ns からのずれが存在している。そのずれを較正するために、北サイトの 2 号機以降に搭載される基板 (Dragon version 7) には、1 号機に搭載される version 5 に、DRS4 チップのタイミングキャリブレーションのための sin 波生成回路と温湿度センサー、電圧モニター回路が追加されたものとなっている。本講演では光子を一つずつ検出器に入射させ、基板 (Dragon version 7) でピークの広がりを測定することで、タイミングキャリブレーション前後において観測精度がどのように向上するかを示す。

1 George B. Rybicki and Alan P. Lightman Radiative Processes in Astrophysics

観測 a11 サブミリ波帯の集積回路型超広帯域分光装置 DESHIMA のシミュレータ開発

陳家偉 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

サブミリ波帯で観測されるサブミリ波銀河は、きわめて爆発的な星形成を行っている銀河である。また、赤方偏移がおよそ $z=1$ から $z=6-7$ にわたって分布しており、その明るさはサブミリ波帯では大きく変化しないという特徴的な性質をもつ。このため、サブミリ波銀河をサーベイすることにより、宇宙再電離の時期まで遡って宇宙の星形成史を調べることが可能となる。

我々の研究グループでは、サブミリ波銀河の赤方偏移サーベイを行うために、サブミリ波帯の超広帯域分光観測を可能とする DESHIMA (Deep Spectroscopic High-z Mapper/Delft SRON High-z Mapper) の開発を行っている。DESHIMA には特徴的な技術がいくつか用いられている。そのうちの一つは電波を検出し、検出したエネルギーを単一の配線で読み出す超伝導検出器 MKID (Microwave Kinetic Inductance Detector) と呼ばれる技術である。この技術は、多ピクセルの読み出しの配線を一つにし、電波カメラの多ピクセル化を可能にした。また、超広帯域の分光を可能にするため、我々は集積回路型分光器 (on-chip filter bank) を開発した。これらの技術によって、非常にコンパクトなサブミリ波帯の分光器を実現した。

DESHIMA は本年度、試験観測を行う予定だ。その際、大気のゆらぎなどの影響から、 $1/f$ ノイズが生じることが予想される。このため、 $1/f$ ノイズを補正するようなキャリブレーションを行う必要がある。私は、このキャリブレーションプラン

を計画するために DESHIMA のシミュレータの開発を行っている。

本講演ではまず、MKID と集積回路型分光器を中心にして DESHIMA の紹介を行う。その後、DESHIMA のシミュレータの開発の報告も行う。

観測 a12 CMB 偏光 B モード観測における前景放射成分分離の高精度化を目的としたフーリエ分光器の開発

官野史靖 (東北大学天文学専攻 M1)

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) の B モードと呼ばれる特殊な偏光シグナルは、インフレーション理論の重要な証拠である、原始重力波の情報を刻んでいる。そのため、CMB の B モード偏光初検出に向けて、現在様々な研究チームが観測実験を行っている。観測データには、CMB に加え、シンクロトロン放射や銀河系内星間ダストからの熱放射といった、前景放射も含まれている。よって、観測データから前景放射に埋もれた CMB の B モード偏光を抽出するには、これら前景放射と CMB とを精度よく分離することが必要不可欠であり、これは現在の CMB 偏光実験における最大の課題の一つだといえる。

CMB と前景放射とは、スペクトルに顕著な違いがあることが分かっている。したがって、それらの分離精度は、検出器における周波数特性の較正精度に大きく左右される。また、検出器の特性は環境の違いや検出器の経年劣化等により変化すると考えられるため、観測サイトにおける定期的な較正が必要である。これらを踏まえると、高精度の成分分離を達成するためには、観測サイトにて定期的に高分解能の周波数観測を行える、画期的なシステムの構築が求められる。

これらの要請を満たすため、我々は観測サイトでの定期的な周波数特性の較正を目的とした、高周波数分解能フーリエ分光器の開発研究を行っている。このフーリエ分光器の設計において、我々は可動鏡の移動距離に対して、約 20 倍もの光路差をつけることができる、革新的な光学系を考案した。これは、一般的なフーリエ分光器に比べ、約 10 倍の効率である。この光学系によって、可動鏡 20 mm の移動のみで、1 GHz 以上の周波数分解能を達成できる。

本発表では、光学設計・評価プログラムソフトウェア CODE V を用いた光学設計の結果を中心に、フーリエ分光器の概要を紹介する。また、この分光器による成分分離精度の向上について議論する。

観測 a13 NANTEN2 新制御システム NECST の開発進捗

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

我々は、NANTEN2 望遠鏡を用いて CO 輝線の超広域サーベイを行う NASCO (NANTEN2 Super CO Survey as

Legacy) を推進している。NASCO は全天の約 70 % を数年で観測することを目的としており、この計画を達成するために観測効率の向上が要求される。そこで、マルチビーム受信機の開発や広域観測に対応した新たな望遠鏡制御システム NECST (New Control System on the NANTEN2 Telescope) の開発を行っている。NECST では観測効率を上げるためにマルチビームへの対応とスキャンスピードの向上を目的とし、加えて膨大なデータを扱うためのデータ輸送方法の検討と観測者の負担軽減のための自動観測の実装も行う。

これまでの NECST の開発では、マルチビーム化に伴う 120 倍ものデータレートの増加に対応するため計算機のリプレースを行った。さらに NANTEN2 の旧制御システム (n2control) は多数の言語で構築されており更新や改修が困難であったため、今後の更新と開発のしやすさを考慮し python でのシステムの再構築を行った。その結果、システムの再構築後である 2016 年のシングルビーム観測では n2control と同様に科学観測を行い天体のデータを取得することができた。

現在は、マルチビーム化に向けた開発を行っている。具体的には、1.5 TB / day にもなる観測データのチリ-名古屋間の輸送方法の検討や、膨大なデータを扱うことによる人為的ミスや観測者の負担を軽減するための自動観測の実装を進めている。さらに、クラウドサービスを使い現地と名古屋の計算機を同期することや、ROS (Robot Operating System) を使った望遠鏡の駆動装置の操作やシミュレータの導入も考えている。

今後は 6 月のシングルビームでの観測開始後に、開発と並行して高速スキャンの確認試験などを行い、2017 年秋のマルチビームの観測システムの稼働に向けた開発を行っていく予定である。

本公演ではこれまでの進捗と今後の開発について報告する。

観測 a14 近赤外面分光装置 SWIMS/IFU の開発 河野志洋 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

