2024年第54回 天文・天体物理若手夏の学校 観測機器 分科会 集録集

∎ 謝辞

20242024年度天文・天体物理若手夏の学校は、 基礎物理学研究所を始め、国立天文台、公益社 団法人 伊勢志摩観光コンベンション機構、光 学赤外線天文連絡会、理論天文学宇宙物理学懇 談会、宇宙線研究者会議(CRC)、天文教育普及 研究会、及び複数名の方々*からのご支援によ り成り立っております。

事務局一同厚く御礼申し上げます。 *協賛(個人、敬称略):青山 尚平、長峯 健太郎、 西村 淳、牧島 一夫、三浦 均、水村 好貴、その 他匿名希望6名

観測機器 分科会



| 観測 a01 | 田中 敦也 | Si ピクセル検出器 Timepix3 を用いた MeV ガンマ線の指向性計測と冬季雷観 |
|--------|--------|--|
| | | 測 |
| 観測 a02 | 西村 悠太 | MeV 天文学における符号化マスクを用いた狭視野 Si/CdTe 望遠鏡 miniSGD の |
| | | 角分解能の向上 |
| 観測 a03 | 佐藤 丞 | 宇宙線ミューオンの角度再構成による位置検出器 DSSD の二枚積層モジュール |
| | | の評価 |
| 観測 a04 | 古川 湧基 | CdTe DSD を用いた薬物動態イメージングとがん治療への応用 |
| 観測 a05 | 青山 有未来 | 超小型 X 線衛星 NinjaSat に搭載するガス X 線検出器の軌道上における検出器 |
| | | 応答関数の構築 |
| 観測 a06 | 出口 颯馬 | MeV γ線による電子陽電子対消滅線観測計画 SMILE-3 に向けたガス検出器内 |
| | | 充填ガスの最適化 |
| 観測 a07 | 中山 和哉 | ISS 搭載 MoMoTarO 検出器による太陽フレアの観測の検討 |
| 観測 a08 | 小俣 雄矢 | 中性子を用いた月の水資源探査 |
| 観測 a09 | 奥村 華子 | TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能向上の為の超伝導転移温度と |
| | | 熱容量のコントロール |
| 観測 a10 | 中野 祥大 | EBIT への搭載に向けた、TES マイクロカロリメータの磁場特性の評価 |
| 観測 a11 | 東 竜一 | 機械学習を用いた半導体ピクセル検出器における X 線イベント判定法の開発 |
| 観測 a12 | 辻 智紀 | IceCube-Gen2 実験用光検出器 LOM 内部に搭載する PMT の事前性能評価方法 |
| | | の再構築 |
| 観測 a13 | 笠井 勇次郎 | IceCube-Gen2 実験の新型光検出器の製作とその結果 |
| 観測 a14 | 上村 悠介 | XRPIX による低バックグラウンドの硬 X 線分光観測について |
| 観測 a15 | 河本 琉風 | 1.85m 電波望遠鏡による 3 帯域同時観測に向けた準光学系バンドパスフィルター |
| | | の開発 |
| 観測 a16 | 秋澤 涼介 | CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD 低周波望遠鏡用偏光変調器のための低温保持機構 |
| | | の開発 |
| 観測 a17 | 相澤耕佑 | CMB 偏光観測に向けたアルミナ赤外吸収フィルターのためのレーザー加工によ |
| | | るモスアイ反射防止構造の開発 |
| 観測 a18 | 岩垣 大成 | CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD 低周波望遠鏡偏光変調器のための低温回転機構の |
| | | 開発 |
| 観測 a19 | 井澤 拓海 | CMB 偏光観測のための低温光学測定系の開発 |
| 観測 a20 | 大熊 悠介 | 宇宙重力波望遠鏡におけるバックリンク干渉計の開発 |
| 観測 a21 | 田邊 ひより | トモグラフィー補償光学における波面推定の開発に向けた波面再構成手法の検 |
| | | 討 |
| 観測 a22 | 小嶋 拓斗 | 赤外全天雲モニタの開発 |
| 観測 a23 | 安藤慶之 | Lobster Eye Optics を用いた広視野光学系のアライメント実証 |
| 観測 a24 | 今度 隆二 | 将来衛星計画 HiZ-GUNDAM のための FPGA ベースの pnCCD ドライバ&読 |
| | | み出しシステムの設計と開発 |
| 観測 a25 | 樋口 茉由 | X線分光撮像衛星 XRISM 搭載 軟 X 線撮像検出器 (SXI) の軌道上における検出 |
| | | 感度の評価 |
| 観測 a26 | 吉田 有佑 | 太陽フレア観測ロケット FOXSI-4 搭載用 X 線望遠鏡の開発 光線追跡シミュ |
| | | レーション |
| 観測 a27 | 白车礼 碧衣 | 局温塑性変形技術を用いた湾曲 Si ブラッグ反射型偏光計 |
| 観測 a28 | 菅井 春佳 | 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 |
| 観測 a29 | 岸本 拓海 | ISS から観測する大気透過 CXB を用いた大気密度測定の精度見積もり |
| 観測 a30 | 桒野 慧 | 宇宙X線による超高層大気の密度測定に向けたコリメータ開発 |
| 観測 a31 | 小笠原 勇翔 | GEO-X 衛星用 MEMS Wolter I 型望遠鏡の開発 |

| 観測 a32 | 宮内 俊英 | MEMS 技術を用いた Wolter I 型望遠鏡の熱耐性の検証 |
|--------|--------|--|
| 観測 a33 | 康 哲洙 | Wolter I 型反射鏡における可視光評価システムの開発 |
| 観測 a34 | 岡野 恭祐 | ガラスリボンを用いた X 線反射鏡の反射率測定 |
| 観測 a35 | 河合 優樹 | 展開可能な軸外し望遠鏡の支持構造設計 |
| 観測 a36 | 坂本 和樹 | 引きずり三点法による大口径鏡の計測誤差の調査 |
| 観測 a37 | 藤井 扇里 | TAO 望遠鏡用近赤外線 2 色同時多天体分光撮像装置 SWIMS の開発 |
| 観測 a38 | 石川 あゆみ | 次世代赤外線天文観測装置に用いる非球面鏡の鏡面精度測定 |
| 観測 b01 | 佐藤 太陽 | MeV γ線観測実験 SMILE-3 計画にむけた新型ガス飛跡検出器及びトリガーシ |
| | | ステムの開発 |
| 観測 b02 | 藤田 紗弓 | X 線天文衛星搭載用 SOI ピクセル検出器の X 線に対する放射線耐性の評価 |
| 観測 b03 | 狩野 佑成 | ガラスリボンを用いた X 線反射鏡の開発 |
| 観測 b04 | 上林 暉 | 蛍光X線による月面の元素マッピングを行う X 線カメラの開発 |
| 観測 b05 | 向井 一眞 | 超広帯域クアッドリッジアンテナの性能評価 |
| 観測 b06 | 野原 祥吾 | VERA 水沢 20 m 電波望遠鏡に搭載する 6 - 18 GHz 帯広帯域受信機の開発 |
| 観測 b07 | 田中 健翔 | すばる望遠鏡・高感度広帯域分光装置 NINJA の検出器読み出し系の開発 |
| 観測 b08 | 石川 諒弥 | O4a 観測期間中の重力波候補イベントに対する KAGRA のアンテナパターン |
| | | の評価 |
| 観測 b09 | 西佑記 | 宇宙機搭載用 pnCCD の軟 X 線性能評価 |
| 観測 b10 | 長髙 一心 | 熱真空試験と振動試験による Lobster Eye 光学系の結像性能評価 |
| 観測 b11 | 栄野比 里菜 | 南極 30cm サブミリ波望遠鏡用光学ポインティングシステムの開発 |
| 観測 b12 | 影山 璃音 | ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画「HiZ-GUNDAM」について |
| 観測 c01 | 山崎 豪 | 南極 30 cm サブミリ波望遠鏡用 新 IF ボックスの設計と製作 |
| 観測 c02 | 谷内 逸華 | 宇宙赤外線干渉計 LIFE のためのナル干渉計を用いた極低温可動鏡の駆動精度 |
| | | の計測 |
| 観測 c03 | 中川 俊輔 | 宇宙可視光背景放射観測 6U 衛星 VERTECS の開発状況 |
| 観測 c04 | 高橋 光明 | 多層共役補償光学 (MCAO) の現状と今後の展望 |
| 観測 c05 | 一ノ瀬 将也 | LTAO 波面センサー系の調整と問題の報告 |
| 観測 c06 | 西山智規 | 超伝導遷移端型 X 線検出器の物理機構の解明を目指した基礎研究 |
| 観測 c07 | 志賀 文哉 | PDD 構造を導入した X 線天文衛星搭載用 SOI ピクセル検出器のサブピクセル |
| | | レベルの X 線応答特性の評価 |
| 観測 c08 | 平井 健登 | 広視野 X 線集光系の開発と性能評価 |
| 観測 c10 | 伊藤 耶馬斗 | X線分光撮像衛星 XRISM 搭載軟 X 線撮像装置 Xtend の軟 X 線撮像検出器 SXI |
| | | におけるフレームデータとノイズ性能の評価 |
| 観測 c11 | 望月 雄友 | XRISM 衛星搭載極低温検出器の地上・軌道上データを用いた X 線イベント処 |
| | | 理最適化 |
| 観測 c12 | 大熊 佳吾 | 狭視野 Si/CdTe 半導体コンプトン望遠鏡による気球実験の試作機 miniSGD の |
| | | 開発と現状 |
| 観測 c13 | 玉木 諒秀 | 重力波検出器 KAGRA における防振懸架装置の制御 |

-index へ戻る

観測a01

Si ピクセル検出器 Timepix3 を用いた MeV ガンマ線 の指向性計測と冬季雷観測

田中 敦也

Si ピクセル検出器 Timepix3 を用いた MeV ガンマ線の指向性計測と冬季雷観測

田中 敦也 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

MeV 帯域の宇宙ガンマ線は宇宙における粒子加速や重元素生成を探る重要なプローブであるが、keV(X 線)、GeV ガンマ線帯域に比べて感度が数桁劣る。特に1 MeV を超えるような帯域では、コンプトン反跳 電子や電子陽電子ペアに大きなエネルギーが与えられるため、電子飛跡検出技術が有効となる。一般に電子 飛跡検出には飛跡が長いガス検出器が用いられ、京大の SMILES や東大/阪大の GRAMS があり開発が進 んでいるが、固体である半導体検出器を散乱体に導入する手法も構想されている。数桁のスケールで電子密 度が大きな固体中では電子飛跡は短くなるものの、半導体検出器の特徴であるエネルギー分解能、位置分解 能の良さを活かし、我々は Si ピクセル検出器 Timepix3 を用いて電子飛跡の検出に挑戦した。Timepix3 は 0.5 mm 厚の Si 素子と ToT ADC 搭載の2次元 ASIC を接合したもので、1.56 ns の時間分解能、55 × 55 µ m2 のピクセルサイズで、15 × 15 mm2 を撮像できる。これまでに 1.27 MeV のガンマ線を照射し反跳 電子を 60 イベント抽出することで、電子飛跡を検出する方法を開発・検証した。また、北陸冬季雷の観測 に投入し、2022 年に雷放電突発ガンマ線(下向き TGF)の観測に成功した。本講演では Timepix3 の解析 手法の開発状況と TGF イベントに関する解析状況について報告する。

1 イントロ

1.1 MeV ガンマ線

MeV 帯域のガンマ線は加速された電子や励起され た原子核などから放射され、粒子加速や重元素生成 を探る上で重要であることが知られている。しかしこ の帯域における検出感度は keV 帯域 (X 線) や GeV 帯域と比べて数桁劣っており、その要因としては以 下のものが挙げられる。

- 1. X 線のように結像・集光ができない。
- 2. コンプトン散乱が支配的であり検出効率が悪い。
- 3. 衛星軌道上では宇宙線による放射化が生じるため、バックグラウンドが高い。

このような特徴を有する MeV ガンマ線観測であ るが、その撮像・分光方法としてはコンプトンカメ ラ、符号化マスク、コリメータがあげられる。これ らを用いた検出器は検出器サイズでの遮蔽や吸収が 有効な数百 keV の帯域で有用であり、数十分角の角 分解能を達成している。しかし 1MeV 以上のガンマ 線は物質に対する透過力が強く、これらの手法はそ の有用性が失われてしまう。一方で図1に示すよう に、この帯域ではコンプトン反跳電子や電子陽電子 ペアに大きなエネルギーが与えられるため、電子飛 跡検出技術が有効となる。一般に電子飛跡検出には 散乱体に気体を用いたガス検出器が用いられ、京大 の SMILES や東大/阪大の GRAMS があり開発が進 んでいる。ところで近年 100 µm を切る細かいピッ チの Si 半導体アクティブピクセル検出器が実用化さ れ、ピクセル化された Si 検出器を固体電離箱として 使用し、電子飛跡を高速に実測できるようになった。 電子密度が数桁のスケールで大きな固体中では電子 飛跡は短くなるものの、半導体検出器の特徴である エネルギー分解能、位置分解能の良さを活かし、我々 は Si ピクセル検出器 Timepix3 を用いて電子飛跡の 検出に挑戦した。

1.2 雷ガンマ線

宇宙からの MeV ガンマ線を観測するには大気の遮 蔽から逃れるために衛星軌道において行われる必要 がある。一方で、30 MeV に至るガンマ線が地上に 降り注いでることが知られており、**雷ガンマ線**と呼 ばれている。



図 1: ベーテブロッホの式から Si 内における各エネ ルギーの飛程を算出したグラフ。100 kev を境に急激 に飛程が伸びていることがわかる。

観測された雷ガンマ線のエネルギースペクトルの概 形から、その放射機構は制動放射であると考えられ ている。これは雷雲中の電場で電子が相対論的な速 度にまで加速されている証拠であり、自然界で知ら れるほぼ唯一の静電場加速器である。また、雷ガン マ線には数分間という継続時間を持つ Gamma-Ray Glow と、1 ms以下の時間に大量のガンマ線が発生す る Terrestrial Gamma-ray Flash の 2 種類の存在が 確認されている。そしてそれぞれの発生過程に関す る大まかなモデルがあり、雷雲中の電場構造の解明 や落雷の予測にも大きく貢献すると考えられている。

2 Si ピクセル検出器 Timepix3



図 2: Si 半導体検出器 Timepix3 を CAD で再現。緑 で示した 15mm x15mm の Si チップが入射窓の直下 にある。

Timepix3 は 0.5 mm 厚の Si 素子と ToT ADC 搭 載の 2 次元 ASIC を接合したもので、1.56 ns の時間 分解能、55 × 55 μ m² のピクセルサイズで、15 × 15mm² を撮像できるホール読み出しの CMOS セン サである。本研究では荷電粒子の3次元飛跡を得る ために使用。飛跡を再構成する3次元位置情報は以 下の3つの情報を用いる。まずXY軸の位置座標は ピクセル番号を用いる。そしてZ軸にはホールの読 み出し時刻差を用いる。

3 3次元飛跡再構成

3.1 データ前処理

電子飛跡を定量的に扱うにはまず3次元空間に飛 跡を再構成する必要がある。検出器から得られる情 報は全てがその読み替え値であるため、補正の精度も 重要となる。ここではその中でも重要な**Time-walk** について述べる。

3.1.1 Time-walk

Timepix3から出力される時刻情報はエネルギー依 存性を持つ。これは半導体検出器においてピクセル あたりの波高値が高いほど,キャリア生成から閾値を 超えるまでの時間が短いために生じるずれである。 例えば 100 keV の電子が Si 内でキャリアを生成し ながら進んでいく状況を考えると、全キャリアの生 成時刻は 0.1 ns 以下のスケールで同時であるはずで あり、ドリフト速度方向のキャリア生成位置の違い を無視すれば、同時刻に信号が読み出されるはずで ある。しかし図3左にあるように低エネルギーであ るほど、実際のキャリア生成時刻よりも遅く検出さ れていることがわかる。この Time-walk による時 刻のずれを補正するため、エネルギーごとにずれの 中央値を算出し (図中の緑点)、それらに対してモデ ルfit することで補正関数を得た。図3右は補正後の 時刻差分布である。0~5 keV においては、各エネル ギーの中央値に未だに系統誤差が見られるものの、5 keV 以上の点では補正関数により時刻情報のずれが 小さくなっていることがわかる。

3.2 Z 位置決定精度

3.2.1 モデル化対象:µオン

Timepix3 で検出される荷電粒子の飛跡にはµオン 飛跡が散見される。µオンは電子と同じ電荷量を持ち



図 3: エネルギー vs 飛跡内相対時刻差の二次元ヒス トグラムを Walk 補正前後で比較。補正前後でイベ ント内の相対時刻差が小さくなっていることがわか る。【イベントセレクション】バックグラウンドデー タから 100 から 200 keV のエネルギーを有し、かつ 2~4 ピクセルで構成されたイベントを抽出。

ながら約200倍の質量を持つ粒子であり、相対論的 な速度で地上に降り注いでいることが知られている。 このuオンが検出器有感部分に入射し、電離作用に よってその飛跡上にキャリアを形成するのだが、そ の形状はほぼ直線であることが予想できる。電子と の質量比が非常に大きく、一回の散乱において電子 に渡す運動量が相対的に少ないため、元の運動量べ クトルは大きく変化することはない。そのため、荷 電粒子の飛跡を定量化するにあたって、このμオン 飛跡に直線モデルを仮定するのが最も簡単と考えた。 まず μ オン飛跡を取得するためにバックグラウンド 測定より得られたすべての飛跡データに対して最小 二乗法を用いて、ピクセル平面内で直線 fit を行った。 この時 fit 関数とデータ点には誤差の2乗和が定義で き、その値が小さいほど飛跡は直線に近いと言える。 本解析では実際に多数の直線上飛跡と誤差の2乗和 を見比べることで適切な閾値を概算した。これによ りデルタ線などが混入していない直線状飛跡を170 時間の測定データから 558 個の飛跡を得ることに成 功した。

3.2.2 モデル化と残差分布

直線状イベントに対して3次元直線ftを行い、ピ クセルごとにエネルギーの値と飛跡モデルとの残差 を取得し、2次元ヒストグラムにしたのが図4であ る。これを見ると低エネルギー(0から5keV)の領 域では幅の広い分布を持っているものの、それより も高エネルギー領域ではほぼ一定の幅になる。今回 の解析ではこの分布を用いてエネルギーごとに残差 の標準偏差を定義し、関数化することでこれを Z 方 向の位置決定精度とした。



図 4: 残差とエネルギーの二次元ヒストグラム 残差は低エネルギーほど広がり、高エネルギーほど 狭い分布を持つ。赤点で表示した標準偏差の点を結 ぶように青の error 関数を定義。これによりエネル ギーに依存する座標が取りうる値の範囲を得た。

3.3 電子への応用

ここまでに荷電粒子の3次元飛跡を、その再構成 の精度も含めて、定量的に扱う手法を開発した。そ れを今後扱うコンプトンリコイル電子の飛跡に対し て用いることで、3次元再構成された電子飛跡を確 認する。図5はピクセル平面空間における電子飛跡 (右)、厚み方向であるZ軸とピクセルY軸方向平面 空間における電子飛跡を図示した。ピクセル平面に はピクセルサイズが、Z方向には上で求めたエラー 範囲が不定性として乗っているものの、目視であっ てもきちんと紐状の飛跡として認識できることがわ かった。

4 雷ガンマ線観測

4.1 装置展開

2022 年、北陸冬季雷に伴う雷ガンマ線を観測する ために名大グループは石川県金沢市にて、シンチレー タ検出器、そして Timepix3 を含む、2 つの新型 TGF



図 5: 電子飛跡の3次元再構成図と進行方向予想

指向性計測装置を展開した。このうち Timepix3 は 5 石川県警察学校のグラウンドを間借りして設置した。 展開にあたり必要な準備としてはインターネットを 用いたリモートログインによる遠隔操作を可能にす 使 ること、そして冬季野外展開であることから装置周 りの湿気対策が必須であったが、99 日間の連続運転 に成功した。

4.2 TGF 検出

2022年12月18日 14時頃にカウントレートの 急激な増加を確認し、時刻と増光の変化率を鑑みて TGFを検出したと断定。詳細に解析を進めると8つ のパルス状の信号のようなものが見えたものの、パ ルスそれぞれの時間領域を描画すると多数の縦線の 混入が確認された。一方で、8つのパルスを重ねて いくと縦線が薄れ、飛跡が浮き上がった。これはハ イレートなイベントであったため、データ転送が追 いつかなかったことが考えられ、短時間に生じた飛 跡の一群を8つのパルスに分けて転送していたこと が強く示唆される。従ってピクセル平面における解 析は可能であるが、時刻情報失ってしまったため、3 次元解析のめどは立っていない。

まとめ

1.56 ns という時間分解能を持つ CMOS センサを 使って、荷電粒子の飛跡を定量的に扱えるメソッド を開発。コンプトン反跳電子にも適用可能であるこ とを確認した。また、身近な MeV ガンマ線現象とし て知られている雷ガンマ線の観測に挑戦。2022 年 12 月 18 日 14 時頃に観測した。しかし得られたデー タに破損があり、今後の解析には工夫が必要である。

Reference

米田浩基 2017,

宇宙 MeV ガンマ線高感度観測に向けた半導体コンプト ンカメラの試作とその評価,

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻修士論文

辻結菜 2021,

Si/CdTe 両面ストリップ検出器と BGO アクティブシー ルドを用いた気球実験用ミニ半導体コンプトン望遠鏡, 名古屋大学大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻修 士論文

久富 章平 2017, 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, 名古屋大学大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻修 士論文 -index へ戻る

観測a02

MeV天文学における符号化マスクを用いた狭視野 Si/CdTe望遠鏡 miniSGDの角分解能の向上

西村 悠太

MeV 天文学における符号化マスクを用いた狭視野 Si/CdTe 望遠鏡 miniSGDの角分解能の向上

西村 悠太 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

sub-MeV・MeV 帯域は、 熱的粒子の世界と非熱的粒子の世界の境界で、粒子加速や元素合成といった宇 宙の高エネルギー現象を理解する上で重要な帯域であるが、現状の MeV 天文学では他波長と比べ観測感度 が数桁低く、その観測は遅れている。2027 年には NASA から COSI 衛星が打ち上がる。COSI 衛星は Ge 半導体コンプトン望遠鏡を導入し、長らく停滞していた MeV 帯域の全天観測で1桁高い感度を実現する。 MeV ガンマ線観測の高感度化に伴い、百を超える天体を観測しようとすると、これらを分解するためには数 分~数十分角レベルの角度分解能の実現が必須である。特に、銀河中心に存在すると期待される MeV ダー クマターの崩壊起源の放射を間接観測する際には、ブラックホールや中性子星などの寄与を取り除く必要が あり、COSI 衛星に匹敵する感度を持ちつつ、銀河中心に点在する複数の天体を分解できる 15 分角レベルの 角分解能をもつ検出器の開発が必要だと考える。本研究では、狭視野 Si/CdTe コンプトン望遠鏡の性能実証 実験機 miniSGD に重金属製の符号化マスクを導入してさらなる角度分解能の向上を狙い、MeV 帯域での精 密な撮像分光能力を実証してその技術的課題を検証する実験を進めた。さまざまな線源によるガンマ線を照 射し符号化マスクとコンプトン再構成を組み合わせた実証実験の長時間測定を実施し、実際のデータを用い てその利点と課題を検証した。本講演ではその解析結果をもとに、符号化マスクを用いたコンプトン望遠鏡 の性能の現状を報告する。

研究背景 1

現状の MeV 天文学では他波長と比べ観測感度が 数桁低く、その観測は遅れている。図1は INTE-GRAL/SPI による電子-陽電子対消滅線 (511 keV) で みた銀河中心である。角分解能は約3度であり、銀 河系の空間分布のバルジ領域に数十度と大きく丸く 分布している。一方、図2は INTEGRAL/IBIS によ る硬 X 線 (17-60 keV) でみた銀河中心である。角分 解能で約12分角であり、硬X線で分解できている赤 や黄色の点がブラックホールや中性子星である。こ のように、MeV 帯域では角分解能の悪さから、MeV 放射の発生源が分かっている天体を他波長と同じよ うに分解して観測することが不可能である。特に、銀 河中心に存在するとされる MeV ダークマターとの区 別をすることができない。

定の COSI 衛星により、検出感度は1桁向上すると を開発する予定である。本研究では、その新イメー されているものの、角分解能は 511 keV で INTE-GRAL/SPIと同等である。そのため、ダークマター の空間分布と多数の天体の MeV 放射の区別がつか



図 1: INTEGRAL/SPI で見た銀河全天

ず、数分から十数分角レベルの角分解能を持つ新た な検出器が必要となる。この一手段として狭視野コ ンプトンカメラと符号化マスクの組み合わせで実現 2027 年に NASA・米 UC Berkley から打ち上げ予 させ、表1のように COSI と対をなす新イメージャー ジャー開発のための概念実証として多様なイメージ ング手法を定量的に評価する。



図 2: INTEGRAL/IBIS で硬 X 線で銀河中心を 8 度 × 8 度の視野でみた観測データ。SPI で捉えていた 511 keV 放射に対し、狭い領域にもかかわらず様々な 天体を分解して観測できている。

| | COSI 衛星 | 新イメージャー | |
|------|----------------------|--------------------------|--|
| 視野 | 全天 | 狭視野 (~ 10° × 10°) | |
| 角分解能 | 3.2° | 0.17° (10 分角) | |
| 観測感度 | $\sim 10{\rm mCrab}$ | $\sim 10 \; {\rm mCrab}$ | |
| 目的 | 全天 survey | 銀河中心などの分解 | |
| | | | |

表 1: COSI 衛星と新イメージャーの性能比較

2 miniSGDのレビュー



図 3: miniSGD の概略図

miniSGDでは、散乱体にSi半導体、吸収体にCdTe 半導体を用いたSi/CdTe半導体コンプトンカメラに より、コンプトン散乱イベントのイメージングを行 う。概略図を図3に示す。入射光子のエネルギー E_{γ} 、 到来方向を示す散乱角 θ_K はそれぞれ

$$E_{\gamma} = E_{\rm Si} + E_{\rm CdTe} \tag{1}$$

$$\cos \theta_K = 1 - \frac{m_e c^2}{E_{\rm CdTe}} + \frac{m_e c^2}{E_{\rm Si} + E_{\rm CdTe}} \qquad (2)$$

と表される。ここで E_{Si} は Si 半導体で検出されるエ ネルギー、 E_{CdTe} は CdTe 半導体で検出されるエネ ルギー、 m_ec^2 は電子の静止エネルギー 511 keV であ る。到来方向を決定する際にはコンプトン再構成に より、入射光子の到来方向を特定する。

BGO アクティブシールドでは、検出器自体をシー ルドとして使用し,主検出器であるコンプトンカメ ラを囲うように設置する。CXB などを物理的に遮蔽 するだけでなく、反同時計数法をとることで、バッ クグラウンドを判別して除去することが可能となる。

符号化マスクは50%開口した特殊なパターンで構成され、観測される放射線をこのパターンに従って 遮蔽する。符号化マスクは、W(タングステン)製 で、厚さは1mm、ピッチサイズは1.2mm、URAパ ターンを採用しており、図3のように検出器前方に 設置して観測する。角分解能は、望遠鏡の焦点距離 がレンズのように光学系で決まらず、ジオメトリに より決定される。マスクの焦点距離L、マスクのピッ チサイズをdとすると、角分解能 Δθ との関係は以 下の式となる。

$$\Delta \theta \sim \frac{d}{L} \times \frac{180}{\pi} \tag{3}$$

3 実験セットアップ

本研究では、miniSGD に¹³³Ba を 477h 照射した。 以下、セットアップを図 4 に示す。miniSGD 本体は 恒温槽(-20°C)の内部にあり、miniSGD の中心が ケーブルの中心と一致するように横置きにして、恒 温槽のケーブル穴から線源を照射した。なお、実験 室の構造及び線源強度の不足の観点から式(3)より 角分解能を 1° になるよう計算して設置した。



図 4: 実験装置全体を横から見た概念図

コンプトン再構成 4

観測結果からエネルギーと位置情報を得て、これ らを用いることでコンプトン再構成によるイメージ ングを検証する。放射線発生率が顕著なエネルギー である 81 keV、356 keV を解析に使った。コンプト ン再構成によるイメージングは図5、図6のように なった。角分解能の評価はARM:Angular Resolution Measure ででき、検出器から求まる散乱角 θ_K と実際 の入射光子の到来方向と各検出器で信号を検出した 位置から幾何学的に求まる散乱角 θ_G による角度の差 分で表される。ARM はそれぞれ、81 keV で 10.2°、 356 keV で 3.8° となった。



図 5:81 keV における ARM の広がり

符号化イメージング 5

§4のデータセレクションの上で、符号化マスクに よるイメージができるのか検証した。コンプトン散 乱した相互作用位置をもとに、符号化マスクが検出 器に映った detector イメージを描くと図7と図8の 焦点距離を長くすることで 0.5 分角の分解能を実現



図 6: 356 keV における ARM の広がり

ようになった。81 keV での detector イメージは顕著 なものが得られたが、高エネルギー側での detector イメージは統計数の少なさと符号化マスク自体を放 射線が透過する確率の高さから、符号化マスクの影 と推測されるものが見える結果となった。これらを 符号化イメージングすると図9と図10のようになっ た。系統誤差や一部データしか使っていないため改 善の余地はあるものの、コンプトンイメージングと 組み合わせた上で符号化イメージングできたといえ る。356 keV では、マスクの系統誤差の影響をかなり 受けてしまって雑音が多く発生しているものの、線 源の特定に成功した。なお、81 keV では角分解能は 計算すると $\Delta \theta = 1.2^\circ$ であり、実験理論値の 1° より 大きくなったもののコンプトンイメージングのみの 場合と比べ、およそ9倍に改善することに成功した。

今後の展望 6

現在、電子陽電子対消滅線のエネルギー放射であ る²²Na の 511 keV 輝線の照射実験を行っている。そ の解析を通して、1°での角分解能を実現可能か検証 を進めている。また、銀河中心の MeV ダークマター 探査に適用できるようにしていきたいと考える。そ こで、角分解能 10 分角を実現するため、兵庫県立大 学にあるニュースバル放射光施設等で照射実験をす ることを検討している。マスクの増厚も検討してお り、信号雑音比を小さくするための実証も必要であ ると考える。

加えて、100-200 keV 帯域においては、マスクの

できる。偏光観測の実現可能性についても検証して いきたいと考える。



図 7:81 keV detector イメージ



図 8: 356 keV detector イメージ



図 9: 81 keV decode イメージ。図 7 の detector イ メージから、そのマスクの影とパターン、81 keV ± 1FWHM で selection したエネルギー値を再構成し、 複合化することにより作成される



Reference

T. Siegert et al. 2016, Gamma-Ray spectroscopy of position annihilation in the Milkey Way

K. Okuma et al. 2024, Proc. SPIE, Prototype fine-imaging Narrow field of view Semiconductor Compton telescope with shielded codedmask, mini-SGI

図 10: 356 keV decode イメージ。図 9 の 81 keV に て符号化イメージングで作成した decode イメージ と同様に作成した。356 keV は detector イメージで マスクの影を捉えることはできなかったが(図 8)、 decode イメージでは線源のイメージングに成功して いる。

--index へ戻る

観測a03

宇宙線ミューオンの角度再構成による位置検出器 DSSD の二枚積層モジュールの評価

佐藤 丞

宇宙線ミューオンの角度再構成による位置検出器 DSSD の二枚積層モ ジュールの評価

佐藤 丞 (東京理科大学大学院 創域理工学研究科)

Abstract

現在、月探査プログラムである「アルテミス」計画が、アメリカ、日本などの国際協力で推進されている。ア ルテミス計画では、月周回軌道の国際宇宙ステーションや月面での有人活動が計画されており、その有人活 動に不可欠となるのが宇宙放射線による宇宙飛行士の被ばく管理である。しかしながら、月周回軌道を含む 地磁気圏外での宇宙放射線計測の実測データは少ない。そこで、JAXA、理化学研究所、東京理科大学の共 同で、月周辺での被ばく線量を評価するエネルギースペクトロメータ Lunar-RICheS の開発を行っている。 Lunar-RICheS は 15 MeV - 250 MeV のエネルギー帯域を計測する低エネルギー計測部と、250 MeV - 2 GeV のエネルギー帯域を計測する高エネルギー計測部の 2 ユニットで構成され、これによって宇宙飛行士 が受ける被曝線量の評価に必要な 15 MeV - 2 GeV の一次宇宙線のエネルギー計測が可能となる。また各 計測部について、位置検出器である両面ストリップ型シリコン検出器(DSSD:Double-sided Silicon Strip Detector)を 2 枚積層することで、上層、下層の位置検出器 DSSD による検出位置から入射粒子の到来方向 を決定できる。本研究では 2 枚積層した到来方向測定用 DSSD 二枚積層モジュールを用いて荷電粒子である 宇宙線ミューオンの観測を行うことで、入射荷電粒子の到来方向の決定に関する評価を行った。その結果、 宇宙線ミューオンの到来方向の割合はミューオンにとって障害物となる建物の壁の厚みをよく反映したもの であり、宇宙線ミューオンの到来方向を正しく測定できていることを明らかにした。

1 月周辺での宇宙放射線計測

現在、宇宙探査に向けた活動は国際的に活発化し ているが、中でも有人月探査についての検討が進ん でいる。この有人月探査活動で重要となる技術の一 つが宇宙放射線による被ばく管理及び防護技術の構 築である。ここでは有人月探査計画の現状について 説明した上で、現在開発中の被ばく線量評価システム である、エネルギースペクトロメータ Lunar-RICheS について説明する。

1.1 有人月探査の展望

現在推進されている代表的な有人月探査計画の一つ に NASA(National Aeronautics and Space Administration: アメリカ航空宇宙局) による「アルテミス 計画」がある。1972 年のアポロ 17 号以来の有人月 探査、及び持続可能な基地の構築をへて最終的には 火星への人類の到達を目標としている。図1にはア ルテミス計画の流れを示す。アルテミス計画では、合 計3回の飛行を経て、人類を月面へと送り届ける計 画になっている。アルテミス計画が順調に進めば人 類が月面、または月周辺空間に滞在することとなり、 有人火星飛行の拠点として月が活用される。建設予 定のこの拠点が Gateway と呼ばれる月周回有人拠点 である。

| First CLPS Mission | In 2021, the first Communical Large Papeland Services delowing will begin with two comparisos delowing 20 conferences in the large outlide that will part the way for hanks expression |
|--------------------|--|
| VIPER | This pall-card-scard cover and lat the first is translights later polar and samples to characterise the Autobulke and sense taken of volation, instanting water, arrive a large regiment the Moon |
| CAPSTONE CubeSat | The enail wateline will be the first speacewith a enter the later filter fination at Hale Orbit— In False have of the Galeway. These it without new rangetain techniques to validate prediction models, industry accentances about the anal. |
| Artemis I | The unreaved, models flight of the integrated Space Laurch System nodes and brinn spaces of will worky spaces of performance and beat choice's read when during the legis space fairth rearry at nearly 3,000 degrees followeries. |
| PPE & HALO Launch | The Prevent and Proportions Tenneses (PPE) and the Hardhollow and Logistics Outpoor (AMUS) are the treat paces of the Schweige Se-Search acknow meetingations from WSA and the Durquan Space Agency will conduct overy characterization of the does space unversionment. |
| Artemis II | Do No. 18-bity convecting Tagle, MASk advocation will see the record for the bothest human based from Earth. They will indicate darg spaces communication and nevigation systems and miture that the support systems large from humany and outs. |
| Artemis III | With contribution guined through Artenias Law Artenias E. Otso: and his creat will prove again thread to the Minos, this since bounding the Huntas Landing System that will bring the fast wereast and next thread to this Journ particle. |
| | First CLPS Mission VIPER CAPSTONE CubeSat Artemis I PPE & HALO Launch Artemis II Artemis III |

図 1: アルテミス計画 (NASA 2020)

1.2 宇宙放射線計測への要求

月探査への計画が進むにあたり、宇宙放射線による 被ばく管理及び防護技術の構築が求められる。人体で 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

最も放射線の感受性が高い臓器は RBM(Red Borne Marrow) と言われており、その影響を受けると言わ れるエネルギーは数 10 MeV である。また、一般的 な宇宙線体の厚み (約 20 g/cm²) を通過しうる放射線 のエネルギーは 2 GeV である。このエネルギー領域 を一台で計測することのできる被ばく線量評価シス テムとして JAXA-理化学研究所-東京理科大学で共 同研究を進めているのがエネルギースペクトロメー ター Lunar-RICheS である。

1.3 チェレンコフ検出器 Lunar-RICheS の概要

月探査機搭載用チェレンコフ検出器 Lunar-RICheS(Lunar-Ring Imaging Cherenkov Spectrometer)は、搭乗員や搭載実験の放射線影響評価 の線量評価必須な、15 MeV - 2 GeVの太陽粒子 線、銀河宇宙線の入射エネルギーの弁別を行うエネ ルギースペクトロメータである。



図 2: Lunar-RICheS の外観

図 2 に Lunar-RICheS の外観のイメージを示す。 Lunar-RICheS は低エネルギー計測部と高エネルギー 計測部の 2 つのユニットでで構成されている。両計 測部の前段には位置計測部が取り付けられ、入射粒 子の到来方向を計測する。高エネルギー計測部では、 チェレンコフ放射体と MAPMT(MultiAnode Photomultiplier)を組み合わせたチェレンコフ検出器を 用いて入射エネルギーの計測 (250 MeV - 2 GeV) を行う (図 3)。低エネルギー計測部では、複数の Si 検出器と CdTe(Cadmium Telluride) 検出器を積層し た構造をとり (図 4)、計測対象とするエネルギー範 囲は 15 - 250 MeV である。Si 検出器と CdTe 検出 器で検出されたそれぞれのエネルギーの合計を比較 する ΔE - E 法を用いることで、エネルギー弁別を

行う。以上の2つのユニットを用いることでダイナ ミックレンジのエネルギースペクトル計測が可能な 超小型 (~ 10cm × 10cm × 12cm) で軽量のチェレン コフ検出器として、開発を進めている。宇宙空間で Lunar-RICheS を複数の検出器と同時に協調運用を 行うことにより、相補的にデータを補完することで リアルタイム被ばく線量モニタシステムを確立する。



図 3: 高エネルギー計測部(チェレンコフ検出器)



図 4: 低エネルギー計測部 (Si/CdTe 検出器)

1.4 位置計測部 両面シリコンストリップ 検出器 DSSD

前節で述べた通り Lunar-RICheS では荷電粒子の エネルギーを計測すると同時に、粒子の到来方向の 推定や検出器内のトラッキングを可能とするため、各 ユニットそれぞれのエネルギー計測部の前段、後段に 位置計測部として DSSD(Double-sided Silicon Strip Detector: 両面シリコンストリップ検出器) と呼ばれ る Si 半導体検出器を使用する。前段には2枚の DSSD を積層し、個々の DSSD の反応位置から入射粒子の 到来方向を推定する。また、DSSD を通過した後の粒 子の軌道を予測し、エネルギー計測部への入射位置 を判定等に使用する。さらに各エネルギー計測部の 後段に1枚のDSSDを組み込むことで、エネルギー 計測不可能なイベントを排除することができる。

我々東京理科大学は到来方向決定用としてのDSSD の評価を担当しており、本研究では、前段に2枚積 層したDSSDによる到来方向の決定精度の評価を目 的とする。

2 位置検出器 DSSD

前節で述べたように、DSSD(Double-sided Silicon Strip Detector: 両面シリコンストリップ検出器) と は Si 半導体位置検出器であり、粒子の入射位置を 128×128 の二次元情報として得ることのできる検出 器である。DSSD による入射粒子の検出方法と仕様 について説明する。

2.1 両面ストリップ半導体検出器

空乏化された半導体の中に荷電粒子が入射すると、 電子正孔対(キャリア)が生成される。落としたエ ネルギーに比例する量のキャリアは印加された電圧 に従って各電極に移動するため、各電極に現れる電 荷を読み出すことにより放射線のエネルギーを知る ことができる。両面半導体検出器は電子、正孔によ



図 5: 両面ストリップ半導体検出機の検出原理

る電荷を各電極に設置されたストリップで検出する。 図 5 のように Cathode 側、Anode 側の N 個のスト リップは直交するようにできており、それぞれの電極 で検出される計 2N 個の一次元のデータを合わせる ことにより N × N の位置情報を得ることができる。

3 DSSDの構造

DSSD (Double-sided Silicon Strip Detector: 両 面シリコンストリップ検出器)は図6に示すように 検出器の層数を減らしてクーロン散乱を減少し粒子 飛跡再構成の角度および空間分解能を向上させるた めに1つのデバイスで二次元位置を得ることを目的 として開発された検出器である。両面にはそれぞれ 128本のストリップが並んでいるため、粒子の入射位 置を128×128の二次元の情報として得ることができ る。表1には本研究で用いた DSSD の仕様を示す。



図 6: DSSD の構造 (萩野浩一 2013)

表 1: 本研究で用いた DSSD の仕様

| parameter | value | |
|-----------------|---------------------------|--|
| strip pitch | $250~\mu{\rm m}$ | |
| strip width | $130~\mu{\rm m}$ | |
| number of strip | 128 | |
| imaging area | $32 \times 32 \text{ mm}$ | |
| thickness | $750~\mu{\rm m}$ | |

4 DSSD2枚積層モジュールによる 宇宙線ミューオンの観測

本研究では DSSD を 2 枚積層したモジュールを用 いて宇宙線ミューオンを観測し、その到来方向の再 構成を行ったこれにより DSSD2 枚積層モジュールに よる粒子の到来方向の決定に関する評価を行った。

4.1 到来方向の決定方法

上層、下層それぞれの DSSD による入射粒子検出 位置の違いから図 7 のように天頂角 θ と方位角 φ を 決定することで到来方向を測定した。



図 7: 到来角度の再構成

4.2 天頂角の分布の観測結果



図 8: 観測された宇宙線ミューオンの天頂角分布

図 8 には観測された宇宙線ミューオンの天頂角分 布を示す。一般的に宇宙線ミューオンの天頂角の分 布は $\cos^2 \theta$ に比例することが知られている (辻修平 1998)。しかしながら、今回得られた結果は大きく異 なり、約 $\cos^5 \theta$ に比例する分布となった。

我々はこれを観測を行った建物(東京理科大学野 田キャンパスの4号館)の壁による遮蔽が原因と考 えた。

4.3 建物の遮蔽による影響の検証

建物の遮蔽による影響を調べるため、検出器を90° 回転させた状態で同様の観測を行い、得られた分布 が90°回転したものであるかを調べた。図9には90° 回転させる前後での観測された宇宙線ミューオンの 方位角分布を示す。得られた結果から、南北で宇宙 線ミューオンの到来数を比較すると北からの到来数 の割合が非常に多く、また、東西で宇宙線ミューオ ンの到来数を比較すると西からの到来数の割合が多 いという結果であった。この結果は観測を行った建 物の壁の枚数と対応しており、壁の多い方向からの 到来数が少ないという結果であった。また、この結 果は検出器を 90°C 回転した前後で同様の結果が得 られ、宇宙線ミューオンの到来数の割合に偏りがあ ることは建物の遮蔽の影響であると考えられる。



図 9: 観測された宇宙線ミューオンの到来方向の分 布。検出器を 90°回転させる前後での方位角分布の 結果と、観測を行った建物との対応を表している。

5 結論

本研究では月探査機搭載用チェレンコフ検出器 Lunar-RICheS に搭載する位置検出器 DSSD の二枚 積層モジュール評価のため宇宙線ミューオンの観測 を行った。観測結果から、到来方向の分布は建物の 構造をよく反映したものであり、DSSD の二枚積層 モジュールが荷電粒子である宇宙線ミューオンの到 来方向の分布を正しく観測できていることを示した。

Reference

- 藤澤海斗. ARTEMIS 計画に向けたエネルギースペ クトロメー タ Lunar-RICheS の DSSD 位置検出 器開発. 東京理科大学, 2023.
- NASA. Nasa's lunar exploration program overview, 2020
- 萩野 浩一. ASTRO-H 衛星搭載 HXI(硬 X 線イメー ジャー)の撮像分光能力の検証. Master's thesis. 東 京大学, 2012.
- 辻 修平. 岡山粒子望遠鏡による海面位での大気宇宙 線ミューオンの全方位測定. 岡山大学, 1998.