我々は、東京大学アタカマ天文台 (TAO) プロジェクトがチリのチャノントール山に建設、計画中の 6.5m 赤外線望遠鏡に、第 1 期装置として搭載する近赤外撮像分光装置 SWIMS を開発している。SWIMS は $\phi 9$ 角の広い視野を持つ上、0.9 ~ 1.4 μm 、1.4 ~ 2.5 μm の二つの波長帯について同時に撮像、多天体分光を行うことができるユニークな観測装置である。また、SWIMS は十数種類の多天体分光用のマスクをカラーセル内に格納しており、マスクを切り替えることで様々な観測天体に対応することができる。我々は、このカラーセル内に面分光観測を行うモジュールを格納することで、多天体分光モードと面分光モードの切り替えを可能にすることを計画している。

通常のスリット分光装置では 1 回の露出で観測天体のスペクトルと 1 次元の空間情報が得られるのに対し、面分光装置ではスペクトルとともに 2 次元の空間情報を得ることができる。これにより、効率的に観測が行えることや銀河の空間的な物理状

態を均質に捉えることができるなど大きな利点が得られる。しかし、面分光装置は光学系が複雑になるため、用いる光学部品に高い精度が要求され、作製に技術的困難が生じる。この技術面の問題を克服し、要求精度を満たした装置を開発することが我々の目的である。本講演では、開発中の SWIMS 用面分光装置の特徴や性能、現在の開発状況を報告する。

観測 a15 FOXSI ロケット実験に向けた両面ストリップ CdTe 検出器の開発

古川健人 (東京大学高橋研究室 M1)

太陽コロナは太陽を取り巻く薄い高温大気であるが、その温度 (10^6K) を維持するための加熱機構は現在にいたるまで謎のままである。我々は現在、NASA、ミネソタ大学、カリフォルニア大学バークレー校と共同で、ロケット搭載検出器によって太陽からの硬 X 線放射の直接撮像を行い、太陽コロナ、特に静穏領域におけるエネルギー解放の研究を進めている。静穏領域におけるエネルギー解放現象は、太陽コロナ加熱に大きく寄与している可能性があり、その研究はコロナ加熱機構の解明に大きな手がかりを与えるものである。このロケット実験は FOXSI (Focusing Optics X-ray Solar Imager) 実験と呼ばれ、太陽からの $\sim 15\text{keV}$ までの硬 X 線を世界ではじめて、斜入射望遠鏡で撮像分光観測を行おうとするものである。望遠鏡は 7 台搭載され、その内の 6 台の望遠鏡の焦点面検出器を我々のグループが提供することになっている。FOXSI 実験で使用する硬 X 線望遠鏡は、2m の焦点距離をもち、高いエネルギー領域で 25 秒角 (HPD: Half Power Diameter) という高角度分解能を有することが特徴である。したがって検出器もまた、望遠鏡に見合うだけの位置分解能を硬エネルギー領域において要求される。我々の開発している CdTe 検出器の特徴は Si 検出器よりも高いエネルギー領域に大きな感度を持ち、FOXSI 実験に適した検出器といえる。特に、FOXSI 用に開発された CdTe-DSD はストリップのピッチが $60\mu\text{m}$ とこれまで、我々が開発してきたものの中で最も微細な構造を持つ。この二つの特徴のため、FOXSI ロケットの硬 X 線望遠鏡が持つ、硬 X 線領域 ($4\text{--}15\text{keV}$) における高い角度分解能を十分生かすことができる。本講演では検出器や読み出し機器の構成、狭ピッチ CdTe-DSD の応答関数のキャリブレーションの現状の他、FOXSI 実験から期待できる科学的知見について発表する

観測 a16 新手法「ハイブリッド法」による多重薄板型 X 線望遠鏡の

反射鏡形状精度向上への取り組み

大塚康司 (名古屋大学 Ux 研 M1)

日本の X 線天文学では、軽量大面積の望遠鏡を実現するため、アルミ薄板を基板とする多重薄板型の X 線望遠鏡を採用し、レプリカ法によって表面粗度の小さな鏡面を実現してきた。レプリカ法とは、表面の滑らかなガラス母型に X 線を反射させる鏡面物質を成膜後、アルミ基板に鏡面物質を転写し反射鏡を

製作する方法である。しかしこの手法では、母型からの離型時に基板が歪み、角度分解能の劣化が生じる。

この形状劣化を抑えるために新たな手法として「ハイブリッド法」を考案した。ハイブリッド法では鏡面物質を成膜した薄板ガラスをアルミ基板に貼り付け反射鏡とする。これにより鏡面物質の転写工程をなくし、形状劣化の抑制を図った。本研究ではサンプルを実際に製作し、問題点の洗い出しや、サンプル形状評価を行った。

厚さ 0.1 mm の平面薄板ガラスに、厚さ 1000 AA のプラチナを成膜し反射面とした。これを高さ 36 mm、厚さ 0.3 mm のアルミ基板にエポキシ接着剤で貼り付けてサンプルを製作した。エポキシの厚さは約 $10\mu\text{m}$ である。可視光を用いて性能評価を行うと、母線方向の形状誤差は角度分解能にして 2.8 分角であった。この値は、従来法で製作したものと比べ優れているとは言えない。表面形状を測定すると、約 $70\mu\text{m}$ の鏡面側が山となる構造が見られた。解析の結果、この変形は、熱膨張率の異なる材料を張り合わせたために起こるバイメタル効果で説明出来ることがわかった。

バイメタル効果について簡単なモデルを考え母線方向の形状誤差を見積もると、製作時から 1°C 温度が変化するだけでも、角度分解能は数分角劣化することがわかった。今後は、熱膨張率がガラスに近く剛性が高い CFRP 等の利用や、構造を持ち変形し辛いと考えられる一周鏡の製作等を検討する。

1 高木任之「図解でわかる構造力学」2002 株式会社日本実業出版社

観測 a17 SMILE で切り拓く MeV ガンマ線天文学 齋藤要 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

MeV ガンマ線は元素合成や、活動銀河核やガンマ線バーストにおける粒子加速、ブラックホール近傍の強い重力場、宇宙線と星間物質との相互作用といった様々な現象に対して新しいプローブになることが期待されている。 ^{26}Al は半減期が 10^6 年と比較的長く、寿命が銀河内の物質拡散のタイムスケール程度であるため、崩壊に伴う 1.8MeV のガンマ線放射は物質循環のトレーサーとなることが期待されている。