-index へ戻る

観測a04

CdTe DSDを用いた薬物動態イメージングとがん治療 への応用

古川 湧基

CdTe-DSD を用いた薬物動態イメージングとがん治療への応用

古川 湧基 (東京理科大学大学院 創域理工学研究科)

Abstract

私が所属する研究室では主に X 線を用いた天体の観測的研究や X 線/ガンマ線検出器の開発を行っている。 さらに、近年それらの宇宙観測用の技術を医療分野、特に核医学の分野に応用した検出器の開発についても 取り組んでいる。今回紹介する研究は薬物動態イメージングを可能とする検出器の開発であり、これはがん 治療にも応用される。我々の研究では、放射線核種を結合させたがんの治療薬や診断薬を体内に投与し、体 外からそれら核種の放出する X 線やガンマ線によるイメージングを行うことで、体内におけるがん治療薬の 動向を観測するとともに、薬剤ががんの病巣に集積しているかどうかの視覚的な評価を目的としている。こ れを実現させる検出器の開発は CdTe-DSD(両面ストリップ型検出器)を基盤として進められている。テルル 化カドミウム (CdTe) を用いた検出器は低エネルギーの X 線に対して高いエネルギー分解能を有する。しか しそれに加えて、がん治療の効率化を図るうえで正確な薬物動態を把握するためには、高水準の検出感度や 画像分解能が必要とされている。本講演では CdTe-DSD を用いたイメージングの観測例を紹介するととも に、検出器の性能評価によるイメージング能力の改善や前臨床実験における小動物生体イメージングのため のコリメータの最適化といった今後の研究の展望について報告する。

1 研究背景

私が所属する研究室では、主に、X 線を用いた天 体の観測的研究や、宇宙観測用のX 線/ガンマ線検出 器の開発を行っている。さらに、このような天文・天 体物理の研究分野におけるスペクトル解析や高エネ ルギー分解能を有する検出器開発の技術を医療分野 に応用する研究にも取り組んでいる。私の研究はこ の医療応用、特に核医学への応用研究に深く関わっ ている。

ところで、日本人の2人に1人が生涯でがんにな るというのは誰もが1度は聞いたことがあるだろう。 それほどがん治療技術の発展はこれからの私たちに とって欠かせないものであり、現在も多種多様な研 究が進められている。その一つとして図1に示すよ うな薬物動態イメージングという研究が存在する。 ^{99m}Tc, ¹¹¹In, ¹²⁵Iといった放射線核種を結合させた がん治療薬もしくは診断薬を体内に投与し、体外から それら核種の放出するX線やガンマ線によるイメー ジングを行うことで、図1のように、体内における薬 剤の動向を観測するとともに、薬剤ががんの病巣に 集積しているかどうかの視覚的な評価が可能となる。

薬物動態イメージングにおいて高解像度なイメー ジングを可能にする検出器の開発からがん治療への 応用という大きな目標には主に2つのアプローチが ある。まず1つ目は、医療用の検査機器開発である。 上述したような検査および診断方法を人間に対して 実施する場合、薬剤によるがんへの集積は詳細な位 置が分かるほどその後の治療の効率化へとつながる。 2 つめは薬剤の開発である。がんに集積する治療薬 や診断薬を開発するには、まず小動物を用いて前臨 床試験を行う必要がある。その際、薬剤がどの程度 病巣に集積できるのかといった薬の性能評価を実施 するためにも、小動物による高解像度なイメージン グは必要とされる。

私はこのような薬物動態イメージングの過程で用 いられる X 線/ガンマ線検出器の開発を目指し、小 動物による前臨床試験に向けて CdTe-DSD を基盤と した検出器開発に取り組んでいる。

2 検出器の原理

2.1 CdTe-DSDの構造

本研究で用いる CdTe-DSD(両面ストリップ型検出 器) について述べる。CdTe(テルル化カドミウム) 半 導体検出器は、Si や Ge に比べて原子番号が大きく X 線およびガンマ線に対する検出効率が高いことや、 バンドギャップエネルギーが Ge の 0.67 eV と比べて



図 1: 薬物動態イメージング



図 2: マウスに [¹²⁵I]NaI を投与し、腫瘍を持つマウ スの生体内および生体外イメージングを行った。(a) 実験セットアップ。(b)Butterworth filter を用いた 25 ~29 keV のエネルギー帯域での生体内画像とマウス の光学画像。左図 (加えて図 (c)) のカラーバーは解 析に用いた X 線源とバックグラウンドの領域を示す。 (c) 生体外のイメージング画像と解析に使用した領域 を重ね合わせたもの。[1]

CdTe は 1.44 eV と大きく、0 °C から-20 °C 程度の 冷却温度で動作させることができるためペルチェ素 子を用いた冷却設備の小型化が可能であるという点 で優れている。検出器の構造を図 3 に示す。検出面 の面積は 32 mm 四方であり、ピッチ幅は 250 µm、 ストリップ幅は 200 µm、ギャップ幅は 50 µm の各 面 128 本のストリップ電極を有し、両面で直交する ように配置されている。

2.2 検出過程とイメージング

検出器の半導体部分にX線やガンマ線が入射する と、光電吸収やコンプトン散乱の相互作用に伴って電 子正孔対が生成され、それらは両極に付加された電圧 による電場に沿って電子はAnode、正孔はCathode 側に移動する。両面の電極は信号処理・読み出し用 ASICにつながっており、電極上に生じた誘導電流が



図 3: CdTe-DSD の構造。

各 ch ごとに電圧へと変換、ADC 変換されてデジタ ル信号として読み出される。各ストリップで取得し た ADC 値から1次元のエネルギー情報を取得し、信 号を読み出した両面のストリップの位置を組み合わ せることで図5のように2次元のイメージングを行 うことが可能である。

CdTe は正孔の寿命が短くキャリアの損失が起こり やすい。そのため、正孔の影響が大きい Cathode の スペクトルでは低エネルギー側にテールを引く構造 が現れる。これはエネルギー分解能を悪化させる要 素の1つであるが、反応深さ情報を用いてスペクト ルを再構成することで改善することが可能である。

また、CdTe-DSD では観測時間に伴ってペデスタ ルやエネルギーピークの幅や位置が変化する減少が 起こる場合がある。これは半導体内部の電場構造が 変化することによって引き起こされる現象であると 考えられており、これもイメージング性能を悪化させ る要素の1つである。今後は、CdTe-DSD に対して 動作温度や印加電圧などの条件を変えつつスペクト ルやイメージングの性能評価に取り組む予定である。

3 コリメータ開発

小動物に対して体内から放射される X 線やガンマ 線のイメージングを行うためには上述した検出器の 上部に図6のようなコリーメータを配置する必要が ある。コリメータは検出器に入射する X 線やガンマ 線の方向を指定する役割があり、平行コリメータは 図6のように筒状の穴が一様に多数存在することで、 斜めに入射した X 線やガンマ線を遮断し、検出器に



図 4: CdTe-DSD の検出過程の模式図。



図 5: CdTe-DSD を用いたイメージングの例。

対して垂直に近い入射方向のX線やガンマ線のみを 通過させる。コリメータを用いてX線やガンマ線の 検出器に対する入射方向を指定し、CdTe-DSDによ る観測で検出器内の反応位置とエネルギー情報を得 ることで、放射線源のイメージングが可能になる。

本研究では、イメージングの用途に合わせたコリ メータ構造の最適化に取り組んでいる。よく薬物動 態イメージングで用いられる薬剤に付与する放射性 核種として^{99m}Tc,¹¹¹In,¹²⁵Iがあり、ある平行コ リメータを用いて観測されたスペクトルを図7に示 す。特に分かりやすい例として¹¹¹In に着目すると、 0 keV から 140 keV 程度の範囲で、高エネルギーな ガンマ線によるコンプトン散乱などによる成分が低 エネルギーなX線のピークに対するバックグラウン ドとして、図7ではスペクトル下部が盛り上がって いるのが確認できる。これは¹¹¹In の23 keV のX線 を示すピークのような、低エネルギーのX 線に対す るイメージングを観測するうえで、バックグラウン ド成分となり画像の解像度低下につながる。現在私 は、^{99m}Tc, ¹¹¹In, ¹²⁵I といった核種が放出する X 線 に対して高解像度なイメージングを行うために、高 エネルギーなガンマ線の漏れ込みを軽減しつつ、薬 物動態イメージングを行う上で最低限のコリメータ 効率を有するようなコリメータの最適化に取り組ん でいる。



図 6: タングステン製平行コリメータ。



図 7: ^{99m}Tc, ¹¹¹In, ¹²⁵I の観測スペクトル。スペク トルは各核種の最大ピークに対して正規化されてい る。試料は距離 20 mm の位置に置かれ、それぞれ 10 分間測定した。[1]

4 今後の展望

がん治療技術の発展という大きな目標を掲げ、高 解像度な薬物動態イメージングを実現する検出器、特 に CdTe-DSD を基盤とした検出器の開発を進める。 特に、半導体センサ内の反応深さ情報を用いたイメー ジング能力の改善や CdTe-DSD のスペクトルおよび イメージング性能の評価を実施するとともに、前臨 床実験における小動物生体イメージングのためのコ リメータの最適化を行う予定である。 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

Reference

 Miho Katsuragawa, Atsushi Yanagishita, Shin'ichiro Takeda, Takahiro Minami, Kazunobu Ohnuki, Hirofumi Fujii, and Tadayuki Takahashi, "CdTe XG-Cam: A new high-resolution x-ray and gamma-ray camera for studies of the pharmacokinetics of radiopharmaceuticals in small animals", *Medical Physics*, 19 May 2024 -index へ戻る

観測a05

超小型X線衛星 NinjaSat に搭載するガスX線検出器 の軌道上における検出器応答関数の構築

青山 有未来

超小型 X 線衛星 NinjaSat に搭載するガス X 線検出器の 軌道上における検出器応答関数の構築

青山 有未来 (理化学研究所/東京理科大学大学院 理学研究科)

Abstract

2023 年 11 月 11 日に打ち上げられた超小型 X 線衛星 NinjaSat は、2–50 keV に感度をもつ非撮像型ガス X 線検出器 (Gas Multiplier Counter; GMC) を 2 台搭載している。打ち上げ前に実施した地上較正試験の結果から、GMC の検出器応答は、温度依存することが明らかとなった。本研究は GMC の検出器応答が持つ場所・温度依存性を考慮し、実測に合う軌道上の検出器応答関数 (レスポンス)を構築することを目的とする。GMC に入射した X 線は、ガスにより光電吸収され、電子信号に変換後、電子増幅フォイル (Gas Electron Multiplier; GEM) によって増幅される。円形で半径 33.5 mm の GEM は検出器の温度変化により電子増幅度 (ゲイン) が変化し、その変化率は面内の場所により異なることがわかっている。我々は、地上試験のデータから作成したゲインの 2 次元分布を、別途作成したレスポンスシミュレータへ取り込み、1°C ごとのレスポンスを作成した。NinjaSat は 2024 年 2 月 23 日から 4 月 19 日にかけて、エネルギースペクトルが既知である「かに星雲」を観測した。作成したレスポンスを用いて、「かに星雲」のスペクトルをフィットしたところ、ゲインの場所・温度依存性 を取り入れることで、フィット曲線と観測データの比は、±11% から±4% に、フィット結果の χ^2 /dof は 24.4 から 3.2 に改善することがわかった。 χ^2 /dof = 3.2 は未だ許容されないが、今後は GMC の有効面積を補正することで、レスポンスの改善が見込める。

1 超小型 X 線衛星 NinjaSat

理化学研究所が主導する超小型 X 線衛星 NinjaSat は、2023 年 11 月 11 日に高度約 530 km の太陽同期 極軌道に打ち上げられた。NinjaSat は中性子星など の高密度天体からの X 線観測を目的とし、他の衛星と の多波長同時観測や突発天体の追観測も実施可能で ある。2024 年 2 月 23 日に科学運用を開始し、既に複 数の中性子星からの Type I X 線バースト検出を報告 した (Aoyama et al. (2024), Takeda et al. (2024))。

NinjaSat は、2–50 keV に感度をもつ大きさが 10 cm 立方の非撮像型ガス X 線検出器 (Gas Multiplier Counter; GMC) を2台搭載しており、従来の 超小型衛星の中で1桁以上高い 32 cm² (at 6 keV) の有効面積をもつ (Tamagawa et al. (2023))。図 1 に GMC の X 線検出原理を示す。GMC に入射した X 線は、視野角 2.3° (FWHM) のコリメータを通過 する。その後 Xe/Ar/DME (75%/24%/1%, at 0°C, 1.2 atm)の混合ガスにより、光電吸収され、電子雲 を発生する。発生した電子雲は、GMC 内部にある半 径 33.5 mm のガス電子増幅フォイル (Gas Electron Multiplier; GEM) で増幅後、読み出し電極で電子信 号に変換している (Takeda et al. (2023))。



図 1: ガス X 線検出器 GMC の X 線検出原理

GMC では、温度変化により GEM で増幅される 電子の増幅度 (ゲイン) が変化することが、地上較正 試験で明らかとなっている。そのためゲインの場所・ 温度依存性を、GMC の検出器応答関数 (レスポンス) に取り込むことが必要である。地上試験のデータを 用いて、電子増幅度分布 (ゲインマップ) を作成した。 作成したゲインマップを、GMC の特徴を再現した レスポンスシミュレータに取り込み、レスポンスに その場所・温度依存性を考慮した(青山ほか、2024 年春季天文学会)。本研究は GMC の検出器応答が持 つ場所・温度依存性を考慮し、軌道上の観測データ に合うレスポンスを構築することを目的とする。

2 地上における検出器応答

ゲインのばらつきは GMC のスペクトルの形状を 決定する。また温度ごとにゲインのばらつきが異な るため、各温度のゲインマップをレスポンスに取り込 む必要がある。我々は温度ごとにゲインのばらつき を調べるため、地上試験では、温度調整可能な恒温槽 で、GEM 面内の 1015 点に Ti の特性 X 線 (4.5 keV) を照射した。運用温度範囲を含む –10°C から 27°C の 5 つの温度で測定した。

ゲインの場所・温度依存性をレスポンスに取り込 むため、実測した5つの温度について、ゲインマッ プを作成した。GMC には7つの温度計が搭載され ており、今回はガスチェンバーに一番近いベースプ レートに設置された温度計を用いた。図2は27°C におけるゲインマップであり、相対的にゲインは中 心付近で最も高く、GEM の端では低くなっている。 レスポンスシミュレータでは、1°C ごとに基本とな るレスポンスを作成する。そこで5つの温度のゲイ ンマップを用いて、マップの各点ごとのゲインを温度 に対して線形補間し、1°C ごとにマップを作成した。



図 2: 地上試験で取得した 27°C におけるゲインマッ プ。カラーバーは GMC のゲインを表示。

3 軌道上における検出器応答

3.1 「かに星雲」の観測

NinjaSat は 2024 年 2 月 23 日から 4 月 20 日まで、 エネルギースペクトルが既知であり、X 線検出器較 正によく用いられる「かに星雲」を観測した。実質的 な観測時間は約 114 ksec であり、観測期間中、GMC の温度は 1.2–15.4°C を変動していた。この温度変動 は NinjaSat の軌道周期と同じおよそ 95 分で変動し ている。軌道 1 周回の最高温度は太陽に照らされる 軌道上で昼の時間帯、最低温度は地球の裏側に隠れ る夜の時間帯に対応する。したがって、GMC の平 均的な温度変化率はおよそ 0.3 °C/min である。

レスポンスを構築するためには、イベント取得時 の温度を考慮する必要がある。8秒ごとに取得した 温度に対して、1°Cの温度変化に対応する3分で移 動平均をとり、各イベントについて温度を付与した。 「かに星雲」観測中に取得したイベントに付与された 温度の平均は、9.3°C だった。

3.2 検出器応答関数とスペクトルフィット

GMC のレスポンスは、入射 X 線のエネルギーに対応する検出器応答を行列として記述されている。図3に、「かに星雲」観測期間中における1日の GMC の温度変動の例を示した。GMC の検出感度が最も高い6keV について、(a) は最低温度1°C,(b) は最高温度15°C の検出器応答を表している。ここでは6keV についてのみ示しているが、観測エネルギー帯域全体で、行列として検出器応答を定義している。図3より、最高温度(a)の方が最低温度(b)よりもエネルギー分解能が悪化し、低エネルギー側にイベントが漏れ出している。図3の(a),(b)からも、ゲインマップをレスポンスシミュレータに取り込むことで、レスポンスが実測に合うように温度により変化していることが確認できる。

「かに星雲」からの入射 X 線スペクトルが、星間 吸収とべき関数に比例すると仮定し、エネルギーご とのフラックス F (photons s⁻¹ cm⁻² keV⁻¹) を 1 式と定義する。

$$F = \exp\left(-N_H \sigma(E)\right) \times K \left(\frac{E}{1 \text{ keV}}\right)^{-\Gamma} \quad (1)$$

ここで、 N_H (atoms cm⁻²) は水素柱密度、 σ (cm²) は光電吸収の断面積、K は 1 keV で規格化した強 度、Normalization (Norm)、 Γ は光子指数 (Photon Index) を示す。

各イベントに付与された温度の頻度分布を計算し た。(I) 最低温度 1°C から最高温度 15°C までの基 本となるレスポンスを、イベント数で重み付け平均 したレスポンスを作成した。図4(a)に(I)のレスポ ンスを用いて、「かに星雲」スペクトルにフィットし た結果を示す。黒線は「かに星雲」の観測データを、 赤線はレスポンスによるフィット曲線、青線はバック グラウンドを示している。グラフ下半分はフィット 曲線に対する観測データの比を表示している。図 4 (a) より、フィット曲線とデータの比は 2-10 keV で 最大 4% 以内に収まることがわかる。スペクトルの フィット結果をまとめた表 1 (I) にまとめた。 N_H と Γは、それぞれモデルパラメータと 10%, 3.2% 程度 のずれに収まっていることがわかる。一方で Norm は、モデルパラメータよりも 43% 程度低い。また系 統誤差を 1.3% 入れると、 χ^2/dof は 1.0 になった。 現状のレスポンスを用いたスペクトルのフィット結 果 $\chi^2/dof = 3.2$ は許容されないが、 N_H と Γ は比 較的合う。Norm の補正のみでレスポンスが改善す ることがわかった。



図 3: GMC の 1 日の温度変動の例と (a) 最高温度 (15°C) と (b) 最低温度 (1°C) における 6 keV の X 線に対するレスポンス

3.3 ゲインの場所・温度依存性の重要性

ゲインの場所・温度依存性がレスポンスにどのような影響をもたらすかを調査するため、基本となるレスポンスの中で(II)平均温度 9°C,(III)最低温度 1°C,(IV)最高温度 15°C のレスポンスを用意した。 また(V)場所と温度について、ゲインを補正しない 一様なレスポンスを作成した。

(I)–(V) のレスポンスを用いて、「かに星雲」スペク トルにフィットした。表 1 より、(I) と (II) のレスポ ンスで N_H , Γ , Norm のフィット結果は大きく変わ らない。一方で χ^2 /dof は (I) 3.2, (II) 5.0, (III) 5.5, (IV) 7.2, (V) 24.4 の順で悪化することがわかった。

図 4 の (b) は、(Ⅱ) ゲインの場所・温度補正前の レスポンスを用いている。フィット曲線と観測デー タの比が、補正前 (b) は最大 ±11% だったのに対し



図 4: 「かに星雲」スペクトルのフィット (a) はゲイ ンの場所・温度補正後のレスポンスを使用し、(b) は ゲインの場所・温度補正前のレスポンスを使用した 結果。上のパネルの黒は「かに星雲」の観測データ、 赤はフィット曲線、青はバックグラウンド。下のパ ネルはフィット曲線に対する観測データの比。

| レスポンス | $N_H{}^{\mathrm{b}}$ | Photon Index Γ | Norm ^c | χ^2/dof |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|--------------|
| 「かに星雲」スペクトルのモデルパラメータ ^d | 4.5 | 2.07 | 8.26 | _ |
| (I) 重み付け平均 | $4.1{\pm}0.2$ | $2.005 {\pm} 0.004$ | $5.72{\pm}0.04$ | 247/78 |
| (Ⅱ) 平均温度 (9°C) | $3.9{\pm}0.2$ | $2.003 {\pm} 0.004$ | $5.69{\pm}0.04$ | 427/78 |
| (Ⅲ) 最低温度 (1°C) | $2.6{\pm}0.2$ | $2.023{\pm}0.004$ | $5.85{\pm}0.04$ | 562/78 |
| (IV) 最高温度 (15°C) | $5.9{\pm}0.2$ | $2.007{\pm}0.004$ | $5.79{\pm}0.04$ | 392/78 |
| (V) 場所と温度についてゲインが一様 | $2.8{\pm}0.2$ | $1.985{\pm}0.003$ | $5.36{\pm}0.04$ | 1907/78 |

表 1: 「かに星雲」スペクトルのレスポンスごとのベストフィットパラメータ^a

^a 想定する「かに星雲」スペクトルのモデルパラメータは Kirsch et al. (2005) を参照した。

^b N_H の単位は (×10²¹ cm⁻²)。

^c Norm の単位は (photons s⁻¹ cm⁻² keV⁻¹ at 1 keV)。

^d「かに星雲」スペクトルのモデル関数は、星間吸収とべき関数に比例すると仮定した (式 1)。

て、補正後 (a) は最大 ±4% まで小さくなった。また 表 1 より、どのフィットパラメータについても、モ デルパラメータに大幅に近づくことがわかった。以 上より、ゲインの場所と温度依存性のどちらについ ても、レスポンスに考慮することが重要だとわかる。

3.4 考察

図4でフィット結果が改善した理由として、図3 の最高温度 15°C のエネルギースペクトルでもみえ た、ゲイン変化による低エネルギー側への漏れ出し が、スペクトルの形状に影響していることが考えら れる。またフィット曲線と観測データの比には、補 正前 (b) のスペクトルのおよそ 3, 5, 8 keV にそれ ぞれ凹みが見える。この構造の 5 keV は Xe の L 殻 エッジ、8 keV は GEM の銅輝線に対応しており、 ゲインの場所・温度依存性を考慮しないことにより、 実際よりもエネルギー分解能を良く見積り過ぎてい るためである。3 keV の構造の原因は、現在調査中 である。補正後 (a) にも同じような構造が残ってい ることから、現在のレスポンスについても実測を完 全に再現することはできていないことがわかる。表 1 を見ると、補正後 (I) のフィット結果は補正前 (V) よりも N_H と Γ が想定値に近づく一方、Norm につ いては未だ改良が必要である。Norm が低い原因は、 GMC の有効面積を大きく見積り過ぎていることが 考えられ、現在実装している GMC の設計値を改め、 天体のポイティング精度等を考慮する必要がある。

4 まとめ

GMC の検出器応答関数にゲインの場所・温度依 存性を考慮し、「かに星雲」スペクトルのフィット結 果は以下のように改善した。これにより、検出器応 答関数作成では、ゲインの場所・温度補正は必要不 可欠であることがわかった。

- (a). フィット曲線とデータとの最大の比は、±11%
 から ±4% に改善した。
- (b). χ^2 /dof は 24.4 から 3.2 に改善したが、 χ^2 /dof = 3.2 は未だ許容されない。

「かに星雲」スペクトルのモデルパラメータと比較す ると、 N_H と Γ は、それぞれモデルパラメータと 10%, 3.2% 程度のずれに収まった。今後は GMC の 有効面積等が実測に合っているか見直し、Norm の 結果を改修する。本研究では Norm の調整のみで、 レスポンスの改善が見込めることがわかった。

Reference

- A. Aoyama et al., June 2024, The Astronomer's Telegram, 16678.
- T. Takeda et al., March 2024, *The Astronomer's Tele*gram, 16495.
- T. Takeda et al., 2023, Proceedings of the Small Satellite Conference 2023, SSC23-WIII-01.
- T. Tamagawa et al., 2023, Proceedings of the Small Satellite Conference 2023, SSC23-WIV-06, .
- M. G.F. Kirsch et al., 2005, Proc of SPIE, 0277-786X.

-index へ戻る

観測a06

MeV γ線による電子陽電子対消滅線観測計画 SMILE-3に向けたガス検出器内充填ガスの最適化

出口 颯馬

MeVγ線による電子陽電子対消滅線観測計画 SMILE-3 に向けた ガス検出器内充填ガスの最適化

出口 颯馬 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

銀河中心に広がる電子陽電子対消滅線の空間分布の観測は、原始ブラックホールや暗黒物質の存在に大き い制限を与えるため非常に重要である。そのためには MeV 領域のガンマ線を用いた観測が必要であるが、 このエネルギー領域がコンプトン散乱優位でありエネルギーの測定が難しいこと、宇宙線と衛星衛星筐体の 相互作用等による雑音が非常に多いことから実際の観測はあまり進んでいない。現在、我々は電子飛跡検出 型コンプトン望遠鏡 (electron-tracking Compton camera, ETCC) の開発を行っている (A. Takada, et al. 2022)。ETCC は電子飛跡と電子のエネルギーを取得するガス飛跡検出器と、散乱ガンマ線線の吸収位置とエ ネルギーを測定するシンチレーション検出器から構成されており、コンプトン散乱後の電子飛跡を取得する ことで入射ガンマ線の到来方向を一意に決定できる。SMILE-I、SMILE-2+の気球実験において ETCC の天 体観測能力が実証された (A. Takada, et al. 2011, 2022)。現在は、電子陽電子対消滅線観測計画 SMILE-3 における検出器の有効面積の拡大に向けてガス検出器内部に充填するガスの最適化に取り組んでいる。雑音 事象の低減、コンプトン散乱の発生確率の向上から、CF4 ガスが望ましい候補であるが、分子構造を持って いることによりゲインが出にくい問題がある。先行研究では 2 気圧下での CF4 ベースのガスを用いた実験 が行われ、⁵⁵Fe の測定に成功している (小林滉一郎 2023)。SMILE-3 では 3 気圧ガスの使用を予定している ため、先行研究の結果を踏まえた上で、3 気圧下でのガスの最適化を行っている。本講演では、ETCC の概 要と、過去の実験結果、現在のガス最適化実験について述べる。

1 電子陽電子対消滅線

ガンマ線の内、数100 keV~数 MeVの領域は MeV ガンマ線と呼ばれ、対消滅線や核ガンマ線、シンク ロトロン放射・逆コンプトン散乱といった非熱的放 射の観測が期待される。これらの内、電子陽電子対 消滅線は、電子と陽電子が衝突した際、In-flight で 対消滅しガンマ線を放出する、もしくはポジトロニ ウムを形成後、対消滅しガンマ線を放出するといっ た事象によって発生するガンマ線のことであり、図1 のように銀河中心にバルジ状の広い放射が観測され ている (L. Bouchet, et al. 2010)。SPI や OSSE のエ ネルギースペクトル観測から銀河中心領域の対消滅 線はほぼすべてポジトロニウムによるものと考えら れている (R. L. Kinzer, et al. 1996; P. Jean, et al. 2006)。ポジトロニウムの生成断面積から、陽電子の 運動エネルギーは 10 eV~100 eV 程度とされている (N. Guessoum, et al. 2005)。ただし、この低エネル ギー陽電子の供給源は未だわかっておらず、放射性 同位体の β+崩壊や、暗黒物質の対消滅、原始ブラッ

クホールのホーキング放射等複数の候補が考えられ ている (K. Ahn, & E. Komatsu 2005; B.J. Carr, et al. 2010)。放射性同位体の β+崩壊等のような、天体 活動が陽電子の供給源である場合、電子陽電子対消 滅線の空間分布は天体が多数存在する銀河面に集中 すると考えられる。一方で暗黒物質の対消滅や原始 ブラックホールのホーキング放射が供給源である場 合は、電子陽電子対消滅線の空間分布は質量分布に 依存したものになると考えられる。したがって、電 子陽電子対消滅線の空間分布を調べることによって、 暗黒物質や原始ブラックホールの存在に制限を与え られる。

2 MeV ガンマ線の観測器

MeV 領域はコンプトン散乱が優位なエネルギー帯 域である為、エネルギーの測定すらも難しい。その 上、不感領域で起きたコンプトン散乱は雑音となる。 加えて、宇宙線と衛星筐体の相互作用で生じる多量 の放射線も雑音となり、宇宙環境下での観測は非常



図 1: SPI による銀河方向の 511keV の観測結果 (L. Bouchet, et al. 2010)

に困難である。その中で、MeV 領域での観測におい て過去最も実績を出した検出器が、コンプトン望遠 鏡 COMPTEL である (V. Schönfelders, et al. 1993)。 コンプトン望遠鏡は、入射ガンマ線が起こしたコンプ トン散乱位置、散乱ガンマ線の吸収点とエネルギー、 反跳電子のエネルギーを測定するものである。しか し、入射ガンマ線のエネルギー E_0 と散乱角 ϕ は散乱 ガンマ線のエネルギー E_γ と反跳電子のエネルギー K_e を用いて

$$E_0 = E_\gamma + K_e \tag{1}$$

$$\cos\phi = 1 - \left(\frac{1}{E_{\gamma}} - \frac{1}{E_{\gamma} + K_e}\right) \tag{2}$$

と表され、入射ガンマ線の到来方向を円環状にしか 制限できない。これにより、真の到来方向の決定に は最低3点でのコンプトン散乱が必要となる。円環 の重なりはガンマ線源位置以外でも生じる為、偽の 像が発生し、到来方向の推定が難しくなる問題も存 在する (T. Tanimori, et al. 2017)。

我々はコンプトン散乱後の反跳電子の飛跡も取得 することで、入射ガンマ線の到来方向を一意に決める 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (electron-tracking Compton camera, ETCC) を開発してきた。ETCC の概要を図 2 に示す。ETCC はガス検出器とシンチ レーション検出器から成り、前者は反跳電子のエネ ルギーと飛跡を計測し、後者は散乱ガンマ線の吸収 位置とエネルギーを計測する。これにより、上述の パラメータに加え反跳電子の方向 *e*を用いることが でき、入射ガンマ線の到来方向*s*が、電子の質量 *m*_e を用いて、運動量保存則から

$$\vec{s} = \frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma} + K_e} \vec{g} + \frac{\sqrt{K_e(K_e + 2m_ec^2)}}{E_{\gamma} + K_e} \vec{e} \qquad (3)$$



 \boxtimes 2: ETCC(A. Takada, et al. 2022)

と求められる。これにより検出事象が、観測したい ガンマ線であるのか、雑音由来であるのかを区別す ることが可能となる。さらに、ガス検出器内のエネ ルギー損失と飛跡の長さの相関から、ガンマ線以外 のイベントをカットできる。また、図2にある α 角 は幾何学と、

$$\cos \alpha = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}} \qquad (4)$$

と計算されるコンプトン運動学の両方から求めるこ とができ、これらが一致するイベントのみを選別す ることでコンプトン散乱であることを保証できる。こ れにより、ETCC は強力な雑音低減能力を有する。

3 TPC 内ガスの最適化

ETCC の電子飛跡検出には Time Projection Chamber (TPC)を用いている。荷電粒子の電離に よって生じた電子雲は、検出部全体にかけられた電 場に沿って移動し、検出器端の2次元検出器から読 み出される。2次元位置情報と移動にかかった時間か ら、電子雲の3次元位置が得られる。このような検 出器は TPC と呼ばれる。我々は2次元読み出しに、 大面積と細かい読み出しピッチを同時に実現する為 にμ-PIC を用いている (A. Ochi, et al. 2001)。 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

SMILE-I では検出効率向上の観点から Xe ガス 1 気圧が用いられた (A. Takada, et al. 2011)。しか し、Xe は原子番号が大きく光電吸収の影響が大き い、電子のドリフトが非常に遅いといった欠点があっ た (A. Takada, et al. 2011)。SMILE-2+では、光電 吸収確率の低下とコンプトン散乱確率の増加を狙い、 Ar/CF₄/isoC₄H₁₀ (分圧比 95:3:2)が用いられた (A. Takada, et al. 2022)。しかし、Ar も原子番号が 大きい他、拡散が大きい。SMILE-3 では電子陽電子 対消滅線の観測のために、SMILE-2+から有効面積 5~10 倍、空間分解能 2~3 倍を目指している。雑 音となる光電吸収を減らし、コンプトン散乱確率を 上げ、角度分解能の向上を狙うために CF₄ メインガ ス 3 気圧の利用を予定している。

電子陽電子対消滅線の空間分布を観測するために は、雑音の低減、有効面積の拡大、角度分解能の向上 が必要であり、そのためには TPC 内のガスには、光 電吸収を抑えコンプトン散乱を優位にすることに加 え、ドリフト時の電子の拡散を抑えることが求めら れる。コンプトン散乱の確率は電子数に比例し、光 電吸収の確率は原子番号の5乗に比例するため、元 素番号の小さい元素による分子が有用となる。軽元 素の分子で、比例計数管などで使用実績のあるガス に CF4 がある。CF4 の電子数は Ar の 2.3 倍あるう え、拡散は Ar よりも 3-4 倍小さい (高橋慶在 2009)。 一方で分子構造由来の回転や振動にエネルギーが使 われる他、

$$CF_4 + e^- \to CF_3 + F^- \tag{5}$$

$$CF_4 + e^- \rightarrow CF_3^- + F$$
 (6)

$$CF_4 + e^- \to CF_2 + F + F^- \tag{7}$$

のような電子吸着現象が発生するためゲインが出に くいといった問題がある。そのため、ゲインの高い ガス等と混合してゲインを確保する必要がある。

先行研究では CF₄ メイン 2 気圧のガスの探索が行 われた (小林滉一郎 2023)。結果、Ne/Ar/CF₄ (分圧 比 49.75:0.25:50.00) を用いて 2 気圧下での初の信号 を観測し、図 3 のようにゲインの要求値が満たされ ることを示した。また ETCC による測定を行い、線 源からガンマ線の再構成を実施し、Ne/Ar/CF₄ 2 気 圧でのイメージング能力が実証された (小林滉一郎 2023)。



図 3: ⁵⁵Fe のゲインカーブ (小林滉一郎 2023)

現在、CF₄をメインとした3気圧ガスの最適なガ ス混合比の探索に向けた準備を行っている。ただし、 Neの高騰から使用が難しいため、メインであるCF₄ にゲイン向上のためのisoC₄H₁₀を導入し、それでも ガスゲインが不足する場合はガス増幅のためのArを 少量加える方針で実験を行っている。

4 アルファ線を用いたガス増幅率 の測定

ガス検出器内部の電子のドリフト速度やガス増幅 率は電場/圧力に依存するため、3気圧ガスでは2気 圧ガスよりも大きな電場をかける必要がある。ゲイ ンを増加させるためにはガス電子増幅器 (GEM) (F. Sauli, 1997) や μ-PIC にはより高い電圧が必要と なり、放電を引き起こす可能性がある。先行実験で用 いた ⁵⁵Fe の測定には高いガスゲインが必要となるた め、様々なガス条件での増幅率測定にはあまり向か ない。そこで、現在はアルファ線を用いた新しいガス サーベイ方法を模索している。アルファ線は、通常用 いられるベータ線と比較してガス中でのエネルギー 損失が大きく、低ゲインでも測定がしやすい。アル ファ線を用いた増幅率測定が、X線による増幅率測定 と齟齬が無い事を確認できれば、ベータ線での結果 を見積もることができる。そのため、現在はアルファ 線の飛跡を取得し、飛跡長と信号の電荷量の相関か らガスゲインを計算し、先行研究との比較を進めて いる。図4に実験で用いているセットアップを示し、 それを用いて取得した飛跡を図5に示す。飛跡の横 軸は読み出しのチャンネル数であり、縦軸はクロック 数で、1 クロック 10 ns を 1024 クロック分記載して



図 4: 実験で用いた TPC のセットアップ



図 5: 図 4 のセットアップを用いて取得した ²⁴¹Am の飛跡

いる。クロック数は、TPC の高さ方向に対応してい るが、具体的な対応関係は調査中である。ガスは、過 去 SMILE-2+での実績がある Ar/CF₄/isoC₄H₁₀ (分 圧比 95:3:2)を使用し、1 気圧とした。²⁴¹Am の崩壊 によるアルファ線のガス中の飛程は 3.4 cm ほどであ り、またアルファ線は重いため、ほぼ直線の飛跡と なる。図 5 の飛跡はほぼ直線であり、現在飛跡の長 さについて確認している。

5 まとめ

電子陽電子対消滅線の空間分布の観測は、暗黒物 質や原始ブラックホールの存在に大きな制限を与え るために重要である。我々はそのために電子飛跡型コ ンプトン望遠鏡 (ETCC)を開発している。ETCCの 有効面積向上にはガス飛跡検出器部分に充填するガ スの最適化が重要で、過去複数回ガスの改良実験が 行われてきた。次期実験 SMILE-3 では CF₄ をベー スとした 3 気圧のガスを封入する予定であり、私は そのためのゲイン測定実験を行っている。現在、飛 跡の取得が確認された状態であり、今後、アルファ 線によるガスサーベイの実証、最適なガスの封入比 率の測定を行う。

Reference

Takada, et al. 2022, ApJ, 930, 6

- Takada, et al. 2011, ApJ, 733, 13
- 小林滉一郎, 2023, 京都大学, 修士論文
- L. Bouchet, et al. 2010, ApJ, 720, 1772
- R. L. Kinzer, et al. 1996, A & A, 120, 317
- P. Jean, et al. A & A, 2006, 445, 579
- N. Guessoum, et al. 2005, A & A, 436, 171
- K. Ahn, & E. Komatsu 2005, PRD, 72, 061301
- B. J. Carr, et al. 2010, PRD, 81, 104019
- V. Schönfelder, et al. 1993, ApJ, $86,\,657$
- T. Tanimori, et al. 2017, Sci. Rep., 7, 41511
- A. Ochi, et al. 2001, NIM-A, 471, 264
- 高橋慶在, 2009, 京都大学, 修士論文
- F. Sauli, 1997, NIM-A, 386, 531

-index へ戻る

観測a07

ISS 搭載 MoMoTarO 検出器による太陽フレアの観測の 検討

中山 和哉

ISS 搭載 MoMoTarO 検出器による太陽フレアの観測の検討

中山 和哉 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

月面から漏出する中性子を利用した水資源探査や中性子寿命測定、ガンマ線バースト (GRB) 観測を目的と して、超小型中性子・ガンマ線検出器 Moon Moisture Targeting Observatory(MoMoTarO) を開発してい る。2026 年に MoMoTarO 検出器を ISS 船外実験スペースに搭載することが決定し、宇宙空間での検出器の 動作実証、サイエンスの創出を目指している。ISS での半年間運用に際して、太陽中性子や、GRB などの突 発現象を測定できる。超新星残骸や中性子星など高エネルギー天体現象は宇宙線の発生源の候補だが、太陽 フレアでも電子や陽子、中性子などの粒子加速が起きている。中でも磁場の影響を受けないで地球に到来す る太陽中性子を観測することで、粒子加速の情報を得ることができる。また、GRB は、数十億光年スケー ルの遠方から極めて明るいガンマ線が到達する現象である。MoMoTarO は GRB の発生方向を決めること も目指しており、GRB を用いた宇宙論への貢献も期待できる。私は ISS 搭載 MoMoTarO で検出しうる太 陽中性子について検討している。本研究では、過去の太陽中性子観測について紹介し、当時の太陽フレアの 観測を基に MoMoTarO により検出されうる中性子をシミュレーションしている。また開発した検出器を小 型気球に載せて飛翔させ、宇宙に近い環境での動作実証試験を行う計画である。

1 Introduction

超小型中性子・ガンマ線検出器として、Moon Moisture Targeting Observatory(MoMoTarO)を開発し ている。MoMoTarOプロジェクトでは、月面から漏 出する中性子を測定することによる月面の水資源探 査や、GRBの観測などを目的としている。月面進出 に先駆けて、2026年に MoMoTarO 検出器を ISS 船 外実験スペースに搭載することが決定しており、宇 宙空間での検出器の動作実証、サイエンスの創出を 目指している。

上記の目的を達成するために、MoMoTarO にはガ ンマ線に感度をもつ GAGG シンチレーターと中性 子に感度をもつプラスチックシンチレーター EJ-270 が搭載されている。そのため ISS にて、太陽フレア に由来する中性子を観測することができる。現在は 第 25 太陽周期にあり、2025 年から 2026 年ごろに 太陽活動は極大期を迎えると予測されているため、 MoMoTarO-ISS の運用中に大きな太陽フレアの観測 が期待できる。

宇宙線の発生源は現在でもはっきりとしていない。 性子は関 宇宙線の大部分は陽子だが、これを直接観測しても じない。 宇宙線の発生源や加速機構に迫るのは困難である。こ 太陽以近 れは陽子が正の電荷を持っているために、宇宙空間 線の未解 の至る所に存在する磁場の影響を受けてしまい、発 となる。

生当時の情報を失ってしまうためである (図 1)。その ため、宇宙線の発生源や加速機構を考える上で、ガ ンマ線や中性子といった電荷を持たない宇宙線の観 測は極めて重要である。



図 1: 中性子は宇宙空間を直進する

宇宙線の発生源として、最も地球に近く、観測を 行いやすいのが太陽である。太陽フレアでは太陽表 面で陽子やイオン、電子などが加速され、これらの 粒子が太陽大気とぶつかる際にガンマ線や中性子が 生じる (1)。ガンマ線は電子の加速でも生じるが、中 性子は陽子などの原子核の加速や核反応でないと生 じない。また、中性子には寿命があり崩壊するため、 太陽以遠の天体からの中性子観測はできない。宇宙 線の未解決問題の解明には太陽中性子の観測が重要 となる。
GRBは、数十億光年スケールの遠方から極めて明 るいガンマ線が到達する現象である。月面でもGRB を観測し、到来時刻の差からGRBの到来方向の特 定精度を向上させることで、宇宙線加速機構の解明 や宇宙論への貢献が期待できる。

2 MoMoTarO-ISS の検出器デザ イン

2.1 新しい中性子検出技術



図 2: リチウム添加したプラスチックシンチレーター (EJ-270)に、高速中性子、熱・熱外中性子、ガンマ線が 入射したときの物理反応



図 3: 反応の違いから粒子を弁別、縦軸は信号の違いを表 す数値、横軸はエネルギーに対応

これまでは中性子検出器として、He ガス検出器が 典型的に用いられてきたが、振動に弱い、高圧電源が 必要になる、He ガスが高価であることが問題であっ た。これに対し、我々は新しくシンチレーター (固体) ベースの検出器を開発している。EJ-270 は⁶Li を添 加したプラスチックシンチレーターであり、これに 半導体光検出器 Silicon Photomultiplier (SiPM)を 取り付けることで信号を取得する。EJ-270 内で高速 中性子は陽子と弾性散乱を起こしてエネルギーを落 とす。熱/熱外中性子は⁶Li(n,α)反応によって決まっ たエネルギー (4.78 MeV)を発する。また、ガンマ線 は電子とコンプトン散乱を起こす (図 2)。これらの 反応による信号の違いを利用して入射粒子を区別す ることができる (図 3)。これにより、振動に強く、よ り安価・低消費電力・高感度で中性子を検出するこ とが可能になった。

2.2 MoMoTarO 検出器



図 4: MoMoTarO 検出器

図4はMoMoTarO-ISS の全体観である。熱外中 性子用の熱中性子遮蔽材を巻いた厚いEJ-270シン チレーターを中心に、全方位からの熱中性子を観測 するEJ-270シンチレーターを配置する。さらにガン マ線測定用のGAGG(ガドリニウムアルミニウムガ リウムガーネット)シンチレーターを搭載する。これ はガンマ線に対する感度、エネルギー分解能に優れ、 潮解性が無いという利点がある。これによって深宇 宙側からのガンマ線を観測する。

3 MoMoTarO-ISS でのサイエン ス

3.1 太陽中性子

3.1.1 太陽表面での核反応

太陽フレアでは太陽表面で陽子やイオン、電子な どが加速される。太陽大気の主成分は水素とヘリウ ムであるが、これらの粒子と高エネルギーの陽子や イオンが核反応を起こすことでガンマ線や中性子な どが生じる (図 5)。また、太陽大気中の炭素や窒素、 酸素などの原子核と衝突することによっても生じる。 そのため、太陽中性子の発生は、フレアによって加速 される粒子の種類や太陽大気の組成に依存する (1)。