MeV ガンマ線により様々な現象の解明が期待される一方で、観測はほとんど進んでいない。1991-2000 年に全天観測を行った COMPTEL は 30 程しか定常天体を発見できず、2003 年より観測を続けている INTEGRAL は 4 天体しか検出できていない。気球実験もいくつか行われてはきたが、地上較正実験から予想される感度を達成した検出器は一つもない。これはガンマ線は集光が困難で、また衛星や検出器が宇宙線との相互作用によりガンマ線放射源となってしまうなど雑音が多いためである。MeV ガンマ線領域での高感度観測には根本的な雑音対策が必要不可欠である。

MeV ガンマ線天文学の停滞を打破すべく、我々は独自で開発した電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron-tracking

Compton camera:ETCC)を用いた気球実験(Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-ballon Experiment:SMILE)計画を進めている。2006年に行われたSMILE-I気球実験では、宇宙環境下でガンマ線観測が可能であることを実証し、ガンマ線背景放射のスペクトルの観測に成功した。2018年4月にはSMILE-II+として気球実験を行うことが決定しており、銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線の撮像観測を行い、MeVガンマ線科学観測の実現を目指す。

本講演では、現在進行中のSMILE-II+、そして今後の計画としてのSMILE-III,SMILE衛星の概要と、それぞれに搭載される装置がもたらす結果について報告する。

観測 a18 衛星による全天観測に向けた気球実験で用いる次世代型 MeV ガンマ線検出器の性能評価と予想検出感度

小野坂健 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

宇宙 MeV ガンマ線観測を行うことで元素合成プロセスの解明や粒子加速の機構の解明などに繋がると期待されている。しかし、MeV ガンマ線の衛星による全天観測は、1991年のCOMPTELによるもの以上の検出感度を実現した観測はほとんど行われておらず、未開拓な部分が多い領域である。それにも関わらず現在までに十分な観測が行われていないのは、MeVガンマ線観測には様々な困難が存在するからである。その困難を克服すべく、様々な観測手法が考えられた。その一つがコンプトンカメラである。これは検出器内で起きたコンプトン散乱の散乱角からイメージングをするものである。しかし、従来のコンプトンカメラでは1事象で散乱の到来方向を表す2角度の内一方しか測定できない為、統計的手法で到来方向を推測する他なく、数十度の平均散乱角程度に広がったPSF(Point Spread Function)内に存在する観測対象以外の天体の影響を排除できないという問題点があった。この問題点を解決すべく、我々は従来では測定できなかった反跳電子の方向も検出し、コンプトン散乱事象毎に入射光子の運動量を得る電子飛跡検出型コンプトンカメラ(Electron-Tracking Compton Camera:ETCC)の開発を進めており、従来よりも優れたPSFや雑音除去能力等を実現している。現在我々は将来的に衛星によるCOMPTELの100倍の検出感度での全天観測を目標に、気球実験や地上実験により段階的に実証を進めている。2018年4月には、銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線を観測ターゲットとして、気球を用いたETCCによる天体観測実証実験SMILE-II+をオーストラリアで行う。本講演では、SMILE-II+のフライトモデルETCCの有効面積・角度分解能の評価、及びこれらから予想される検出感度について報告する。

観測 a19 系外惑星観測のための補償光学装置に用いる干渉型波面センサ

西岡秀樹 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

国内最大となる岡山3.8m望遠鏡で、私たちは太陽系外にある木星型惑星の直接撮像観測を目指している。1995年の惑星発見から現在まで3,000個以上の惑星候補が報告されているが、これらの候補の大半は主星に対する惑星の影響を捉えたドブラー法やトランジット法などの間接法で発見されてきた。これに対して私たちは惑星の光を直接捉え、惑星大気の組成や表面状態を測定できる直接撮像法による惑星観測を狙っている。惑星の光は主星に対してとても暗く、主星の散乱光によって埋もれてしまうため、惑星の直接撮像が難しくなる。そこで私たちは大気ゆらぎを解消する補償光学と主星の光を消すコロナグラフを組み合わせた惑星撮像装置SEICA(Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraph Adaptive optics)の開発を行っている。補償光学は波面センサ・制御装置・可変形鏡の3つの装置で構成され、大気ゆらぎによる波面の乱れの測定・補正を行う。主星と惑星との間のコントラスト比が $10^5 - 10^6$ と非常に大きく、天体からくる光の波面を補償光学で観測波長(1.2 μm)の20分の1の非常に小さい波面誤差に抑えないといけない。そのため補償光学用波面センサの測定点数を500まで増やして8.5kHzの高い頻度で波面の測定を行う。これは今までの補償光学装置と比べ、測定点の数も測定頻度も一桁上の仕様になっている。そしてこのSEICAの波面センサには点回折干渉波面センサを採用している。一般に波面の傾きを測定するシャックハルトマン型波面センサとは異なり、点回折干渉波面センサは波面の位相そのものを測定して、波面形状を高速かつ高精度に計測することを可能にする。講演ではこの点回折干渉波面センサの詳細について述べる。

観測 a20 超大型光赤外望遠鏡の鏡計測

今西萌仁加 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

より回折限界に近い星像を得るためには、望遠鏡の鏡が理想形状となっていることが重要であり、一般に観測波長の $\frac{1}{10}$ 以下の形状精度が求められる。これまで鏡形状の高精度な計測手法として、干渉法が用いられてきた。これは、基準となる高精度な参照面を用いることによって、原理的に波長の数十分の1以上の精度での計測が可能となるものである。しかし、近年の望遠鏡の超大型化や非球面化によって、装置の巨大化や参照面の複雑化が進み、様々な困難が生じてきた。これに対してCGHコモンパス干渉計(Kino et al.2012)や軸外非球面干渉計(J.Burge et al.2008)のような手法が解決されてきたが、本研究はこれらとは全く異なるアプローチでの超大型非球面鏡の高精度形状計測を目標としている。本研究では、廉価な近似参照面を用いることができるほど計測面を分割し、小型干渉計で形状データを得たのちにステッチングする手法を開発している。この手法によって以下3つの利点が挙げられる。1)空気揺らぎの影響を受けやすい、参照面と被検面間の光路をこれまでより2桁以上短縮、2)計測範囲が無制限、3)廉価な参照面を差し替えることによって任意の形状が計測可能。これに

よって複数の異なる大型非球面鏡をこの小型干渉計ひとつで形状計測を可能にするだけでなく、これまで行うことができなかった凸面鏡の干渉法による形状計測が可能となる。現在この小型干渉計を開発しており、計測視野は ϕ 30 mm、1 ショットの計測時間は 80 ms、10 nm 以下の計測再現性を有している。この手法の開発により、鏡計測のコスト・時間が軽減されるだけでなく、より高次の非球面鏡の製作も可能になることが期待される。本公演では、超大型望遠鏡の鏡計測についての導入と私たちの研究の現状について述べる。