3.1.2 地上観測

地表に降り注ぐ中性子は世界の複数箇所に設置さ れている中性子モニタ、中性子望遠鏡によって24時 間観測されている(2)。また、中性子は地球大気と相 互作用を起こして減衰してしまうため、これらの検 出器は高山に設置されている。

2003 年 11 月 4 日に X28 クラスの太陽フレアが発 生した (3)。これは過去最大の太陽フレアである。こ の時 Hawaii、Haleakala の中性子モニタによって中 性子カウントのピークが確認された。図 6 はその際の データから計算された太陽表面における太陽中性子 のエネルギースペクトルである。このスペクトルは $(2.3 \pm 0.7) \times 10^{28} (/\text{MeV/sr}) \times (\frac{E_n}{100 \text{ MeV}})^{-4.2 \pm 0.4}$

で表される。

3.1.3 宇宙観測

宇宙空間での太陽中性子の観測装置として、SEDA-AP が挙げられる (4)。SEDA-AP は ISS の日本実験 モジュール、『きぼう』に設置されていた装置で、中性 子モニタなど 7 つの装置が搭載されている。SEDA-AP はこれらの装置を用いて ISS 周辺の宇宙環境を 観測している。

2012 年 3 月 5 日に X1.1 クラスのの太陽フレアが 発生し、SEDA-AP でも中性子カウントの増加が観 測された (図 7)。なおこの観測では一度の太陽フレ アで二度の中性子放出が確認され、二度の粒子加速 が起きたことを示唆している。

SEDA-APは2018年に運用を終了しており、現在 宇宙空間に太陽中性子を観測する専用の装置は無い。



図 6: 2003 年 11 月 4 日の太陽中性子エネルギースペクト ル(3)



図 7: (左)03:56UT に観測された中性子のエネルギー分布、(右)04:31UT に観測された中性子のエネルギー分布。菱形は生の値を表し、四角は中性子寿命による減衰係数を補正した後の値を表す。(4)を改編

MoMoTarO は宇宙空間での中性子環境を知るための 貴重な情報源となる。

3.2 ガンマ線バースト (GRB)

Gamma-ray burst(GRB) は、数十億光年スケール の遠方から極めて明るいガンマ線が到達する現象で ある。数秒から数時間のスケールで 10⁵¹erg 以上の エネルギー (太陽が 100 億年で放出するエネルギー) が放出される突発現象であり、これは宇宙最大の爆 発現象である。GRB は宇宙創成期に迫る上で重要な メッセンジャーである。

MoMoTarO にはガンマ線検出能力もあるため、太陽中性子と同様に GRB も突発イベントとして検出

可能である。現在この GRB は 1 deg² 程度の精度で 到来方向を決定することができているが、月面でも GRB を観測することで、到来時刻の差から GRB の 到来方向を 0.1 deg² 程の精度にまで向上させること ができる。

4 Geant4によるシミュレーション

MoMoTarO-ISS の太陽中性子に対する検出効率を 確認するために、Geant4 でシミュレーションを行っ た。Geant4 のバージョンは Geant4.10.05.p01 を用 いた。EJ-270(7×7×3 cm³、⁶Liの含有量は重量比 0.5%) に中性子を照射した (図8)。前述した 2003年 11月4日の太陽フレアを想定し、60 MeV-1145 MeV の範囲で中性子を照射した。このフレアで実際に地 球近傍に放出された中性子は 60 MeV-1145 MeV の 範囲で 10²¹ 個だったが、シミュレーション、解析 にかかる時間の都合上、1000万個の中性子を照射し た。このシミュレーションでは、シンチレーター内 で起きる陽子の弾性散乱の回数、シンチレーター内 で⁶Li(n, α)反応により生じる α 粒子とトリチウムの 個数、相互作用を起こさずにシンチレーターを通過 する中性子の個数を確認した。また、MoMoTarO で 想定されるエネルギー帯域での検出可能数 (シンチ レーター内で 100 keV 以上のエネルギーを失う粒子 の数)も測定した。表1はその結果である。



図 8: シミュレーションの模式図

| 粒子の種類 | 総数 | 検出可能数 |
|----------------|----------|--------|
| neutron(入射数) | 10000000 | - |
| proton(弾性散乱回数) | 1104589 | 915788 |
| alpha(発生数) | 467555 | 465655 |
| triton(発生数) | 17350 | 17310 |
| neutron(貫通数) | 8934032 | - |

表 1: Geant4 のシミュレーションの結果

生じる α 粒子とトリチウムの個数が異なる (α 粒子 が多い) という結果が得られた。これは⁶Liの捕獲の 他に、シンチレーター内の¹²C などの原子核に高エ ネルギーの中性子が衝突し、破砕することで α 粒子 が生じる経路があるためであるということがわかっ た。検出率 (検出可能数/総数) は陽子で 82.9 %、α 粒 子で 99.6 %だった。また、中性子の貫通数から、シ ンチレーター内で何らかの相互作用を起こす中性子 は 1065968 個であることがわかった。これは入射し た中性子の 10.7 %に当たる。以上のことから、2003 年 11 月 4 日と同等の太陽フレアが起きた場合、シン チレーターの大きさも考慮すると、MoMoTarO-ISS では 10⁴ 個ほどの中性子カウントが期待できること がわかった。

5 まとめと今後の展望

超小型中性子・ガンマ線検出器 MoMoTarO の ISS 暴露部への搭載が決定し、宇宙空間での太陽フレア 観測が可能となった。MoMoTarO-ISS は、深宇宙側 からの中性子やガンマ線、地球側からの中性子を測 定できる。太陽中性子は陽子加速の貴重な情報源な ので新たな発見に期待がかかる。太陽中性子のシミュ レーションを行い、MoMoTarO-ISS で期待できる中 性子のカウントを見積もることができた。

MoMoTarO を ISS に搭載するにあたり、打ち上げ の振動への耐性、宇宙空間での放射線や熱への耐性 が問題となる。これらを簡易的に検証するために、 MoMoTarO 検出器を小型気球に載せて飛翔させ、よ り宇宙空間に近い環境で動作させる実験を計画して いる。また、シミュレーションに関しても、複数の シンチレーター、アルミ筐体を再現したシミュレー ション、太陽フレアによって生じるガンマ線や GRB のシミュレーションなどを行っていく予定である。

Reference

- [1] 松岡 勝, 1992, 日本原子力学会誌
- [2] 太陽中性子観測 | 名古屋大学 宇宙線物理学研究室 https://www.isee.nagoyau.ac.jp/CR/research/neutrons/
- [3] K. Watanabe et al, 2006, Advances in Space Research 38
- [4] K. Koga et al., 2017, Solar Physics

-index へ戻る

観測a08

中性子を用いた月の水資源探査

小俣 雄矢

中性子を用いた月の水資源探査 MoMoTarO プロジェクト

小俣 雄矢 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

近年、アルテミス計画を始めとした月探査が国際的に活発化しており、中でも水資源探査は月面での拠点開 発において重要である。本研究は、中性子とガンマ線の放射線検出器 Moon Moisture Targeting Observatory(MoMoTarO)を開発し、月面ローバーに搭載することで、月面下において非接触・非破壊の水資源探 査を行うことを目的としている。銀河宇宙線が月表面の物質に衝突すると、核反応を起こし、高い運動エネ ルギーを持つ高速中性子が生成される。高速中性子は水(水素などの軽元素)があると効率的にエネルギー を失い、熱・熱外中性子となる。月面から漏出した中性子をエネルギー毎に弁別し計数率を測定することに よって、水資源探査が可能となる。本研究では、リチウムを添加したプラスチックシンチレータ (EJ-270) と シリコン半導体光検出器 (SiPM)を用いる。シンチレータ中の反応の違いによる波形の違いから、熱/熱外中 性子・高速中性子・ガンマ線を弁別しながら同時に測定することが可能である。現在、月の水資源探査の原 理実証として土槽実験を行っており、極低~低含水率の月模擬土壌に対して中性子の計数率を測定した。含 水率が高いほど、熱・熱外中性子の計数率も増加していることが示唆された。しかし、熱中性子と高速中性 子が弁別できていない領域があるため、弁別性能の改良に向けて回路定数の最適化や温度特性の試験を行っ ていく。

1 研究背景

2019年、NASA によって有人火星探査を目指すア ルテミス計画が発表された(1)。火星までの中継拠点 として月の拠点開発が重要視されており、JAXA も 国際パートナーとして参画し、SLIM などの独自の月 ミッションも複数計画されている (2)。月面の拠点開 発において、水資源は生命維持に必要なだけでなく、 水素燃料として利用することができるなど多くの用 途が期待されている。また、貯蔵地点を特定するこ とによって月面の水資源の移動・濃縮過程の解明に もつながると考えられている。1998年に NASA が打 ち上げた月周回探査機 Lunar Prospector(LP) によっ て、初めて中性子検出器による月面放射線計測が行 われた (3)。この調査によって極域におけるクレータ の永久影に水資源が内在している可能性が示唆され た。高度 30 km の月周回軌道による観測であり、一 般に方向感度のない放射線の観測の空間分解能は高 度の 1~1.5 倍とされているため (4)、LP の空間分 解能は 45 km 程である。MoMoTarO では月面ロー バーに検出器を搭載し、1 km 四方の空間分解能によ る水資源分布図の作成や、0.5%以上の水資源を有す る月面地域の特定を目指す。

銀河宇宙線が月表面の物質に衝突すると核反応を



図 1: LP の観測結果による極域での水素濃度分布図 (3) 黄色い部分が水の存在確率が高い

起こし、高い運動エネルギーを持つ高速中性子が生 成される。高速中性子は、水に含まれる水素のよう な軽元素があると効率的にエネルギーを失って、熱・ 熱外中性子となる。月面から漏出した中性子をエネ ルギー毎に弁別し、計数率を測定することによって、 水資源探査が可能となる。



図 2: 月面での熱中性子生成過程

2 測定原理

2.1 EJ-270 のシンチレーション光

MoMoTarO 検出器では EJ-270 という ⁶Li 含有の プラスチックシンチレータ (図 9)を用いて放射線検 出を行う。



図 3: ⁶Li を添加した EJ-270 (7×7×1 cm³)と MPPC

EJ-270 では、ガンマ線、高速中性子、熱・熱外中 性子のシンチレーション発光過程が異なる。ガンマ 線が入射した場合、シンチレータ内の電子とコンプ トン散乱を起こし、電子に与えられたエネルギーデ ポジットによってシンチレーションを起こす。散乱 角によって電子が受け取るエネルギーが変わるため、 エネルギーデポジットは連続的となる。高速中性子 は主に陽子との弾性散乱を起こし、陽子に与えられ たエネルギーデポジットによってシンチレーション が起こる。この場合も同様に散乱角によって陽子が 受け取るエネルギーが変わるため、エネルギーデポ ジットは連続的となる。熱・熱外中性子の場合、主 にシンチレータに含有された⁶Liの中性子捕獲反応 が起こる。熱中性子を捕獲した⁶Li はα粒子と³H に分かれ、その際に放出される α 粒子のエネルギー は 4.78 MeV と一定となる。 α 粒子とシンチレータ 内の電子の相互作用によってシンチレーションが起 こるが、α粒子のエネルギーが一定のため、エネル ギーデポジットも一定となる。これらのシンチレー ション発光過程の違いから検出器における出力信号 の波形弁別を行うことで月周辺でのガンマ線バック グラウンドによる信号・ノイズを除去して中性子由 来の信号を特定し、計数率を測定する。



図 4: ⁶Liを添加したシンチレータ内での高速中性子、熱・ 熱外中性子、ガンマ線の反応の模式図

2.2 Pulse Shapge Discrimination (PSD)

MoMoTarO 検出器では放射線弁別ための手法とし て Pulse Shape Discrimination(PSD) を用いる。ガ ンマ線や高速中性子による信号はシンチレーション が連続的なエネルギーを持っているため、出力信号 の波高値もそれぞれ連続的な値を取り、波高値によ る放射線弁別はできない。そこで MoMoTarO 検出 器では、ガンマ線・高速中性子・熱/熱外中性子のシ ンチレーション発光過程の違いを利用し、PSD によ る波形弁別を行う。PSD は波形全体に対する遅発成 分の割合を示すパラメータとして定義し、計算式は 以下で示される。

$$PSD = \frac{Q_{\text{tail}}}{Q_{\text{total}}} \tag{1}$$

Q_{total} は出力信号の全電荷量を表しており、Q_{tail} は 信号の遅発成分の電荷量を表している。ガンマ線由 来の信号は遅発成分が小さいため PSD 値は小さくな り、中性子由来の信号は遅発性分が大きいため PSD 値は大きくなる。



図 5: PSD の概念図: ガンマ線(γ)と中性子(n) の信号 波形を比較している

3 MoMoTarO 検出器

MoMoTarO 検出器は、ガンマ線・高速中性子・熱/ 熱外中性子を弁別できるプラスチックシンチレータ (EJ-270)と主に Gamma Ray Burst(GRB)などのガ ンマ線検出用の無機シンチレータ (GAGG)、シリコ ン半導体光検出器 (SiPM)を用いる。シンチレータ 光の読み出しに小型の SiPM を用いることによって、 従来のヘリウムを用いた中性子検出器よりも振動に 強く小型・省電力かつ安価に製造することが可能に なった。MoMoTarO は、CubeSat 1U 規格に準拠し た一辺 10 cm の立方体サイズである。MoMoTarO では月面側に EJ-270,深宇宙側に GAGG、その間に データ取得・処理を行うための電子回路ボードを搭 載している。なお、国際宇宙ステーション (ISS) に 搭載される MoMoTarO では、基板が深宇宙と反対 側に配置されている。



図 6: MoMoTarO 検出器 図 7: シンチレータ部分

3.1 データ出力について

出力信号を処理するための基板として、SUM ボード、Front-End Card(FEC) ボード、Data AcQuisition (DAQ) ボードと呼ばれる三つの基板を用いる。

放射線が入射するとシンチレータ内に光子が発生し、 MPPC によって電気信号に変換される。SUM ボー ド上で複数の MPPC からの電気信号を合成し、ノイ ズ除去や信号増幅などのアナログ処理を行う。DAQ ボードには Analog to Digital Converter (ADC)・ Field Programmable Gate Array (FPGA)・Micro Controller Unit (MCU)が搭載されており、アナロ グ処理された電気信号をデジタル変換し、波形情報 処理・データ出力を行っている。



図 8: MoMoTarO 検出器のデータ出力の概略図

4 実証実験

4.1 ²⁵²Cf 照射実験

MoMoTarO の弁別性能評価のために²⁵²Cf 放射線 源を使った性能評価試験を行った。²⁵²Cf は連続的な エネルギーを持つ中性子とγ線の放射線源である。高 速中性子を熱化させるためにポリエチレン製の減速 材を用いた。²⁵²Cf をシンチレータ上部に配置し、そ の間に減速材を設置した (図 9)。この実験では、60 分間照射実験を行った。



図 9: Cf 照射実験

図 10:暗箱の中身

実験によって得られた二次元ヒストグラムの結果 が図 11 である。縦軸が PSD 値で横軸がエネルギー に対応するパルス波高値(ch)になっている。熱中 性子の領域が確認でき、高速中性子、ガンマ線由来 のラインも確認できる。しかし、高速中性子とガン マ線を弁別できていない領域があり、それらを区別 できるような弁別性能への改良が必要である。



図 11: ²⁵²Cf 照射実験で得られた二次元ヒストグラム 赤丸で囲った部分が熱中性子、緑の点線が高速中 性子、茶色の点線がガンマ線を表している

4.2 土槽実験

MoMoTarOの月面環境における水資源探査の実証 のために月シミュラント (FJS-1)を用いて土槽試験 を行った (図12)。現在、月面での体積含水率は1.0% 以下が有力視されているが、熱中性子による計数率 測定では極低含水率において有意な変化が測定でき ない可能性があるため、熱外中性子の計数率のデータ も合わせて測定する。月シミュラントの下部に²⁵²Cf 線源を設置し、上部に検出器を配置することで月シ ミュラントから漏出する中性子の計数率を測定した。



図 12: 土槽試験のセットアップ

図13は、月シミュラントの含水率に対する熱中性 子及び熱外中性子の検出数の実験結果である。縦軸 は熱・熱外中性子の検出数、横軸は土壌の含水率と なっている。実験結果から含水率が高いほど熱中性 子の計数率も増加していることが示唆された。しか し、熱外中性子の極低含水率(0~2%)の領域におい て相関にばらつきがある。これは熱外中性子の PSD が最適化されていなかったことに起因すると考えて おり、熱外中性子の PSD 性能向上が必要である。



図 13: 熱・熱外中性子の検出数と月シミュラント含水率 のグラフ

5 まとめと今後の展望

MoMOTarO では月の拠点開発に重要な月の水資 源探査を目指す。プラスチックシンチレータ EJ-270 を用いることでガンマ線・高速中性子・熱・熱外中 性子を弁別可能となった。月面環境の実証実験では、 含水率が高いほど熱中性子の計数率が高いことが示 唆された。MoMoTarO の PSD 性能向上のため、回 路定数の最適化や温度特性の試験を行う。また、月 面環境を模した土槽試験や、宇宙環境における陽子 照射試験などを継続して行っていく。

Reference

- [1]NASA, NASA's Lunar Exploration Program Overview.
- [2] 大竹真紀子ほか, 2019, 遊星人 28, 53.
- [3] Lawrence, D. J. et al., 2006, J. Geophys. Res. 111, E08001.
- [4]Lawrence et al., Astrobiology, 2010.

-----index へ戻る

観測a09

TES型マイクロカロリメータのエネルギー分解能向上 の為の超伝導転移温度と熱容量のコントロール

奥村 華子

TES 型マイクロカロリメータのエネルギー分解能向上の為の 超伝導転移温度と熱容量のコントロール

奥村 華子 (北里大学大学院 理学研究科)

Abstract

バリオンは現在の宇宙を構成する物質のおよそ 5%を占めているが、実際に観測されているものは 5%のう ちの半分程度で、直接観測されていないバリオンはダークバリオン、またはミッシングバリオンと呼ばれる。 その一部は希薄なガスである中高温銀河間物質(Warm Hot Intergalactic Medium; WHIM)として宇宙の 大規模構造に沿って分布していることがシミュレーションによって示されているために、WHIM の分布を 明らかにすることでダークバリオンの物理的性質を探ることが出来る。SuperDIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)計画は宇宙の広範囲で定量的に WHIM を観測することでダークバリオンの分布を調べ ることを主目的とした、DIOS 計画の後継にあたる計画である。搭載する検出器には広視野と高分解性能の 両立が要求されるため、次世代の非分散精密分光器である超伝導転移端(superconducting Transition Edge sensor; TES)型マイクロカロリメータ(以下、TES カロリメータ)の 3 万ピクセルアレイの使用が予定さ れている。我々が開発を進めている TES カロリメータは、現在エネルギー分解能 (8.23 ± 0.64) eV @ 5.9 keV まで達成しているが [1]、計画では 5.9keV において 2 eV 以下の分解能を要求するため、更なる性能の 向上が必要であり、それを達成できるような製作プロセスの開発が進められている。本講演では、TES カロ リメータの主な製作手順とともに、分解能向上に向けた研究から薄膜の厚みや比率を変更した時の温度 - 抵 抗の関係について測定した結果について報告する。

1 研究背景・研究目的

ミッシングバリオン問題とは、宇宙空間内に5%ほ ど存在し、私たちの身の回りの物質を構成している とされるバリオンのうち、半分程度がまだ直接の検 出ができていない問題を指している。こうしたダー クバリオンのうち一部は、シミュレーションによっ て希薄なガスである中高温銀河間物質(WHIM)と して宇宙の大規模構造に沿ってフィラメント状に分 布していることが示唆されている。WHIMの中でも 10⁵ – 10⁷Kのものは電離酸素の組成比が大きいため、 電離酸素の輝線吸収線を観測することでWHIMの空 間分布を調べることができる。SuperDIOS 計画は X 線の精密分光観測によって 10⁵ – 10⁷K の WHIM を 直接観測して 3 次元マッピングを目指す計画であり、 実現には広い視野と高いエネルギー分解能を両立す る半導体 X 線検出器が必要である。

TES カロリメータは X 線光子ひとつひとつを熱 として測定しており、超伝導状態から常伝導状態へ の遷移を利用することで高いエネルギー分解能を達 成可能な精密分光観測器である。SuperDIOS 計画で は、この TES カロリメータを約 30,000 個搭載する ことで広視野での観測を行う計画となっている。我々 のグループでも TES カロリメータの開発に取り組ん でおり、Ti と Au の二重薄膜と広い受光面積を持つ マッシュルーム型吸収体で形成されている。その分 解能は現在 (8.23±0.64) eV @ 5.9 keV [1] まで達成 しているが、計画では分解能 2 eV 以下を要求するた め更なる性能の向上を試みている。

以下は X 線マイクロカロリメータのエネルギー分 解能を表す式である [2]。

$$\Delta E \propto \sqrt{\frac{T^2 C}{\alpha}} \tag{1}$$

ここで、*T* がカロリメータ温度、*C* が全体の熱容 量を指し、α はカロリメータの抵抗を *R* とした時に 以下 (2) 式で表される温度計の感度である。

$$\alpha \equiv \frac{d \log R}{d \log T} = \frac{T}{R} \frac{dR}{dT}$$
(2)

(1) 式より、分解能 Δ*E* は熱容量 *C* の平方根と超 伝導転移温度 *T* に比例するため、エネルギー分解能 を高めるには*C*と*T*をどこまで小さくできるか、α を大きくできるかが重要である。特に*T*が Δ*E* ヘ与 える影響が大きいため、高い分解能の達成には*T*の 制御が必要になる。TES カロリメータは常伝導遷移 を利用するために極低温で動作させる必要から*T*を 小さくすることができ、常伝導遷移では非常に狭い 温度帯で急激に抵抗値が上昇するために(2)式で表 される α を大きくすることができる。故に、従来の X線マイクロカロリメータよりも高い分解能を達成 することができる。理想は熱容量 *C*を小さくするた めにできるだけ薄く、かつ転移温度が低い TES カロ リメータを作成出来ることであるため、最適なもの を定常的に作成出来るような製作プロセスや条件の 確立を目指して研究を行っている。

2 TES カロリメータの動作原理

TES カロリメータは、超伝導金属が超伝導状態か ら常伝導状態へ遷移する際に抵抗値が急峻に上昇す る性質を温度計として利用した高感度の測定を実現す る X 線精密分光観測機器(X 線マイクロカロリメー タ)の一種である。



図 1: TES カロリメータの構造と原理。

X線マイクロカロリメータは吸収体、温度計、熱 リンク、熱浴で構成されている。吸収体部分にX線 光子が入射すると光子は光電効果によって吸収され、 そのエネルギーが熱となり素子の温度変化を引き起 こす。この時の温度計の抵抗変化を検出することで 温度変化を測定している。温度計は極低温の熱浴に 熱リンクで繋がっているため、吸収によって発生し た熱は熱浴へ逃がされ徐々に温度計は元の定常状態 に戻っていく。

TES カロリメータでは温度計として金属の超伝導 は融点の高い金属に電圧をかけて多 特性を利用する。超伝導転移は非常に狭い温度範囲 熱で加熱する抵抗加熱式を用いた。

を高めるには *C* と *T* をどこまで小さくできるか、α (数 mK)で起こるので、(2)式で表した温度計感度 を大きくできるかが重要である。特に *T* が Δ*E* ヘ与 を非常に高くすることが可能になっている。

> TES カロリメータの動作温度は~100mKの極低 温域の中で TES の超伝導臨界温度 *T_c* によって決定 される。そのため、*T_c* を如何に制御出来るかが動作 温度の決定に重要となっている。我々が開発してい る TES は Au/Ti の二層薄膜を用いているが、これ は近接効果により Ti 単体よりも *T_c* を下げることが 出来るためである。近接効果とは、超伝導体と常伝 導体を接合すると、超伝導体に存在するクーパー対 が常伝導体に漏れ込むことで金属単体よりも *T_c* が 下がる効果である。

3 研究方法

T_c は TES カロリメータの二重薄膜の膜厚比に依 存することが知られているため [3]、今回は Au と Ti の二重薄膜の膜厚比を変えたものを 2 種類用意し、 それぞれの *T_c* 及び温度と抵抗値の関係について測定 と評価を行った。

また近接効果を用いない Ti 単体についても、そ の膜厚によって T_c が変化することが知られている [3]。ゆえに、基板に厚みの異なる Ti 単体薄膜を形成 したものを 3 種類用意し、こちらについてもそれぞ れの T_c、温度と抵抗値の関係について測定と評価を 行った。

3.1 TES カロリメータの製作

今回抵抗 *R*-温度 *T* の関係の測定を行い、結果について評価を行った素子の主な製作プロセスと評価の方法を以下に記述する。全行程を完了するのにおよそ一週間程度の時間を要する。

3.1.1 基板に Au と Ti の二層薄膜を形成する

TES 薄膜蒸着装置を用いて、3インチの Si 基板に Ti、Au を蒸着し薄膜を形成する。この時、10⁻⁵Pa 程度の真空中に置いた材料を加熱して蒸発させ基板 上に成膜していく真空蒸着法を使う。加熱の際、Ti は磁場をかけて偏向させた電子線を材料に当て、そ の電子のエネルギーで加熱する電子銃加熱式を、Au は融点の高い金属に電圧をかけて発生するジュール 熱で加熱する抵抗加熱式を用いた。

ラフィで焼き付ける

を行う技術である。感光剤(フォトレジスト)を塗付け、Al による配線ボンディングを行う。 布した基板表面に、RT 測定用のパターンが描かれた フォトマスクを被せ紫外線を当てて感光させる。感光 した部分が化学処理できるようになるポジ型と、感 光した部分が硬化して処理に強くなるネガ型の2種 類のフォトレジストがあるが、TES の製作ではポジ 型のものを使用している。

3.1.3 エッチングを行いパターンを形成する

エッチングは、パターンを形成した基板を薬品に 浸すウェットエッチング法で行った。各金属に対応し た薬品に浸すことでレジストに覆われた部分以外の 金属が化学反応によって溶け出すため、エッチングを 終えると焼き付けた通りの薄膜パターンが基板上に 完成する。今回、Au のエッチングにはヨウ素系薬剤 である AURUM-302(関東化学) を、Ti のエッチング には過酸化水素を 60°C に加熱したものを使用した。



図 2: パターン形成後の基板。

3.1.4 Au、Tiの膜厚を測定する

3.1.1 において薄膜を形成する際に蒸着装置にて目 標とする膜厚を設定することが出来るが、実際に形 成される厚みは設定した値から±10nm ほどずれて しまう。そのため、エッチング後に接触式段差計を 用いて形成された薄膜の正確な厚みを計測する。

3.1.2 基板上に膜厚測定用パターンをフォトリソグ 3.1.5 基板を切り分けて冷凍機に搭載、RT 測定

3インチ基板を数 mm 程度のチップに切り分ける。 フォトリソグラフィとは、光を利用して微細加工 冷凍機のステージに RuOx 抵抗温度計とともに貼り

> 冷凍機へ組み込んで冷却し、Ti単体薄膜は480mK ~600mK まで、Au/Ti 二層薄膜は 60mK~600mK まで、2mK 刻みで温度を上昇させながら各素子の抵 抗変化を四端子法で測定した。

RT 測定に向けて製作した素子 3.2

製作した素子の膜厚測定結果を表1に示す。ID は 基板へ薄膜の蒸着を行った日付によるものである。

表 1: 製作した素子のデータ

| 素子名 | Ti 厚み [nm] | Au 厚み [nm] | |
|-------------|------------|------------|--|
| SEED240606b | 38.05 | - | |
| SEED240605b | 54.37 | - | |
| SEED240626b | 138.16 | - | |
| SEED240619b | 52.04 | 79.29 | |
| SEED240620b | 58.04 | 191.67 | |

実験結果・考察 4

Au/Ti の二層薄膜を持つ 2 素子の RT 特性を 測定したところ、膜厚比 1.52 の SEED240619b で は 127.5mK、膜厚比 3.30 の SEED240620b では 228.2mK で転移が起こった。二層にしたことで近接 効果が働き、Tiの転移温度 390mK や Ti 単体の基板 での結果よりも低い温度帯で転移が起こっているの が確認できた。

図3は現時点までに実験で得られている Au/Ti 膜厚比と転移温度の関係のグラフである。原因は不 明だが、赤と青の2種類の傾向が存在している。今 回製作した2素子は星で示しているが、そのうち SEED240619b は赤、SEED240620b は青の傾向に分 かれてしまった(転移温度を測定した際に流してい た電流値がこれまでと今回とで異なるため実際には 星印のふたつは若干だがずれていると予想される)。 赤の傾向では同じ膜厚比でも青の傾向よりも低い温 度で転移が起こる。すなわち転移温度をより下げた



図 3: これまでの実験で得られた膜厚比と転移 温度の関係。左下の星印が SEED240619b、右上が SEED240620b (Yagi+2023 改)

上で Ti・Au 薄膜を薄くし熱容量を下げられ、原理 的なエネルギー分解能を向上させられるため、我々 としては赤の傾向に乗るような素子を安定して作成 できるプロセスを開発したい。傾向が分かれている 原因としては薄膜の蒸着を行う際の装置内真空度や 成膜レートなどの違いが考えられるため、膜厚比だ けでなく各種パラメータの制御にも注目して今後も 製作・測定を行っていく。



図 4: Ti 単体基板の RT 特性測定結果(上)と Ti 膜 厚・転移温度の関係(下)

図4はTi単体薄膜が形成された3枚の基板のRT 特性測定結果のグラフである。Tiを厚くするほど超 伝導転移温度が上がっていくことが読み取れるが、図 4 での結果はいずれの膜厚でも単体バルク Ti の転移 温度である 390mK を上回っている。これは、ここで 測定している Ti が薄膜であるために密度が低くなっ ていたり、混入してしまった不純物の影響が大きく 出てしまったことが原因の一部と考えられるが詳細 は依然調査中である。現時点では測定出来たサンプ ルがまだ少ないので、今後も Ti 膜厚が異なるものを 製作して RT 測定を行い、転移温度変化の傾向をさ らに詳しく調べたい。

5 まとめと展望

SuperDIOS 計画とは、宇宙を構成するバリオンの うち、未だ観測されていないミッシングバリオンを WHIM の分布を明らかにすることで捉えるのを主目 的とする計画である。高分解能と広視野を両立する 精密分光器の搭載が要請されており、その要求を満 たすような検出器として金属の超伝導特性を利用し た温度計を持つ TES 型マイクロカロリメータの開発 が進められている。

我々の研究室では Ti と Au の二層薄膜を用いた TES カロリメータを開発している。この TES の転 移温度は Ti、Au の薄膜の厚み及びその比によって 変化することが知られている。エネルギー分解能は 転移温度が低いほどよくなるため、性能の向上には 転移温度の制御、即ち膜厚の制御が重要となる。し かし、様々な条件によって蒸着される膜厚及び作成 した素子の転移温度が大きく変化してしまい、制御 は難航している。

現在は安定して高分解能を達成できる素子の再現 性のある製作プロセスを確立するために、様々な成 膜条件を評価している最中であり、今後は並行して Ti単体薄膜の超伝導転移特性についてもより詳しく 調べていきたい。

Reference

- [1] Hayashi.T et al. 2023
- [2] McCammon, 2005, Cryogenic Particle Detection
- [3] Irwin and Hilton, 2005, Cryogenic Particle Detection

——index へ戻る

観測a10

EBITへの搭載に向けた、TESマイクロカロリメータの磁場特性の評価

中野 祥大

EBIT 搭載へ向けた TES マイクロカロリメータの磁場応答の測定

中野 祥大 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

XRISM 衛星により精密分光観測が可能となり、X 線天体解析に用いられる放射モデルに高い精度が要求さ れている。宇宙科学研究所では、Electron Beam Ion Trap(EBIT)を用いて詳細な放射モデルの構築に必要 な原子データの取得を目指しているが、現行の EBIT に搭載されている SDD の分光性能では、輝線の微細構 造まで分解することができない。そこで、広帯域で高いエネルギー分解能を誇る超伝導転移端型 (Transition Edge Sensor;TES) マイクロカロリメータの EBIT 搭載を検討している。

本研究では、TES カロリメータの EBIT 搭載において課題となる磁場対策の一環として、外部磁場が我々の TES カロリメータの性能にどの程度影響を与えるのかを測定・評価した。その結果、外部磁場の絶対値が大 きいほど TES カロリメータのエネルギー分解能が劣化し、±10 µT の磁場でエネルギー分解能はおよそ 2 倍 まで落ちることが確認できた。

1 研究背景

XRISM 衛星による精密分光観測データの解析に は、必然的に高い精度の放射モデルが要求される。 一方で、高エネルギー天体の輝線放射に関与する多 価イオン (多電子系)の振る舞いは解析的に解くこと ができず、近似計算による放射モデルでは不定性が 問題になり得る。

EBIT は電子ビームを用いて多価イオンを生成し、 コイルの強力な磁場でトラップすることで、高エネ ルギー天体と等価なプラズマを実験室で再現できる 装置である^[1]。EBIT で生成した多価イオンの放射 を分光観測し、輝線のエネルギーや強度を決定する ことで、より詳細な放射モデルの構築が期待される。 しかし、現状の EBIT は肝心な分光器のエネルギー 分解能が低く、Δ*E* ~ 120 eV 程度である。より詳細 な放射モデルの構築には、分光器の性能の向上が必 須である。

2 TES マイクロカロリメータ

我々が開発を進めている超伝導転移端型 (Transition Edge Sensor; TES) マイクロカロリメータは、 超伝導-常伝導転移端での急激な抵抗変化を利用した 高感度な温度計を用いて、入射光子のエネルギーに 対応する微細な温度上昇を計りとり、光子一つ一つ のエネルギーを測定する装置であり (図 1)、TES カ



図 1: TES カロリメータの動作原理

ロリメータのエネルギー分解能は $\Delta E \sim 2 \text{ eV}$ と、 EBIT に搭載されている SDD よりも二桁程度良い。 TES(超伝導体) の温度計としての感度 α は

$$\alpha = \frac{d\log R}{d\log T} = \frac{T}{R}\frac{dR}{dT} \tag{1}$$

で定義され、TES の RT カーブの傾きが大きいほど α も大きな値を持つ。温度計感度 α とエネルギー分 解能 ΔE の間には

$$\Delta E \propto 1/\sqrt{\alpha} \tag{2}$$

の関係があり、αが大きいほど ΔE は小さくなり、 分光性能は高くなる。また TES カロリメータは数百 eV から数十 keV までの広いエネルギー帯域で高い エネルギー分解能を発揮できる点も特色である。高 分解能かつ広帯域の TES カロリメータを EBIT へ搭 載することができれば、X 線帯域で重要な多くの輝 線に対するモデル構築が期待できる。 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

EBIT への TES カロリメータ搭載における課題と して、EBIT の周りの強い磁場環境によって TES カ ロリメータの分解能が劣化する点が挙げられる^[2]。 したがって、外部磁場が我々の TES カロリメータの 性能にどの程度影響を与えるかを調べ、許容できる 磁場レベルに低減するための磁気シールドの設置や 冷凍機構造の改善を行う必要がある。

本研究では、コイルを用いて TES カロリメータに 任意の強度の外部磁場を印加し、TES の RT 特性が どの程度影響を受けるのかを詳細に調べた。

3 RT 特性の測定方法

TES カロリメータの RT 特性は図 2 に示すような 定電圧バイアス回路を用いて測定する。測定手順は 以下に示す通りである。

- 設定したバイアス電流 *I_{bias}* に対して、TES に 流れる微弱な電流 *I_{TES}* を超伝導量子干渉計 (SQUID)を用いた電流計を利用して測定
- 2. オームの法則から TES の抵抗値 R_{TES} を計算
- 3. TES のジュール発熱と熱浴への熱流出の釣り合 いを仮定して、TES の温度 *T_{TES}* を計算
- TES が超伝導状態になるまで *I_{bias}* の値を徐々 に小さくしながら、1~3 の手順を繰り返す



図 2: 定電圧バイアス回路を用いた RT 特性の測定

4 実験装置

実験セットアップと素子の詳細、及び磁場の印加 方法について説明する。

a 希釈冷凍機

超伝導転移を利用する TES カロリメータは極低温 (~100 mK) で動作させる。我々は図3に示すような 希釈冷凍機に TES カロリメータを載せた測定ステー ジを組み込んで測定を行なっている。



図 3: 極低温を実現する為の希釈冷凍機

b 測定ステージと素子

冷凍機に組み込むステージには、熱伝導度の高い 銅を利用している。ステージ上には TES チップ・配 線・電流計が取り付けてあり (図 4(左))、冷凍機外 部の配線と合わせて図 2 の定電圧バイアス回路と等 価な回路になっている。チップの中央部に 25 ピクセ ルの TES が並んでおり (図 4(右上))、各ピクセルは 100 × 100 μm² の TES(Ti と Au の二層薄膜) に対し



図 4: (左) 測定用ステージ、(右上)TES チップ、(右下)1 素子あたりの模式図 (吸収体を除く)

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

て Nb 配線が取り付けてある。TES で発生したジュー ル発熱は、Si 基板を通って熱浴へ流出する。

c 磁場の印加方法

超伝導コイルを用いて TES に磁場を印加する。図 5のように測定ステージに対して超伝導コイルを外装 し、コイルに流す電流値を制御することで任意の大 きさの磁場を素子に印加することができる。コイルの 中心軸がチップの中央に重なるように位置調整をし ている。磁束は TES 面に対して垂直に印加される。



図 5: (左) コイルを外装したステージ、(右)TES 面 に対する磁場ベクトルの向き

5 測定結果

a RT 特性

TES の温度に対する抵抗値の変化 (RT 特性) の測 定結果を図 6(上) に示す。TES の抵抗値が転移温度 付近で急激に減少し、超伝導状態ではほぼ零抵抗に なっている様子が確認できる。常伝導における抵抗 値は印加磁場の大きさに関係なく同様の挙動を示し ている。一方で、転移端においては磁場依存性が如 実に現れていることが確認できる。図 6(下) に示す ように印加磁場の絶対値が大きくなるほど RT カー ブの傾きが緩やかになり、TES の温度計としての感 度 α が低下していく様子が確認できた。



図 6: (上)RT 特性の磁場依存性、(下) 転移端部分の 拡大図。両対数表示であることに注意。

b 温度計の感度 α

TES カロリメータは通常、TES の抵抗値が常伝導 抵抗値に対して 20% 近辺まで落ちた点を動作点とし ている。動作点付近における温度計感度 α の値の平 均値を計算し、印加磁場に対してプロットした結果 を図 7 に示す。磁場の絶対値が大きくなるにつれて 温度計感度 α が小さくなることが確認できる。 α は 印加磁場が -0.5μ T の点で最大値を取った。この原 因としては、測定回路による自己磁場や地磁気によ る影響がキャンセルされたことで、零磁場の場合よ りも温度計感度がやや良くなったと予想される。



図 7: 温度計感度 a の磁場依存性

c エネルギー分解能 ΔE

温度計感度 α の値から TES カロリメータのエネ ルギー分解能の理論的限界値を次式を用いて計算す ることができる^[3]。

$$\Delta E = 2.35\xi \sqrt{k_B T^2 C} \tag{3}$$

$$\xi \sim \sqrt{4\sqrt{n/2}/\alpha} \tag{4}$$

ここで、Tは動作点における TES の温度、Cは TES カロリメータの熱容量、nは TES と熱浴の間の熱伝 導度に関与する定数である。 ΔE を印加磁場に対し てプロットすると図 8 が得られた。磁場の絶対値が



図 8: エネルギー分解能 ΔE の磁場依存性

大きくなるにつれ、分解能が悪くなることが確認で きる。印加磁場が ±10 µT の時に分解能はおよそ 2 倍まで悪くなった。

6 結論・展望

外部磁場により我々の TES カロリメータの分光性 能が劣化することが分かった。±10 µT の磁場でエ ネルギー分解能の理論的限界値がおよそ2倍まで劣 化する。TES カロリメータを EBIT へ搭載する際に は、本実験で得られた結果を元に磁場対策を施す必 要がある。具体的にな磁場対策としては、磁気シー ルドの開発、EBIT と分光器の間の距離の延長、磁 場に強い TES 形状の研究等が挙げられる。また、磁 場の低減のために EBIT と検出器の距離を離すと距 離の二乗に反比例して X 線集光率は低下するため、 X 線検出効率を上げるための TES カロリメータの多 素子化や X 線集光素子の開発も並行して進める予定 である。

Reference

- [1] P. Micke et al. 2018, Rev. Sci. Instrum 89, 063109 (2018)
- [2] Y. Ishisaki et al. 2008, J Low Temp Phys (2008) 151: 131-137
- [3] R. Miyagawa 2023, 修士論文

-index へ戻る

観測a11

機械学習を用いた半導体ピクセル検出器における X 線イベント判定法の開発

東 竜一

機械学習を用いた半導体ピクセル検出器における X線イベント判定法の開発

東 竜一 (甲南大学大学院 自然科学研究科物理学専攻)

Abstract

現在、X 線天文衛星に搭載される、X 線ピクセル検出器で観測したデータの解析で用いられているのが グレード法 (e.g., AXAF ACIS calibration report) である。グレード法とは、各ピクセルで検出した信号電 荷による波高値が、あらかじめ決めたしきい値を超えた場合イベントとみなし、それらの配置パターンから X 線イベントか、それ以外の荷電粒子バックグラウンドによるものかを識別する手法である。しかし、エネ ルギー帯域に応じたシグナルとバックグラウンドの識別に対する最適化がされておらず、エネルギー推定に 誤差が生じる場合がある。それに加え、座標は波高値が最大のピクセル中心とするため、イベントの空間分 布情報やセンサの特性を活かしきれていない。そこで我々は、検出した X 線光子の入射エネルギーと座標決 定精度の向上を目的とし、機械学習を用いた X 線イベント判定法の開発に取り組んでいる。シミュレーショ ンデータでそれぞれの方法を検証した結果、機械学習による予測は、グレード法の分解能 5.9 keV において ~180 eV (FWHM) に対し、~140 eV(FWHM) という結果が見られた。また機械学習による座標決定精度 は、ピクセル境界付近に入射した X 線イベントに対しては < 10 µm となった。本文では、グレード法と機 械学習予測による X 線イベントのエネルギー再構成精度と、検出器上の座標決定精度を比較した結果につい て議論する。

1 Introduction

グレード法とは、X 線天文衛星搭載軟 X 線検出器 として主に用いられる CCD や CMOS 等の半導体ピ クセル検出器で分光撮像した画像を地上で解析する 際に、現在使用されている解析法である。半導体ピ クセル検出器では、センサ部分である空乏層に X 線 光子が入射すると、X線光子のエネルギーに比例し た数の電子正孔対が作られる。これらを各ピクセル で回収し、X 線光子のエネルギーを信号電荷として 検出する。このようにして撮像された画像をグレー ド法により解析する。グレード法では、3×3ピクセ ルの中で波高値が最大かつあらかじめ決められたイ ベントしきい値を超えるピクセルを中心にした島に 注目する。その周りのしきい値を超えるピクセルも イベントとみなし、これらのイベントピクセルの配 置から X 線イベントか、その他のイベントによるも のかを判定する。また、X線イベントのエネルギー はイベントピクセルの波高値を足し合わせることで 求め、X線イベントが入射した座標は波高値が最大 のピクセルの中心として判定している。

しかし、グレード法には検出器で得た情報を一部

しか使えていないことによる問題点がある。一つは、 エネルギー再構築を行う際に信号電荷を拾っている にも関わらず、そのピクセルの波高値がしきい値を 超えない場合、エネルギーを過小評価してしまう点 である。逆に、ノイズがしきい値を超える場合、エ ネルギーを過大評価してしまう。もう一つは、X 線 イベントの入射座標が一律で最大波高値のピクセル 中心になってしまう点である。これらは、波高値の 空間分布情報を十分に活かしきれていない。

そこで我々は、X線イベントとバックグラウンドイ ベントを機械学習で識別する先行研究 [1] を参考に、 グレード法に変わる X線イベント判定法として、機 械学習を用いた X線イベント判定法の開発を目指し ている。この研究では画像認識の分野で広く用いら れているニューラルネットワークを活用し、X線イ ベントのエネルギー予測と X線イベントの入射座標 予測を目的としている。本文では、従来の解析法で あるグレード法と機械学習予測による X線イベント のエネルギー再構築精度と、検出器上の座標決定精 度を比較した結果について議論する。