- 1 J. H. Burge, W. Davison, C. Zhao, and H. M. Martin,
- 2 Kino M, Kurita M,

観測 a21 木曾超広視野高速カメラ Tomo-e Gozen の開発

小島悠人 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

超新星や変光星などの時間変動天体の検出には、モニタリング観測が必要となる。この”Time domain 天文学”は、多くの天文分野において重要なアプローチになることが期待されている。これまでのモニタリング観測では、すばる望遠鏡の HSC(Hyper Suprime-Cam) や東京大学木曾観測所の KWFC(Kiso Wide Field Camera) は突発天体の検出に大きく貢献してきた。しかし、これらの装置は検出器に CCD センサを用いており、読み出し時間の制約により 10 分以下で変動する天体現象を検知することが難しかった。例えば、FRB(Fast Radio Burst) や超新星ショックブレイクアウトの検出には 10 秒以下の時間分解能をもつモニタリング観測が必要となる。そこで、我々は超広視野 CMOS カメラ Tomo-e Gozen の開発を進めている。Tomo-e Gozen は東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡の ϕ 9 度の視野を 84 チップの CMOS センサで覆う構造となっており、計 20 平方度の非常に広い視野を持つ。CMOS センサは従来の CCD センサに比べて読み出し時間が極めて短いため、10 秒以下の時間分解能で観測が可能である。また、常温駆動時の CMOS センサの暗電流が木曾のバックグラウンドを下回るため、冷却装置を必要としない。そのため、Tomo-e Gozen は 50cm \times 50cm、重さ約 80kg の非常にコンパクトな装置となっている。Tomo-e Gozen は 2 時間で全天サーベイが可能である。これにより、FRB や超新星ショックブレイクアウトの検出だけでなく、重力波可視光対応天体の探査、地球近くの高速移動天体の検出など数多くの科学的成果が期待される。なお、Tomo-e Gozen で検出された突発天体は、京都大学 3.8m 望遠鏡でのフォローアップ観測も予定されている。

本講演では、Tomo-e Gozen の観測計画と期待される科学的成果、他の広視野サーベイ観測装置との比較について紹介する。

- 1 sako et al.

観測 a22 新分光方式による、高効率で空間分解能を持つ高分散分光器の開発 細川晃 (国立天文台三鷹 M2)

現在のところ可視赤外線観測用の望遠鏡に搭載されている分光器は、回折格子を用いて波長毎に光を分散させる方法が主流である。しかし、分散による分光法ではより詳細なスペクトルを得るために高分散化すると光の効率が悪くなるという欠点があり、現行の分光器では数%程度の効率に留まっている。本研究では光の干渉縞模様を逆フーリエ変換を施すことで波長ごとの強度を得る、フーリエ分光法を基にした分光器の開発を行っている。この分光法は波長分解能を高めても効率数十%を達成するという利点があり、また先行研究によって鏡の位置を動かす必要のない静的フーリエ分光法 (StFT) が提案されたことで、この分光法の欠点であった鏡の位置制御の必要性や分光に時間がかかる点が解消され、分散分光に比べて干渉による分光法の有用性が高まった。これを踏まえ、試作中の分光器では静的フーリエ分光法に光学素子を追加することで、高い効率を維持しつつ、新たに大まかな空間分解能をもつ高分散分光器を目指している。これにより太陽系外惑星の研究分野では、直接撮像が可能な天体について大気組成などを詳しく探ることが可能となる。

本発表では、光学系の組み立て段階にある新分光器の現況、及び将来展望について紹介する。

- 1 E V Ivanov 2000 J.Opt.

観測 b1 金沢大断熱消磁冷凍機における読み出し系ノイズ低減を目指した研究 中山健太 (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 X 線の光子 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 以下の極低温下で動作させることにより、6 keV の X 線に対して $E/\Delta E \geq 1000$ 高いエネルギー分解能を実現する。その中でも超伝導遷移端における抵抗変化を温度計として利用する 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さらなる向上が見込まれている。DIOS 衛星などの計画では、TES 型 X 線マイクロカロリメータを用いることで、これまでの X 線天文衛星よりも優れた撮像分光性能を目指している。

金沢大学では TES 型 X 線マイクロカロリメータに必要な 100 mK 以下の極低温を無重力状態でも実現できる断熱消磁冷凍機の動作環境の開発を進めている。先行研究では、5.9 keV の X 線に対してエネルギー分解能 $\Delta E = 3.8 \pm 0.4$ eV(FWHM) を実現している。さらなる性能向上を目指し、我々は今回、TES の信号を読み出す回路のノイズに注目した。先述の通り、TES は超伝導遷移端における抵抗変化を温度計として利用する。その抵抗変化は TES の動作回路の電流変化として SQUID

(Superconducting QUantum Interference Device) で読み出している。我々の使用する SQUID 駆動装置は SQUID の動作点を決定する際に使用する 23 Hz の正弦波を発生させる IC から電源をとっており、SQUID 動作時にもその 23 Hz とその高調波がノイズとして漏れ込み、分光性能に影響していた。そこで私は新たにレギュレータで電源を作り、正弦波を外部導入できるように SQUID 駆動装置を作り直した。実際に SQUID を動作させたところ、駆動装置としての正常な動作と、期待通りのノイズ特性を確認した。これにより、今後の X 線パルス取得実験のさらなる分光性能の向上が期待される。

観測 b2 ひとみ衛星搭載 SXS のエネルギー分解能に及ぼす宇宙線の影響に関する研究 甲斐優 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

2016年2月に打ち上げられた X 線天文衛星ひとみ (ASTRO-H) に搭載された軟 X 線精密分光装置 (SXS) は、X 線マイクロカロリメータを用いて、6 keV の X 線に対して 5 eV (半値全幅) という画期的なエネルギー分解能を実現した。X 線マイクロカロリメータとは、入射 X 線光子の 1 個 1 個のエネルギーを素子の温度上昇として検出し、極低温下動作させることで非常に高い分解能を実現することができる X 線分光装置である。SXS は従来の半導体検出器と比べて 30 倍程度優れた性能を持ち、これにより高温ガスのバルクな運動や乱流を ~ 100 km/s の精度で測定することが可能になった。衛星による天体観測では、目標天体からの光子以外の不必要な信号も存在する。その 1 つは宇宙線と呼ばれる荷電粒子であり、検出器の性能に影響を及ぼす。SXS にはゲイン変動をモニタするために、 ^{55}Fe 線源の特性 X 線を常時照射している較正用ピクセルが存在する。私は、荷電粒子の分光性能への影響を評価するために、地磁気の cut-off rigidity (COR) とエネルギー分解能の関係を調べた。その結果、検出器のエネルギー分解能は、COR の値によって 0.5 eV 程度変化することがわかった。本公演ではその解析結果について詳しく報告する。