2 Methods

今回の研究では、機械学習のアルゴリズムの一つ であるニューラルネットワークを用いた。ニューラ ルネットワークは画像認識の分野で広く用いられて おり、予測モデルの作成に際して TensorFlow ライ ブラリの Keras モジュールを使用した。このアルゴ リズムは教師あり学習と呼ばれる。画像データに対 応するエネルギーや座標を正解ラベルとしてデータ セットを作成し、学習させる。学習済みモデルに画 像データを入力するとエネルギーや座標の予測を返 すという仕組みになっている。

学習データは、汎用の検出器シミュレーションツー ルであるコンプトンソフト [2] を用いたモンテカル ロシミュレーションを使用した。コンプトンソフト では検出器のピクセルサイズ、空乏層の厚さ、検出 器固有のノイズ等を再現できる。ピクセルサイズは 48 µm × 48 µm とし、ノイズは実際のセンサを模擬 した。一枚の画像は 10 × 10 ピクセルに設定し、エ ネルギーのラベルは 0–10 keV を 100 分割、座標の ラベルは1 ピクセルを 52 分割として与えた (図 1)。 また、今回の研究ではシミュレーションデータのみ で学習、検証を行った。



図 1: 1ピクセルを 64 等分した後、中心部分だけを 粗く設定した。機械学習による中心付近の予測は困 難だったため、粗く設定している。

3 Results

学習済みモデルによる予測と従来の方法であるグ レード法によるエネルギー推定の結果、シミュレー ション画像でのグレード法とニューラルネットワー クのエネルギー分解能 (FWHM) は、グレード法では 5.9 keV において ~180 eV、ニューラルネットワー クでは 5.9 keV において ~140 eV という結果になっ た (図 2)。

また、ニューラルネットワークによる座標予測は、 ピクセルの角、中央、辺の部分によって予測精度に 差が出た (図 3)。角では ~数 μm、中央では ~10 – 20 μm、辺では ~10 μm の精度で予測を出した (図 4)。



図 2: 5.9 keV の X 線ピクセル画像におけるグレード 法で足し上げた結果とニューラルネットワークによ る予測の結果を比較したヒストグラム。4.2 keV 付 近に見られるピークはエスケープピーク。

4 Discussion

ニューラルネットワークを用いた機械学習による エネルギー予測は、シミュレーション画像での検証 の結果、グレード法よりも機械予測の方がより良い 精度で予測を出す結果となった。グレード法では実 際の解析と同様のしきい値を設定し、しきい値を超 えるピクセルの波高値を足し合わせるため、ノイズ を足し合わせる可能性がある。そのため、真の値よ りもエネルギーが高い方向にずれていると考えられ る。

機械学習による座標予測では、ピクセルの中央の 部分と辺に並行な部分の予測に比べ、角の部分の予 測の方が精度が高い結果となった。これはX線がピ クセルの角に入射した場合、イベントの信号が隣り 合った複数のピクセルに分かれるため、情報が多い ことが要因だと考えられる。中央の場合、入射した イベントはほとんどが1ピクセルのイベントとなり 情報が少ない。辺の場合、ほとんどのイベントは2



図 3: ニューラルネットワークによる X 線イベントの入射座標の予測。白い枠はそれぞれシミュレーション で入射した1ピクセル内の真の座標を表している。角の予測精度は高い水準で予測を出している。中央の 予測精度はばらつきが出る。辺に並行な部分でもばらつきが見られる。



図 4: 角、中央、辺の各座標での予測ヒストグラム。 予測精度は、角では ~数 μm、中央では ~10-20 μm、 辺では ~10 μm となっている。

ピクセルに分かれ、それ以上の情報がないため辺の どの座標か予測しづらいと予想される。

5 Conclusion

この研究では、X線ピクセル検出器で分光撮像した X線の入射位置とエネルギーを推定するアルゴリズム を開発するため、機械学習の畳み込みニューラルネッ トワーク (CNN)を使用した。学習済みモデルの予測 の結果、エネルギー予測による分解能は、5.9 keV に おいて~140 eV となり、グレード法の~180 eV に 比べてより良い精度となった。座標予測の結果、ピ クセルの角では~数 µm、中央では~10-20 µm、辺 では~10 µm の精度で予測を出した。これらは従来 のグレード法での座標推定における分解能の1ピク セルより小さい分解能となった。

今後の展望としては、実際に検出器で取得したデー タを使用し、学習済みモデルに X 線イベントのエネ ルギーと座標を予測させる検証を行う予定である。

Reference

- 1. Wilkins, D. R., Allen, S. W., Miller, E. D., et al. , SPIE, 12181, 121816S, 2022
- Odaka et al., "Development of an integrated response generator for Si/CdTe semiconductor Compton cameras", NIM-A, 624, 303, 2010

-index へ戻る

観測a12

IceCube-Gen2実験用光検出器LOM内部に搭載する PMTの事前性能評価方法の再構築

辻 智紀

IceCube 実験用光検出器 LOM 内部に搭載する PMT の事前性能評価方法の再構築

辻 智紀 (千葉大学大学院 融合理工学府 物理学コース)

Abstract

千葉大学は、宇宙ニュートリノを観測する IceCube 実験に参加している。IceCube 実験では、南極の氷河 の中に光検出器を埋め込み、氷と宇宙ニュートリノとの反応によって生じるチェレンコフ光を観測すること で、間接的な宇宙ニュートリノの観測を行っている。現在、より高エネルギーなニュートリノを観測するた めの、IceCube-Gen2 計画が進行している。さらに、そのためのより高感度な光検出器 LOM の開発が行わ れており、今年中に合計 10 台の LOM の試作生産を予定している。しかし、LOM 内部に実装する光電子増 倍管 (PMT) の実装事前性能評価において、今後の大量生産を行う上での様々な問題点が浮き彫りになった。 そこで、事前性能評価方法の再構築を行った。様々な自動化によって作業者を選ばない測定と効率化を可能 にし、効率化によって時間的余裕が生まれたため、新たな測定項目を追加した。

1 Introduction

1.1 IceCube 実験

我々の研究グループでは、宇宙ニュートリノの観 測を目的とした IceCube 実験に参加している。宇宙 ニュートリノは電荷を持たず、電場や磁場によって軌 道を曲げられることがない。この性質により、宇宙 ニュートリノは発生源となる天体の特定が容易であ る反面、直接的に宇宙ニュートリノを観測すること が困難となっている。そこで IceCube 実験では、南 極の氷河の中に光検出器を埋め込み、氷河の氷と宇 宙ニュートリノの反応により生じるチェレンコフ光 を観測することで、間接的なニュートリノの観測を 行っている。現在、1PeV 以上のより高エネルギーな ニュートリノを観測するためのアップグレードであ る IceCube-Gen2 計画と、そのための更なる高感度 光検出器 LOM の開発が進行している。我々はこの LOM の試作器の製作を行っている段階である。

1.2 PMT の事前性能評価

LOM には内部に光電子増倍管 (PMT) を 18 個実装 する。その各 PMT について事前性能評価を行ってか ら実装している。性能評価は-40 °Cの冷凍庫中で行い、 性能評価項目は光電子の倍率である gain 測定、光を 当てない場合に観測される信号頻度である Darkrate 測定、強度の高い光 (レーザー) を照射して応答を調 べる Linearity 測定の三項目である。しかし、「PMT を一度に一つしか測定できない」「PMT ごとに加え る電圧を手入力しなければならない」「レーザー強度 の変更が手動」など、測定に常に人的介入が必要と なり、今後の生産ペースを考えた際に不具合となる 点が多々あった。そこで、ハード面、ソフト面の両 方について再構築を行い、使用者の力量によらず扱 える測定環境を整備することにした。また、この再 構築により、作業時間が大幅に短縮されたため、新 たな測定項目として、冷凍庫の温度を変化させ、そ の Darkrate との相関を見る Temp-dark 測定を測定 項目として追加した。

2 測定項目とその改良内容

2.1 全測定共通項目

セットアップは以下の図1に示す通りである。ま ず、一度に測定可能な PMT 数を1から4に増やし た。1つの PMT しか接続できない既存の基板を使用 せず、複数の PMT に接続できる LOM 内部実装用 基板を事前性能評価に流用した。この基板は現状で は情報の同時読み出しができないが、チャンネルを 指定して個々に読み出しをすることはできる。これ により、PMT の入れ替えや PMT を常温に戻す回数 が少なくなり、測定時間の短縮が可能になった。ま た、冷凍庫の開閉回数が少なくなり、温度や湿度等 の測定環境の安定性も向上した。さらに、人的介入 の必要性が少なくなり、休日や夜間の測定も可能に なった。

測定に使用する PMT は 2 種類あり、浜松フォト ニクス社製の物と NNVT 社製の物がある。我々の研 究グループでは、浜松フォトニクス社製の物を使用 する予定でいたが、コスト面で NNVT 社製の PMT の使用が議題として挙がった。そこで、両者の比較 を行い、NNVT 社製の PMT が性能的に信用に足る ものか判断する。



図 1: 冷凍庫内部の様子

2.2 gain 測定

この測定では、PMT に 2V 刻みの制御電圧をかけ ていき、個々の PMT の光電子の増倍率である gain 値を測定する。それをプロットし、フィッティングす ることで、使用する PMT の適正 gain である 5×10⁶ となる電圧の値を見積もる ()。この電圧は、後の測 定をする際に PMT にかける電圧として使用するた め、この測定は PMT 測定で最初に行う。

ハード面の改修した要素は 4PMT をセットできる ようにした以外はないが、ソフト面では計算した適 正制御電圧をテキストファイルに保存し、他の測定 時に読み込むことで自動記入ができるようにした。

2.3 Darkrate 測定

光を全く当てない状態で検出される信号頻度であ る Darkrate を測定する。5 分間の Darkrate 測定を 何回も繰り返し、その平均値や時間的推移を調べる。



図 2: 制御電圧のフィッティング

2.4 Linearity 測定

Linearity 測定は、PMT に強度の高いレーザー光 を当て、その応答を確認する。再構築以前の測定で は、3つの強度のレーザー光を手動でフィルターを回 すことで、5 段階に変化させ、15 段階の強度のレー ザーを当てていた。再構築によって 2 種類のフィル ターをプログラムで自動回転させることができるよ うになり、測定可能な強度数も 24 通りにまで増加し た。また、調整したレーザーを途中で 4 分岐させる ことで、4 つのエリアそれぞれで Linearity の測定が 可能となった。

2.5 Temp-dark 測定

測定の短縮によって新たに追加した測定項目であ る。冷凍庫内部の温度を-40 °Cから-15 °Cの間で変化 させ続け、そのダークレイトの変化を調べる。南極 の氷は地熱の影響で地表に比べ温度が高くなってお り、その温度に対する安定性が課題として挙げられ た。また、ダークレイトは PMT のガラスの熱励起 によるシンチレーション光の影響がとても大きいた め、温度の上昇とともにダークレイトの値も高くな ることが予想される。これらの温度に対する安定性 と相関性を確認することが主な目的である。

3 測定結果

3.1 gain 測定

制御電圧を2種類のPMT について測定し、ヒス トグラム化したものが図3である。NNVT 製は浜松 フォトニクス社製に比べ、比較的制御電圧が低く設 定されていることが分かる。



図 3: 制御電圧のヒストグラム

3.2 Darkrate 測定

NNVT 社製の PMT には、Darkrate 値 400Hz を 超える高い値を示す PMT が 36 個の内 4 つ発見さ れ、その内 2 つは 5000Hz を超えるものだった。浜 松フォトニクス社製の PMT は除外対象となるよう な値を持つ PMT は観測した限りでは存在しなかっ た。LOM 内部に使用できる範囲である 150Hz 以下 の PMT についてヒストグラム化したものが図 4 で ある。また、100 回の Darkrate 測定の結果を散布図 にしたものが図 5 である (NNVT: 赤緑青、浜松: 黄)。

これらより、正常な PMT に関しては、NNVT 社 製のものは浜松製に劣らない性能をしていることが 分かる。しかし、不具合が起こる確率が非常に高い ため、製品としての安定性に関しては不安が残る結 果となった。

3.3 Linearity 測定

強いレーザー光と弱いレーザー光を当てたときの 応答を調べたところ、NNVT 社製と浜松製で応答の 安定性やその値に大きな差異は見られなかった。し



図 4: Darkrate 値のヒストグラム



図 5: 各 PMT の 100 回の Darkrate 測定

かし、4カ所あるレーザーの内、3カ所の強度はほと んど等しい値であったが、1カ所のレーザー強度が著 しく低いことが判明した (図 6, 図 7)。これは、レー ザー光を4分配する方法上、仕方のないことである が、現状の測定装置の状況では、Linearity 測定は3 か所でしか行えないということが分かった。

3.4 Temp-dark 測定

4つの PMT について冷凍庫内部の温度を時間的に 変化させながら、Darkrate 値を測定した結果は次の 図 8 のようになった。内部温度を上げると、熱励起 で真空管のシンチレーション光が増加し、Darkrate が高くなることが確認できた。-15 ℃まで温度を上昇 させた場合でも、Darkrate が 200Hz を超えることは なく、温度変化に対し急激に Darkrate が上昇するこ ともなかった。これより、PMT は IceCube 実験に導 入できるだけの温度に対する安定性と相関性を確認



図 6: 強度の高いレーザーの応答



図 7: 強度の低いレーザーの応答

できた。

4 まとめと今後の展望

IceCube 実験のアップグレードのために新たに開 発される新型光検出器 LOM の大量生産の予定に伴 い、既存の事前測定装置の再構築を行う必要が出て



図 8: 温度変化させた場合の Darkrate

きた。一度に測定できる PMT 数を 4 つに増やし、 レーザーの強度調整を自動化した。

使用を検討している NNVT 製の PMT をすでに使 用している浜松フォトニクス社製の PMT と比較し、 使用できる性能を満たしているか判断した。 gain 測定では、PMT 測定に使う場合の制御電圧を個々 に測定した。NNVT の PMT のほうが低い制御電圧 で適切な性能を引き出すことができることが分かっ た。Darkrate 測定では、光が当たらない状況での信 号頻度を測定した。これにより、NNVT の PMT は 5000Hz を超える異常値を示す PMT が複数現れた。 異常値の示さなかった PMT に限り、浜松製の PMT と比較したところその製品としての安定性は浜松製 のほうが優れていた。linearity 測定では、強度の高 い光への応答をレーザー光を用いて測定した。強い レーザーでも弱いレーザーでも浜松と NNVT に大き な差異は見られなかった。しかし、4カ所のうち1カ 所のレーザー強度が著しく低くなっていた。新しく 測定した Temp-dark 測定では PMT の温度に対する Darkrate 値の相関性と安定性を確認できた。これら から、NNVT 製の PMT は強い強度の光に対しては、 浜松製に劣らない性能を見せたが、微弱な光に対す る応答に対する安定性は疑問が浮かぶ結果となった。

今後は、強度が著しく低いレーザー台の調査、測定 時間の短縮を目指した更なるプログラムの改良、取 得したデータの自動解析、操作マニュアルの作成な どを行うことを検討している。 -index へ戻る

観測a13

IceCube-Gen2実験の新型光検出器の製作とその結果

笠井 勇次郎

IceCube-Gen2実験の新型光検出器の製作とその結果

笠井 勇次郎 (千葉大学大学院 物理学コース修士1年)

Abstract

IceCube 実験は南極点の氷河を利用し高エネルギー宇宙ニュートリノをとらえるプロジェクトである。その アップグレード計画として現在の検出体積の約8倍の領域に検出器を埋設する IceCube-Gen2 実験がすすめ られており、そのための新型光検出器の製作を行っている。従来の実験で使用されている光検出器は検出部 の PMT が 1 つで下向きに搭載されているが、検出領域を広げるにあたって検出器同士の間隔が広くなり 1 つの検出器に対する検出効率を上げる必要がある。そのため新型光検出器では上半球下半球各 9 台計 18 台 搭載することにより、従来の 4 5 倍の感度を実現することができる。

PMT の増加で製作工程は複雑になるものの、2023 年度には新型光検出器のプロトタイプとして 2 台製作し、 組み立て手法を確立させた。さらに今年度中に 10 台の実機の量産を予定している。また製作した検出器を 用いて-40°Cの冷凍庫で検出器内の各 PMT の 1 光子あたりの増幅率を調べる gain 測定、光が照射されて いない暗室での信号検出頻度を調べる dark rate 測定を行った。特にガラス球内部で放射性崩壊が起こるこ とによって引き起こされる dark rate は PMT 同士で相関があることが考えられ、物理の性能を悪化させる 可能性が高い。本研究では、検出器を実地で使用する前の品質検査を徹底的に行い、得られる物理成果を最 大化することを目指す。

1 研究背景

1.1 IceCube 実験

IceCube 実験は、は南極点氷河を利用して建設さ れたニュートリノ望遠鏡である。ニュートリノは電 荷をもたず、弱い相互作用しか作用しない。天体での 高エネルギー現象で発生したニュートリノは、宇宙 空間の磁気や相互作用で軌道を変えられることなく 地球に直進し到達できる。そのため、地球に到達す るニュートリノを捉えることができれば、発生天体 の情報を得ることができる。しかし、高エネルギー の宇宙ニュートリノを捉えることは決して容易では ない。地球に到達する頻度が低い上に、物質と相互 作用をほとんどしないためである。ニュートリノが 原子核や電子と衝突した際に叩き出された粒子が氷 などの媒質中で光速を超えて進むと、チェレンコフ 光とよばれる光を発生する。そのチェレンコフ光は 光子数個からの弱い光であるが、光電効果により放 出された光電子を増幅して電流として読み出す検出 器 DOM を用いることで検出が可能になる。IceCube 実験は、このような方法でニュートリノを観測する 実験の一つである。



図 1: 現在の IceCube 実験の模式図



図 2: 光検出器 DOM

1.2 IceCube-Gen 実験

IceCube 実験では、宇宙線起源天体由来のニュー トリノが実際に存在することが確証されてきた。現 在、IceCube 次世代高エネルギー拡張計画である、 IceCube-Gen2 実験の準備が進行中である。IceCube-Gen2 実験はニュートリノの信号を発見するだけで 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

なく、放射起源の理解や素粒子物理の発展を目指し て計画されている。従来の IceCube 実験の光検出器 の埋設体積に比べて、8 倍の体積に約1万台の光検 出器を埋設予定であり、検出器は図1に示すように 南極の氷に 125 m 間隔で検出器が連なるケーブルを 埋設しているが、IceCube-Gen2 では 240 m の間隔 で埋設予定である。体積が増えることにより、観測 が難しい高エネルギー事象を観測できる確率が上が る。しかし、検出器の密度は小さくなっていしまう ため、検出器1つに対する検出効率を上げる必要が ある。私の研究では、IceCube-Gen2 実験に使用する 光検出器の候補の1つである LOM18 の製作を行い、 実地での使用のための品質保証を行っている。今回 は、実際に製作した検出器について報告する。

2 原理

2.1 光電子増倍管 (PMT)の原理





IceCube 実験で使用している光検出器は、光電子 増倍管 (PMT) と呼ばれる検出部によって、光を検 出している。光電子増倍管は、ガラス管に閉じられ た真空管で、光電面 (カソード)、集束電極、電子増 倍部 (ダイノード)、陽極 (アノード)により構成さ れている。

光電子増倍管に入射した光は、ガラス窓を透過後、光 電面内の電子を励起し、真空中に光電子を放出しま す。光電子は、集束電極で加速・収束され、第1ダイ ノードに衝突し二次電子を放出することにより、電 子増倍します。そして二次電子増倍がそれ以降の電 子増倍部に衝突し、二次電子放出を繰り返します。最 終ダイノードにより放出された二次電子群は最終的 に 10⁶~10⁷ 倍になり、陽極(アノード)より取り出 されます。

光電子増倍管を動作させるためには、電圧分割回路 と 500V から 2000V 程度の高電圧が必要である。各 ダイノードに印加される電圧によって電子の増幅率 が変化するため、適切に電圧を供給する回路が必要 である。

2.2 ゲイン

ゲインとは、光電子増倍管内での電流増倍率であ る。ゲインδは、以下の式で表される。

$$\delta = a \times E^k \tag{1}$$

ここで、δはゲイン、aは定数、Eは電圧、kは電極の構造・材質で決まり、0.7~0.8の値をとる。

2.3 Darkrate

Darkrateは、光が入射されていない暗室での信号 検出頻度である。Darkrateの発生源には、耐圧ガラ スや光電子増倍管のガラス内の放射性崩壊によるシ ンチレーション、熱由来で発生する信号などがある。 放射性プロセスの主な原因は、ガラス内のカリウム の崩壊である。崩壊で生成された荷電粒子が、ガラ スの蛍光物質を励起することによってシンチレーショ ン光が発生する。熱励起により発生した光子による 信号は、-40°Cまでの温度の低下に伴って小さく なる傾向がある。一方で極低温下では増加する成分 もある。

3 研究方法

3.1 新型光検出器の製作

前述した IceCube-Gen2 実験のための新型光検出 器の製作を行った。

3.1.1 新型光検出器 LOM18

我々が製作した新型光検出器 LOM18 は、卵型の ガラス球に覆われ 4inch の光電子増倍管を上下半球 に各9台ずつ計 18 台搭載している。(図4)各光電 子増倍管には、wubase と呼ばれる通信用の基盤が搭 載されており、上半球のガラスについているペネト け抑えるようになっている。



図 4: 新型光検出器 LOM18

3.1.2 ゲルパッド製作

新型光検出器 LOM18 の組み立てには、ガラス球 と光電子増倍管を接着するためにゲルパッドと呼ば れるシリコンゲルを事前に光電子増倍管に装着して いる。また、使用しているシリコンゲルは屈折率が 約1.4 であるため、ガラス球を透過した光子が空気 を介するよりも屈折率の差が小さくなる。

ゲルパッドの形は、ガラス球の位置に合わせて3種 類ある。それぞれ laver1.laver2.laver3 と呼んでいる。 。ゲルパッドの製作には、各 layer に合わせた製作用 の治具と型を使う。シリコンゲルは液体の状態で2 種類混ぜることによって固めることができる。その 性質を利用し、型に液体の状態のシリコンゲルを流 し込み、真空機にかけることで中の空気を抜き固まっ たシリコンゲルに空気の層が入らないようにする。