観測 b3 ハイブリッド CMOS イメージセンサの X 線検出器としての性能評価 下井建生 (東京工業大学 宇宙科学研究所 堂谷研究室 M1)

天体から放射される X 線を観測するための望遠鏡の焦点面検出器としては、CCD イメージセンサという固体撮像素子が標準的に使われている。CCD は他の X 線検出器に比べて高い検出効率と大面積、中程度のエネルギー分解能を兼ね備えているからである。

しかし、CCD には時間分解能が悪く、そのため明るい天体では X 線光子のエネルギーを正しく観測できないなどといったデメリットも持っている。近年では CMOS イメージセンサという CCD とは信号の読み出し方法の異なる撮像素子の高性能化が進んでおり、上記 X 線 CCD の欠点を克服できることが

ら、CCD に替わって X 線望遠鏡の焦点面検出器に使われることが期待され始めている。

私は、ADVACAM 社から販売されているハイブリッド CMOS イメージセンサ MiniPIX で X 線照射実験を行い、そのエネルギー分解能や電化分割の状況を調べ、CCD と比較し現時点での CMOS イメージセンサの性能を評価してみた。実験結果から CMOS が将来 X 線天文学において有用となるかを考察する。

観測 b4 近赤外線高分散分光器 WINERED : short time scale での波長安定性の調査 渡瀬彩華 (京都産業大学理学研究科 M1)

WINERED は京都産業大学神山天文台赤外線高分散ラボ (=LiH) で開発された近赤外線高分散分光器である。波長 0.9-1.35 μm (z,Y,J bands) において高分散 ($R_{max}=28,000$ および 80,000) でありながら、これまでにない超高スループット ($> 50\%$ for Wide mode, $> 35\%$ for Hires mode) を達成している [1]。現在、WINERED はチリ・La Silla 天文台にある口径 3.58m の New Technology Telescope (NTT) に搭載され、星間物理学や恒星物理学を中心とする幅広いサイエンスにおいて多くの成果を生み出しつつある。

WINERED はいわゆるドップラーサーチを目的とした高分散分光器ではないため、長期的な波長決定精度の安定性は求められない。よって、一般的な高分散分光器に求められる以上の格別な配慮をした設計ではないが、赤外線観測においては観測中の数分~数時間の短いタイムスケールの安定性は、高 S/N 比 (> 200) のスペクトルを得るためには重要になってくる。例えば、異なるフレーム間で波長のドリフトが生じた場合、わずかな波長分解能の劣化が発生するだけでなく、スカイスpekトル差し引き後の夜光輝線の引き残しや標準星を用いて大気吸収線補正の際の割り残しが発生し S/N 比が劣化する。実際、初期の WINERED では実際に $\sim 0.25\text{pix/K}$ のドリフトが発生し、最終スペクトルの精度に影響を与えていた。これは、ハニカム構造を使用した光学定盤内部の非均一な熱伝導に起因していることが詳細解析によって判明したので、断熱材を用いて実効的な比熱を大きくし、温度変化を緩やかにすることで波長ドリフトの軽減を試みている。

本発表では、上記対策後の NTT の環境下での波長安定性の解析結果及び、最終解析スペクトルに与える影響について議論する。

- Ikeda, Yuji; Kobayashi, Naoto; Kondo, Sohei; et al. "High sensitivity, wide coverage, and high-resolution NIR non-cryogenic spectrograph, WINERED" Pro

観測 b5 1.85 m 電波望遠鏡による多輝線観測のための受信機開発

上田翔汰 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

星間分子雲の凝縮から恒星誕生までの星形成過程を解明する上で、分子雲の温度や密度同位体比などの物理状態を知ることが非常に重要である。分子雲の主な構成要素は水素分子であるが、これは 10 K 程度と非常に低温である上に無極性分子であるため、電磁波を放射しない。そこで、水素分子の存在量をはじめとする主要な物理量を精度よく推定することができる一酸化炭素の同位体 ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O の分子輝線の観測を行うことがたいへん重要になる。

我々大阪府立大学宇宙物理学研究室はこれら 3 つの CO 分子輝線 ($J = 2 - 1$, 220 ~ 230 GHz) の同時観測を実現する口径 1.85 m の電波望遠鏡を開発し CO の広域マップを作成してきた。本望遠鏡の従来の受信機システムは円偏波分離 2SB-Mixer 方式で、両偏波ともに同じ周波数領域を観測するものであった。

さらに、近年は星形成過程を解明する上で、一酸化炭素分子だけでなく様々な分子輝線の観測を行い、分子進化などの議論を行うことが重要視されるようになった。しかし、多様な分子輝線の広域観測はあまり進められていない。そこで本研究では、220 ~ 240 GHz 帯に存在する CO, SO₂, CH₃OH, HNCO などの多様な分子の輝線の広域マップを作成するために、右旋偏波と左旋偏波で異なる観測周波数領域を設定した新たな受信機システムを開発した。本開発で主に行なったことは、「225 GHz, 235 GHz の LO に対応した 2 種類の SIS Mixer の製作と評価」および「常温 IF 信号伝送系の設計と評価」で、SIS 評価系専用の IF 系の改良も行なった。その評価系を用いて SIS Mixer の評価を行なった結果、225 GHz, 235 GHz の LO それぞれに最適な SIS Mixer を各 2 個用意することができた。さらに 常温 IF 信号伝送系のコンパクト化にも成功した。そして現在、1.85 m 電波望遠鏡にこれらを搭載し、試験観測を行っている。

観測 c1 NANTEN2 マルチビーム受信機システムの開発

稲葉哲大 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M2)

我々は、チリ・アタカマ砂漠の 4m ミリ波/サブミリ波望遠鏡 NANTEN2 を用いて一酸化炭素分子 CO($J=2-1,1-0$) 輝線の観測を行い、その観測データを用いて大質量星形成や超新星残骸など様々な星間現象を個々の領域において解明を進めてきた。その一方で、他波長とは異なり、現在に至るまで高分解能で全天をカバーした CO の観測データは未だに存在しないことが大きな課題となっている。

その現状を受けて、我々は NANTEN2 で南半球から観測可能な全天の約 70% をカバーする超広域 CO 観測を行う NASCO(NANTEN Super-CO Survey as Legacy) プロジェクトを推進している。この計画の主要な領域 (全天の約 37%) をおよそ 2 年で実現するために、旧来のシングルビームとは異なる

る、高分解能での広域サーベイの可能な新型のマルチビーム受信機を開発を行なっている。

NASCO 計画では 115GHz 帯両偏波 SSB 受信機 4 ビームと 230GHz 帯両偏波 2SB 受信機 1 ビームを組み合わせたマルチビーム受信機を搭載予定であり、ビーム数の増加に伴い制御機器の台数が桁違いに増加する。この問題を解決するために、CompactPCI 規格の D/A ボードや A/D ボードを使用し、その CompactPCI ボードを複数枚搭載できる計算機を使用することで、1 台の計算機で全ての機器を一括して制御することが可能になる。これまでに、実験室において 1 ビームにおける測定系は完成しており、現在は実際に NANTEN2 に搭載する 5 ビーム同時制御用の計算機類のセットアップと受信機システムの開発を行っている。本公演では、新型のマルチビーム受信機のシステム概要と開発の現状、今後の計画について述べる。

観測 c2 NASCO 受信機に用いる超伝導 SIS 素子の評価

鈴木雅浩 (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、NASCO (underlineNANTEN2 underline Super underline CO survey as legacy) を進めている。この観測は全天の 70% 我々は現在、NASCO 用受信機を開発を行っている。この受信機の特徴は、115 GHz 帯 4 ビームと 230 GHz 帯 1 ビームの計 5 ビーム受信機であり、かつ 2 周波同時観測が可能である。観測効率の向上により、現在の受信機では数十年かかると言われている NASCO を約 4 年で達成することができる。また、天体からの RF 信号 (Radio Frequency) と、局部発振器からの LO 信号 (Local Oscillator) を混ぜることにより周波数を変換するヘテロダイン方式を採用している。ヘテロダイン受信機には SIS 素子 (Superconductor Insulator Superconductor) という受信機の性能を大きく左右する超伝導素子が搭載されている。素子によるノイズが小さければ、より微弱な信号も短時間で検出できるようになる。また、広い周波数帯域の受信ができる素子を用いれば、一回の観測で得られる観測輝線を増やすことが可能になる。NASCO 受信機用素子は IF 信号の周波数帯域 4-12GHz 内で受信機雑音温度 (TRX)50K 以下が要求されている。これまで使用してきた素子は TRX が 50K 以下のものはあったが、周波数帯域は 4-8GHz と狭く、要求性能を満たせたものは見つかっていなかった。しかし、大阪府立大学の上月さんが設計した素子 上月素子は周波数帯域が 4-12GHz 内で TRX も 50K 以下のものが確認されている。私は上月素子を評価し、NASCO 受信機用の素子を確保する必要があった。今回上月素子の評価を行ったところ、要求性能を満たす素子が見つかった。TRX は LO 信号の周波数が 90-115GHz の間で IF 信号の周波数帯域が 4-12GHz 内で 50K 程度という良質な素子が得られた。本公演では NASCO 受信機用 SIS 素子の評価に用いたデュワなどの評価系の構成、評価に用いたシステム、詳細な結果について報告する。

観測 c3 フーリエ分光器を用いた中間赤外線アレイ 検出器の波長感度特性の評価 土川拓朗 (名古屋大学 赤外線グループ (UIR 研) M1)

次世代赤外線天文衛星 SPICA の中間赤外線分光器 SMI では、 1026×1026 ; ピクセルの Impurity Band Conduction (IBC) 型 Si:Sb 検出器を用いた観測が行われる。この 2 次元アレイ検出器の全ピクセルに対して波長感度特性の高精度化を要求することで、より高精度な天体スペクトルを得ることが期待されている。しかし、これまで赤外線 2 次元アレイ検出器の波長感度を効率的に評価する方法は確立されてこなかった。そこで、本研究では、赤外線天文衛星「あかり」の Backup 品である IBC 型 Si:As 検出器 (256×256 ; ピクセル) を利用して、中間赤外線 2 次元アレイ検出器の波長感度特性の評価方法を確立する。

波長感度の測定には、複数ピクセルを同時に分光可能で、かつ検出光の S/N が高いフーリエ赤外分光器を用いた。中間赤外線検出器は極低温でのみ動作可能であるため、クライオスタットを用いて冷却する必要があり、常温のフーリエ分光器の干渉光はクライオスタット内に入射させる必要がある。そのため、クライオスタット内に光を取り入れるための低温光学系と構造体を設計した。

結果として、分光器からの干渉光が当たった 27 ピクセルについて、約 3% (波長 $24 \mu\text{m}$) の精度で、同時に素子の波長感度特性を測定することができた。今後、より S/N を上げ、測定できるピクセル数を増やすことで、次世代赤外線天文衛星 SPICA に用いる IBC 型 Si:Sb 検出器の評価にも応用する予定である。また、波長感度特性を得ることができた 27 ピクセルについて、それぞれ検出素子に加える印加バイアスを上げると、波長感度特性のカットオフ波長が有意に伸びたことを確認できた。このことは、現在、良好な感度を持つ検出器が存在しない波長 $30 - 50 \mu\text{m}$ の観測にも応用が期待される。

観測 c4 新しい遠赤外線分光装置の構造物に塗布する 黒色塗料の特性評価 前田浩希 (名古屋大学 赤外線グループ (UIR 研) M1)

我々は、インドと共同で気球観測実験を行っている。一階電離炭素の微細構造禁制線である、 $[\text{CII}]158 \mu\text{m}$ を用いて、星形成領域の観測をしている。現在は、遠赤外線アレイ検出器を用いたファブリ・ペロー分光器を開発し、観測性能をより向上させた観測を目指している。この分光装置を、インドの 1、望遠鏡に搭載して観測を行う。

このうち、分光装置内の構造物には、散乱、迷光を抑えるために黒色塗装を施す必要がある。また、分光装置自身の熱放射を低減するために、分光装置全体を極低温で使用する必要がある。よって、黒色塗料に求められる特性は以下である。1) 検出器が感度を有する、遠赤外線波長域において反射率が $\sim 1\%$ 未満である。2) 極低温-室温を繰り返す熱サイクルで剥離が起

こらない。そこで、遠赤外線黒いことが知られている特殊な黒色塗料を二種類入手し、1) 2) を満たすか調べた。

測定試料は、膜厚を定量的に制御できる塗布方法を確立して作成した。反射率測定は、赤外線フーリエ分光器を用いて行った。高い設置再現性を得られる治具、複数の角度を測定できる $h\eta$ ステージを用いた補助光学系を取り入れ、反射率の膜厚の違い、入射波長、入射角度依存性を調べた。一方、熱サイクルは、試料を液体窒素に浸して 2) の状況下で剥離の様子を観察した。

反射率測定の結果から、同じ膜厚で比較した場合、二種類の黒色塗料で反射率に有意に差があることが分かった。さらに、反射率が低い方の黒色塗料では、膜厚 $400 \mu\text{m}$ まで塗布することで、1) をおおよそ満たすことが分かった。その時の反射率の最大値は入射角度 10° 、 50° でそれぞれ 0.6% 、 3% となった。一方、熱サイクルは黒色塗料の種類、膜厚に依らず、10 回以上は剥離しない結果となった。測定で得られた結果を、物理モデルを用いて考察する。

観測 c5 トモグラフィー技術を用いたすばる望遠鏡 における次世代補償光学装置の波面センサーユニットの 開発 櫻井大樹 (東北大学天文学専攻 M1)

地上望遠鏡でサイエンス観測を行う際、天体からの光は地球大気の影響によってその位相が変位し、波面が乱れた状態で地上望遠鏡に届く。補償光学はこの波面の乱れを測定して補正することで、大気の影響を受けない仮想的な波面を再構成することができ、大型地上望遠鏡にとって補償光学は必要不可欠な技術となっているが、従来の補償光学では、視野のわずかな部分のみ補償することができなかった。すばる望遠鏡に搭載されている補償光学装置もこのような従来型であり、広い視野で補償光学を効かせられるような装置の開発が求められている。我々のグループでは広視野多天体補償光学 (MOAO) 装置の開発を行い、すばる望遠鏡の補償光学装置のアップグレードを目指している。MOAO はトモグラフィー技術という技術を用いることで、複数のガイド星を用いて波面情報を高さ方向に 3 次元的に推定することができ、すばる望遠鏡や将来的には TMT のような大型地上望遠鏡でも広視野での補償を行うことができる。しかし、複数のレーザーガイド星を使用するため無限遠にある天体とは合焦位置が異なり点や、またナスミス焦点に設置するため追尾中に天体を写野に固定するためのイメージローターが必要であるが、レーザーガイド星は主鏡に対して固定されているため、検出器は独立に回転させる必要がある。これらハードウェア面での問題点や、波面測定と補正をリアルタイムで行うための計算速度やエラーやノイズを最小限に抑えるソフトウェア面での精度の課題がある。本発表では、これらの問題や課題をクリアするためのハードウェア面での開発状況、ソフトウェア面での開発状況と、すばる望遠鏡での補償光学装置のアップグレードの将来的な展望を紹介する。

観測 c6 JAXA 宇宙科学研究所標準平行 X 線光源室 用可視光平行光源の立ち上げと平行度評価 浅井龍太 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

宇宙科学研究所の特殊実験棟 1 階には 30m の長さの X 線ビームラインが設置されており、首都大やその他研究グループが検出器の性能評価に用いている。しかし、X 線を発生させ測定を行うには真空層に入れる必要があるため時間がかかり、そのため測定中に検出器の異常がわかった場合ビームラインからすぐに取り出し対応することもできない。

そこで真空槽に入れる前に X 線観測装置の性能を簡易的に測定できるよう、可視光の平行光源を設置する。

本実験ではドブソニアン望遠鏡を組み立て横に倒し、接眼部からピンホールを通して光を出すことで平行光源として利用している。望遠鏡は安価、熱伝導率が 0 に近い、大口径が得やすいなどの理由から、Sky Watcher ドブソニアン望遠鏡「DOB 18」を採用した。望遠鏡を標準平行 X 線光源室に設置し光軸を調整した後、セオドライト (方位角と仰角の傾きを計測するため角度計測器) を 2 台用いて焦点距離の調節を行った。具体的には、光源と主鏡の距離を変えることで望遠鏡から射出される光の elevation が変わるので、焦点距離を変えながら 2 台のセオドライトで同じ elevation で測定する距離を平行光を出す位置として求めた。さらに今回の実験では性能評価として、平行光源の平行度を評価した。具体的には、平行光の領域ごとの光線方向 (elevation と azimuth) の分布を測定することで平行光源全体の平行度を得た。平行度を求めるために、セオドライトを動かしそれぞれの測定点で平行度の測定と、ペンタプリズムに反射させた平行光をセオドライトで測定する 2 通の方法で測定を行った。前者の測定では平行光全体の elevation がおよそ 5 秒角以内で得られたが、azimuth は足場の影響でセオドライトの水準が正確に定まらなかったため適切な結果は得られなかった。後者の測定では平行光全体の azimuth が 5 秒角以内、elevation は 15 秒角以内として得られた。また、得られた結果から azimuth と elevation の差がわかる 2 次元マップを作成した。

観測 c7 Gaia 計画の科学的ゴールと Gaia 探査機について 南祥平 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

Gaia は、世界初の位置天文衛星で 10 万個以上の恒星を観測しカタログを作った Hipparcos(1989-1993 年) の後継として、ESA(European Space Agency) によって、2013 年 12 月 19 日に打ち上げられた位置天文衛星である。Gaia の名前の由来は、Global Astrometric Interferometer for Astrophysics の頭文字をとったものである。これは、独自の干渉計の光学技術を利用する計画だったことに由来するが、後に観測方法は 2 つの光学望遠鏡によって天体が集められた光を調べるといった直接的な方法に変わった。そのため、頭文字としての意味はなさなくなっ

たが、プロジェクトの継続を示すため名前はそのままとなっている。Gaia のデータ処理と校正を担当する機関として、2007 年に DPAC(Data Processing and Analysis Consortium) が選ばれた。打ち上げをしてから数週間後、太陽-地球系の L_2 ラグランジュ点に到達し、2014 年 7 月 19 日から科学観測を開始した。それから Gaia は 5 年間に渡り、20.7 等級以下のすべての天体についての位置、固有運動、年周視差、G バンド (Gaia の観測波長) での広帯域測光、BP(Blue Photometry) と RP(Red Photometry) を観測している。2016 年 9 月 14 日に最初のデータがリリースされ (DR1)、そのデータには 11 億個以上の天体の位置、固有運動、年周視差、明るさが含まれている。このデータは、Gaia のホームページを通して Gaia Archive から検索できる。DR2 では、BP/RP と、このドップラー効果の観測に基づく視線速度のデータも含まれる予定となっている。今回は、この Gaia 計画の科学的ゴールと、Gaia 探査機とその搭載物についてまとめる。

1 Gaia Collaboration The Gaia mission (2016)

観測 c8 マイクロマシン技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発 藤谷麻衣子 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

我々は、地球磁気圏探査衛星 GEO-X やバイナリーブラックホール探査衛星 ORBIS などへの搭載を目指して、マイクロマシン (MEMS) 技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発を行っている。数百 μm のシリコン基板にドライエッチングにより数万個の数十 μm 幅の高アスペクト比の曲面穴を形成し、側壁を反射鏡として用いる。高温アニールにより反射面を nm レベルに平滑化し、さらに平行 X 線を集光するために高温塑性変形で基板を球面に曲げる。さらに反射率向上のため重金属 (Pt, Ir) を膜付けし、最後に 2 枚の基板を重ねて Wolter I 型光学系を完成する。我々はこれまで、インハウスで試作した光学系サンプルを用いて、本手法での X 線反射結像を世界で初めて実証してきた。

MEMS X 線望遠鏡の角度分解能の理論限界は、穴幅と X 線のエネルギーに依存する X 線回折で決まる。1 keV の X 線に対して、20 μm の穴幅では約 13 秒角が限界となる。これは従来の日本の X 線天文衛星に搭載された望遠鏡に比べて 5-10 倍優れる。そこで、我々は回折限界を目指して開発を進めている。角度分解能を制限するのは主に、反射面の揺らぎによる形状精度と、鏡の位置誤差による配置精度である。形状精度はドライエッチング時の表面粗さとうねり、アニールの条件が関係する。配置精度はドライエッチングでの穴の垂直性と、変形時の理想球面からのずれが影響する。反射面の表面粗さや形状、配置の揺らぎは有効面積にも影響を及ぼす。そこで、形状の悪い反射鏡の端、すなわち基板の表面と裏面を、ドライエッチング後に削る化学研磨プロセスの導入も試している。

観測 c9 電子飛跡検出器を用いたガンマ線望遠鏡における充填ガスの改良

中村優太 (京都大学 宇宙線研究室 M2)

数 MeV の低エネルギーガンマ線の帯域は原子核壊変によるガンマ線が観測されるため、元素合成を直接観測可能な数少ないプローブである。しかし、その観測技術は他の帯域に比べ非常に遅れており、MeV 帯域で最高の感度を誇る COMPTEL をもってしても GeV 帯域の Fermi 衛星との間には 2 桁の「感度ギャップ」が存在する。レンズや鏡といった光学系が使用できないため特殊なイメージング法を用いる必要があり、従来のコンプトン法やコーデッドマスク法ではイメージングに必要な 2 次元情報に欠落があるため十分なイメージ性能が得られなかったのがその要因である。我々は MeV 帯域において 1mCrab の感度を達成することで、この状況を打開することを目的に新しいイメージング手法を用いたガンマ線カメラである電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) を開発している。ETCC はガスを用いた電子飛跡検出器とコンプトン散乱ガンマ線を検出するためのシンチレーション検出器アレイから構成される。ガスを散乱体とすることで電子の反跳方向が検出できるようになった点が従来のコンプトン法との大きな違いであり、これにより入射ガンマ線情報を計算機上で再構成することが可能となり光学と同様のイメージングが可能となる。2018 年 4 月には豪州 Alice Springs において大気球を用いた観測技術実証試験 : SMILE-II+ を予定している。従来、充填ガスとしてメインに使用していたアルゴンは原子番号 Z が大きいことからコンプトンカメラにとって雑音となる X 線光電吸収の断面積が大きいという問題があった。本研究では低 Z の原子からなり、かつ電子を多く持つ CF_4 を主成分とするガスへの変更による雑音削減・コンプトン断面積の拡大を主目的に充填ガス変更試験を行った。 CF_4 の W 値が 54 eV と高いことからエネルギー分解能の低下が懸念されたが Ne-Ar 間で起きるペニング効果を利用することでこの問題を解決した。以上の成果と ETCC 性能の改善について紹介する。

1 H.Sipil. NIM, 133, 251 (1976)

観測 c10 ニュートリノ・核子崩壊実験の高精度化研究

竹中彰 (東京大学 宇宙線研究所 M2)

講演者は世界最大の水チェレンコフ検出器であるスーパーカミオカンデ (SK) 実験、および、将来計画のハイパーカミオカンデ (HK) 計画に参加している。本講演ではこれらの水チェレンコフ検出器におけるニュートリノ・核子崩壊実験の高精度化について述べる。

HK 計画における高感度光センサー開発

HK 計画は、高統計化のため、解析使用領域は SK の約 17 倍を計画している。また、高精度化のため、光子検出感度を SK

のものより倍増、更に、時間分解能を約半減させた光センサー (50cm 径光電子増倍管) を開発中である。太陽ニュートリノの観測精度向上のためダークノイズ低減は必須であり、ダークノイズ低減 (目標値 4kHz) に向けた光センサーの長期安定性の試験を開発の最終段階として行っている。

SK の高精度、高統計に向けた光センサーの理解、および、ソフトウェア開発

講演者は、現在運用中の SK においても光センサー (50cm 径光電子増倍管) の詳細な理解を基にして、ソフトウェア開発を行い、高精度、高統計化に向けた研究を行っている。SK では光子の光電面に当たる位置による光センサーの応答 (Gain、光子検出感度、信号伝達時間、時間分解能) の違い (位置依存性) は大まかな理解に留まっており [1]、シミュレーション、解析においては応答を一様に近似している [2][3]。そこで、講演者は光センサーの応答の位置依存性を詳細かつ高精度に測定し、その効果を実装したシミュレーションを開発した。そして、実装による既存の解析手法 (事象再構成) への影響評価を行った。今後、光センサーの応答位置依存性を考慮した解析手法の開発により、SK の測定精度の向上、更に、解析使用領域の増大によるデータ統計量の増加が期待される。

HK 計画の実現、SK の高精度化により、太陽ニュートリノ、超新星爆発時に観測されるニュートリノの測定精度、統計量の向上だけでなく、暗黒物質由来のニュートリノや核子崩壊の発見感度に対して飛躍的な向上が期待される。本講演では光センサーの開発状況、測定結果を主に、それに基づくソフトウェア開発の見通し、および、最新の状況を述べる。

- 1 A. Suzuki, et al., Nuclear Instruments and Methods A 329, (1993) 299
- 2 K. Abe et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 737 253 (2014).
- 3 M. Shiozawa, Nuclear Instruments and Methods A 433, (1999) 240