3.1.3 LOM18 組み立て

製作したゲルパッドを装着した光電子増倍管を使 い、製作を行う。製作は、半球ごとに行う。上下半球 の違いは、ペネトレーターケーブルの有無であるた め、製作手順は同じである。ガラス球に光電子増倍 管を挿入する際に、専用のステンレスのフレームを 使う。ガラス球にゲルパッドを接着するときは、先に ゲルパッド表面の縁を接着し、内側にさらにシリコ

レーターケーブルによって外部との通信を行う。ま ンゲルを流し込むことで固める。このような流れを た、実験のコスト削減のために球の直径をできるだ 全ての光電子増倍管に行い、半球を完成させる。半 球完成後は、各光電子増倍管をまとめる基盤やケー ブル類を接続して、気圧差によって半球同士を閉じ LOM18 の完成となる。

3.2 品質保証

LOM18を実験で使えるように、品質保証を行う必 要がある。今回は、現在行っている検出器の主に光 電子増倍管に注目した性能試験を紹介する。

3.2.1 ゲイン校正

ゲインは前述したように電子の増幅率である。 LOM18 で使用する 4inch の光電子増倍管の適正ゲ インは5×10⁶を採用している。ゲインの値は、光 電子増倍管に印加する高電圧が高いほど大きくなる。 実験では、高電圧の値を直接指定するのではなく、制 御電圧を指定することで調整する。制御電圧は高電 圧の値の 12 程度の値である。

適正ゲインンとなるような制御電圧の値は、個体差 がある。そこで、全ての光電子増倍管で適正ゲイン をとるように校正が必要である。そこで制御電圧を 2V 間隔で変えながら測定を行い、それぞれ電荷のヒ ストグラムを作成し、各電荷分布の単光子 (SPE)の ガウシアンの平均値からゲインを求める。そして制 御電圧に対するゲインからフィッティングを行い、適 正ゲインの制御電圧を求める

3.2.2 Darkrate 検査

Darkrate は、光源なしの環境で測定される信号の 頻度である。- 40 ℃ の冷凍庫内で遮光し測定してい る。。Darkrate は変動するため長い時間測定するこ とが理想だが、一回の測定時間はデータサイズの負 担を考慮して 300 秒とし、同様の測定をモジュール 1 台あたり 10 回以上繰り返すことでデータ量を確保 した。得られた波形データのうち、閾値を超えた信号 のカウント数を測定時間で割り、その値を Darkrate とした。ここで、Darkrate としてカウントするため の閾値は、0.25PE 相当の振幅に設定した。

4 結果

4.1 ゲイン校正

各光電子増倍管に対してゲイン校正を行った。結 果は、以下の図5に示す。組み立て前を丸の点で示 した。組み立て後は、ゲインが低く制御電圧が少し 高くなる傾向が見られた。これは、wubaseとPCを 仲介する基盤やケーブルが組み立て前後で異なるた めに生じた差であると考えられる。Darkrate 検査に 関しては、ここで得られた制御電圧を使用する。



図 5: gain 校正の結果 組み立て前後の比較

4.2 Darkrate 検査

ゲイン校正と同様に各光電子増倍管に対して Darkrate 検査を行った。結果は、以下の図 6 に示す。組 み立て前に比べて、Darkrate が高くなった。 組み立て前に比べて高くなった原因としては、ガラ スを付けたことによるシンチレーション光が考えら れる。

組み立て前の ch4 に関しては、測定時による環境の 違いや測定ミスがあったと考えられる。



図 6: Darkrate 検査の結果 組み立て前後の比較

5 今後の展望

現在、本番仕様として8台の組み立てを行ってい る。8台の中で光電子増倍管を浜松ホトニクス社製 とNNVT 社製を各4台ずつ製作する予定である。 今回、検査したものは試作機であり、今後製作した8 台を順次検査することで、データ数を増やすことで 統計を取るとともに、各検出器に対して品質を保証 していく。

Reference

- 浜松ホトニクス株式会社編集委員会, 光電子増倍管-その基礎と応用-第4版
- 千葉めぐみ 2024 千葉大学大学院修士論文

——index へ戻る

観測a14

XRPIXによる低バックグラウンドの硬X線分光観測 について

上村 悠介

XRPIX による低バックグラウンドの硬 X 線分光観測について

上村 悠介 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

宇宙では超新星爆発や中性子星合体といったイベントが突発的に発生する。しかし発見後すぐ (~1 日以内) に X 線で観測された例はなく、イベントが発生した直後の様子は分かっていない。そこで、他天文台との連携に よって突発現象を即座に観測できる X 線衛星として、「CHRONOS(旧 JEDI)」が提案されている。現在私 が開発に参画している X 線 SOI 検出器「XRPIX」は、CHRONOS で ~20 keV 以下の帯域を担当する検出 器の候補となっている。本集録では、私が過去に取り組んだ超新星の研究について短く説明し、CHRONOS 計画と、XRPIX による硬 X 線分光について紹介する。

1 はじめに

~10 M_{\odot} を超えるような大質量の恒星は、進化の 最終段階として重力崩壊型の超新星爆発を起こす。近 年の研究から、重力崩壊型超新星の親星は爆発の直 前に大規模な質量放出を起こすことが分かってきた。 しかし、超新星の本格的な X 線によるポインティン グ観測は発見後 10 日以上遅れて行われることがほと んどである。そのため、爆発直前の質量放出を反映 しているであろう、親星近くを覆う星周物質の情報 が得られていない。この問題を、私の過去の研究結 果を交えつつ『2 X 線による超新星の CSM 推定』 で説明する。

現在提案段階にある「CHRONOS(旧 JEDI)」計画 では、他天文台との連携による突発天体のUV/X線即 応観測をメインテーマの一つとしている。CHRONOS 衛星が打ち上がれば、超新星爆発初期のX線放射の 様子が明らかになる。CHRONOSの運用体制やサイ エンステーマについて、『3 次世代X線天文ミッショ ン「CHRONOS」』で説明する。

CHRONOSのX線撮像分光装置では2.0-40 keV のエネルギー帯域を想定している。しかし ≥10 keV では荷電粒子などの検出器バックグラウンドが大き く、従来のX線CCDではそれらとX線を分離する ことが出来ない。そこで ≤ 20 keVの帯域を担当する ピクセル型の検出器に、現在私が開発に参画している 「XRPIX」が採用候補として挙がっている。XRPIX を使った低バックグラウンドの硬X線検出について、 『3 X線撮像分光装置「XRPIX」』で説明する。

X線による超新星のCSM 推定

2.1 爆発前の質量放出

重力崩壊型の超新星は、爆発前の数日以内に大 規模な質量放出を起こすことが近年明らかになった (Jacobson-Galán et al. 2022)。星から吐き出された 物質は Circum-Steller-Medium(CSM) と呼ばれ、星 の周囲を覆っている。爆発後、衝撃波によって CSM は数千万 K にまで加熱され、広い帯域で X 線を放射 する。初期は放射領域が内側に存在することにより、 検出器に X 線が届く過程で、軟 X 線成分はより外側 に存在する CSM から吸収を受け、硬 X 線成分が卓 越する。数日–1年ほど経つと衝撃波の前進によって 放射領域が手前に移動し、吸収が弱まることで軟 X 線が卓越する。衝撃波速度は CSM の温度から推定で きるため、CSM の X 線放射から温度と吸収量の時 間変化を調べ CSM の密度構造を見積もることで、質 量放出の描像に観測的な制限をかけることが出来る。

2.2 超新星の時間発展

私はX線天文衛星である Chandra, XMM-Newton のアーカイブデータから、近傍銀河で発見された若い 超新星を系統的に解析し、X線の吸収量や光度などの 時間変化を調べた。例として、IIn 型超新星 SN2010jl の観測データ(表1,図1)と各超新星の光度変化(図 2)を示す。図1は観測データのX線スペクトルを 「吸収×放射モデル」でフィッティングし、検出器応 答を外したものになっている。爆発後の時間経過に よって、スペクトルの形状が変化していく様子が分 かる。図2では調べた超新星の光度変化をタイプ毎 に色分けしている。増減光のタイミングやタイムス ケールが超新星によって様々で、数週間から数年間 かけて減光した後、銀河などの背景放射に埋もれ検 出されなくなる。

| 表 1: SN2010jl の観測データ | | |
|----------------------|------------|---------|
| 経過日数 | 観測日 | 観測衛星 |
| 44 | 2010/11/22 | Chandra |
| 59 | 2010/12/07 | Chandra |
| 60 | 2010/12/08 | Chandra |
| 373 | 2011/10/17 | Chandra |
| 610 | 2012/06/10 | Chandra |
| 754 | 2012/11/01 | XMM |
| 1119 | 2013/11/01 | XMM |
| 1331 | 2014/06/01 | Chandra |
| 2643 | 2018/01/03 | Chandra |



図 1: SN2010jlのX線スペクトル



図 2: 様々な超新星の光度変化

2.3 光度変化から推定できる CSM 構造

簡単なモデルを使用しているため、温度と吸収量 の推定は不十分である。しかし、超新星の光度が概ね CSM 密度 (+CSM 温度) で決まるものと考えると、 フィッティングエラーの小さい光度変化から CSM の 定性的な密度構造 (図 3) を考察できる。衝撃波速度 を見積もれていないため、横軸を爆発後の経過日数 としている。



図 3: CSM の一次元密度構造

超新星によって CSM 構造は多種多様であるが、い ずれも発見直後の観測がないため、親星近くのC SM 構造が把握できていない。爆発の直前に起きる大規 模な質量放出を反映した CSM は親星の近傍にいる と考えられる。そのため突発天体を発見後、迅速に 追跡観測を行える X 線天文台があれば、CSM の全 貌や親星の質量放出、超新星の爆発メカニズムの解 明に繋がることが期待される。

3 次世代 X 線天文ミッション 「CHRONOS」

3.1 他天文台との連携による突発天体の即 応観測

近年、重力波やニュートリノによる天文学が観測 技術の向上により発展してきている。例えば2017年 には、NGC4993で発生した中性子星合体による重力 波が地上で検出され、その後対応天体から様々な帯 域の電磁波が検出された。こうした電磁波以外の目 も活用した天文学を「マルチメッセンジャー天文学」 と呼び、地上や周回軌道上に次世代の天文台が出揃 う2030年代に本格的に始動すると言われている。 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

来るマルチメッセンジャー天文学の時代に向けた新 たな日本の X 線天文衛星として、CHRomatic-ONcall-ObServatory(CHRONOS) ミッションが提案さ れている。現状、多くの突発現象 (中性子星合体や超 新星爆発など)のX線観測は数日経ってから行われて おり、特に発見後数時間以内はほぼ未探索の時間領 域となっている。2030年代、豊富に存在する外部の 天文台からアラートを受け取り突発現象の迅速な追 跡観測を行うのが CHRONOS のメインテーマの一つ であり、『2 X線による超新星の CSM 推定』で述べ た発見直後の超新星が X 線で観測されていない問題 も解決することが出来る。重力崩壊型の超新星では、 爆発による光が星の表面に到達する (ショックブレー クアウト) 数時間前にニュートリノが星を飛び出して いる。これが天の川近傍で発生すれば、ニュートリノ をハイパーカミオカンデなどで検出し、CHRONOS をその到来方向に向けることで、超新星のショックブ レークアウトを待ち構えることも可能である。

4 X線撮像分光装置「XRPIX」

CHRONOS の X 線撮像分光装置で 2.0 – 20 keV の帯域を担当する検出器の候補が、私が開発に携わっ ている「XRPIX」である。

4.1 従来のX線CCDとの違い

X線の撮像分光を行う検出器としては、CCDが現 在の主流であるである。CCDとは半導体検出器の読 み出しノードを縦横に並べたもので、読み出した電 荷量とノードの位置から、それぞれ入射イベントのエ ネルギーと位置を知ることが出来る素子である。優れ たエネルギー分解能と位置分解能を有し、Chandra の ACIS や XRISM の Xtend など数々の衛星に使用 されてきた実績がある。

XRPIX も縦横に配列した読み出しノードによって 位置決定を可能にした半導体検出器であるが、CCD との主な違いは電荷読み出しの方法である。CCDで はイベントの有無によらず、一定の間隔(1フレーム) で全ピクセルの電荷をバケツリレーのようにして転 送する(図 4)。これを「フレーム読み出し」と呼ぶ。

対して XRPIX ではイベントが入射したピクセルの



図 4: フレーム読み出しによる電荷転送の概念図

周辺のみを逐一読み出す。イベントが入射すると、ピ クセルから制御部分へトリガー信号が送られ、その 後制御部分からの命令でトリガーを出したピクセル 周辺一帯の各電荷が電圧情報になって読み出される (図 5)。これを「イベント駆動読み出し」と呼ぶ。



図 5: イベント駆動読み出しによる一連の電荷読み出 しの概念図

読み出し方法の違いによって得られる最も大きなメ リットは時間分解能である。CCDのフレーム読み出 しでは、全ピクセルの読み出しに~1sかかるため、 イベント発生時刻の決定精度は1フレーム(~1s)が 限界である。一方 XRPIX のイベント駆動読み出し では、ピクセルから制御部分に送られるトリガー信 号でイベント発生時刻を決定できるため、その精度 は~10 µs と CCD に比べ5桁優れている。
2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

4.2 高時間分解能を利用した低バックグラウンドの硬 X 線分光

宇宙空間では X 線以外にも高エネルギーの荷電 粒子が飛び交っており、X 線と同じように検出され る。これは撮像を行う際のノイズであり、Non-Xray-Background(NXB)と呼ばれる。~10 keV 以上の硬 X線帯域では高エネルギーの荷雷粒子が筐体を貫通 し検出器にエネルギーを落としていくため、NXB が 大きくなる。また高エネルギー荷電粒子を遮るよう な厚いシールドを衛星に搭載することも難しい。そ こで敢えて BGO シンチレータなどの蛍光物質をシー ルドとして使用し、蛍光物質と検出器で同時に検出 されたイベントは、筐体を貫通してきた荷電粒子由 来の NXB であるとして排除するといった方法 (反同 時計数法) がとられる (図 6)。NXB の頻度は~1 ms に1回であり、反同時計数法で NXB を低減した硬 X線分光を行うためには XRPIX が持つような高い 時間分解能 (~10 μs) が要求される。



図 6: 反同時計数法による NXB 弁別の概念図

5 XRPIXの開発要素

最後に、私が主に関わる XRPIX の開発要素(PG の実装)について説明する。現在、小型素子での実 用的な撮像、分光には成功している(Yukumoto et al. 2024)。しかし素子を大型化した際の性能劣化(泉 2024)や、素子から延びる配線の多さなど課題は残っ ている。配線の縮小については、イベント駆動読み 出しのための制御信号パターンを記憶し出力できる 集積回路(PG)を装着することで、解決する試みが 進んでいる。衛星で XRPIX を使用する際には、広 い視野を確保するために、限られた空間で大型素子 を複数枚並べることが求められる。PG を実装した XRPIX の開発に成功すれば、科学衛星の撮像素子と しての XRPIX の実現に一歩近づくはずである。

Reference

Jacobson-Galán et al. 2022, The Astrophysical Journal, 924:15 (25pp), 2022 January 1

Yukumoto et al. 2024, astro-ph.IM, 2024 January 9

泉大輔,修士論文 (宮崎大学), 2024

-----index へ戻る

観測a15

1.85m 電波望遠鏡による 3 帯域同時観測に向けた準光 学系バンドパスフィルターの開発

河本 琉風

1.85m 電波望遠鏡による 3 帯域同時観測に向けた準光学系バンドパス フィルターの開発

河本 琉風 (大阪公立大学大学院 理学研究科)

Abstract

私が所属する電波天文学研究室では、星形成過程の解明という目的のもと研究を行なってきた。我々の研 究室が所有する 1.85m 電波望遠鏡ではこれまで、CO 同位体 (12CO,13CO,C18O) の回転遷移数 J=2-1 と J=3-2 の回転遷移輝線が存在する 210-275GHz と 275-373GHz の観測を行ってきた。[1] ここでさらに CO 同位体の回転遷移数 J=1-0 の回転遷移輝線が存在する 84-116GHz も追加した合計 3 帯域の同時観測を目 標にしている。導波管限界のため、84 - 375GHz という比帯域 (周波数幅/中心周波数)130%を1つのフィー つまり、ある周波数よりも高い周波数と低い周波数の光路を透過・反射で分岐させ、それぞれの周波数帯の受 信機に導く仕組みである。ここで私は準光学系バンドパスフィルターの開発に取り組んでいる。フィルター の種類として LC 回路を用いたフィルターを採用している。六角形の繰り返し構造をしたキャパシティブ層 2枚と六角形の格子状をかたどった構造のインダクティブ層1枚が交互に重なったような構造となっており、 それぞれは金属でできている。金属の層の間に誘電体と接着シートが挟まっている。この六角形のパラメー タの最適化や誘電体の誘電率・厚み、重ねる層数等を最適化することにより、全ての帯域の確保や、入力損 失の最小化に取り組んだ。準光学系バンドパスフィルターを作成する手法として、フレキシブル基盤を用い たため構造の細かさ、誘電率や接着シートの厚みなどはある程度固定されてしまう。よってこの点も考慮し、 最適化を行なった。さらに、フレキシブル基盤の会社に依頼して実際に作成した準光学系バンドパスフィル ターをベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて透過特性の測定を行った。本公演では電磁界シミュ レーションソフト HFSS を用いた準光学系バンドパスフィルターのシミュレーション結果と、実測結果を報 告する。

1 背景

研究目的は星形成過程の解明であり、星の母体と なる分子雲の物理量を知ることが非常に重要である。 電波天文学研究室が所有する口径が 1.85m の 1.85m 電波望遠鏡では、分子雲内に存在する 12CO, 13CO, C18O の回転遷移輝線 (J=2-1, 3-2)を観測してき た。そして、より詳細な物理量を導出可能にするた め、我々はさらに回転遷移数 J=1-0の輝線を追加し た3帯域の同時観測を目標としている。しかし、導 波管限界のために3帯域をひとつの受信機で観測す ることは不可能であるため、準光学系周波数分離フィ ルターが必要となる。そこで私は準光学系バンドパ スフィルターの開発に取り組んだ。本論文では、電 磁界解析ソフト HFSS を用いた準光学系バンドパス フィルターのシミュレーション開発を行った結果並 びに、実際に測定した結果を報告する。

2 1.85m 電波望遠鏡

1.85m 電波望遠鏡とは長野県の野辺山宇宙電波観 測所に設置している口径 1.85m の電波望遠鏡である。



図 1: 1.85m 電波望遠鏡

電波分光受信システムの周波数帯域の広さは、比 帯域=(最高周波数 - 最低周波数)/(中心周波数) 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

で表される。1.85m 電波望遠鏡では、2020 年に RF 帯域で 210–375 GHz をカバーする受信機が搭載し、 56 %の比帯域を実現した。この受信機の特徴として は、ALMA 望遠鏡などで採用されている 2SB 受信の 方式とは異なり、出力 IF 帯域に制限がある SIS mixer 前でそれぞれ周波数分離を行うことにより、230, 345 GHz 帯に存在する CO 同位体 6 輝線の同時観測を可 能とした点である。



図 2: 新しい観測帯域

我々は現在、従来の観測帯域に CO 同位体の J=1-0 を加えた 3 帯域の同時観測の実現を目指している。し かし、すでに従来の観測帯域でさえ導波管自体の比 帯域の上限に近づいてきており、導波管帯域を超える 観測を行う際は、一般的に周波数分離フィルターを 用いた準光学的な手法が用いられている。準光学フィ ルターを用いて、ある周波数よりも高い周波数と低 い周波数の光路を透過・反射で分岐させ、それぞれの 受信機へと導くといった手法である。つまり、3 帯域 同時観測の実現には準光学系周波数分離フィルター が不可欠であり、私はこの周波数分離フィルターの 開発に取り組んだ。

3 準光学系バンドパスフィルター

今回、開発する準光学系周波数分離フィルターの 種類としては、特定の周波数のみを透過することが できるバンドパスフィルター(以下 BPF)を選択し た。以下では、設計した BPF の構造とモデルについ て述べる。

BPF の構造は図3のようになっている。六角形の 繰り返し構造であるパッチと、それと相補的な構造 であるグリッドを交互に重ねることにより BPF の特 性を示す。パッチとグリッドはそれぞれ低周波側のみ を通すローパスフィルター (LPF)、高周波側のみを

で表される。1.85m 電波望遠鏡では、2020 年に RF 透過するハイパスフィルター (HPF) の特性を示す。 帯域で 210–375 GHz をカバーする受信機が搭載し、 また、等価回路で表すと、パッチはコンデンサ、グ 56 %の比帯域を実現した。この受信機の特徴として リッドはインダクタとして見なすことができ、LC 共 は、ALMA 望遠鏡などで採用されている 2SB 受信の 振回路の BPF である。



図 3: BPF の構造

4 モデル

今回設計した周波数分離フィルターのモデルのス ケールは以下のようになっている。



図 4: モデルのスケール

パッチとグリッドの間には、誘電体と接着シートを 挿入している。誘電体は LCP (Liquid Crystal Polymer,液晶ポリマー)を用いた。それぞれの層の厚み と比誘電率は以下の表に示した。

低コストで制作するため、プリント基板の製造会社 に依頼した。そのため、ボンディングシート (SAFY-25) の厚みは 25um、六角形と六角形の間の距離は 40um 以上でなければならないという制限の中で最 適化を行った。



図 5: 角層の厚み

5 最適化と解析結果

HFSS 上で作成したモデルを図6に示す。上面、底 面には FloquetPort を、側面には Master、Slave を 設定することにより、単体のユニットが四方上に周 期的に並んだような設定にしている。それを囲む直 方体内は Vacuum(真空)で占められており、搭載 時の状況を再現している



図 6: HFSS 上のモデル図

以下には、六角形の向かい合う二辺に並行に TE 波、直行するように TM 波が入射するように設定し た時のシミュレーション結果を示す。入射角は 30 度 で設定した。

図8は70GHz 130GHzの透過損失を拡大したもの である。透過帯域はおよそ80GHz 118GHzとなった。 また、透過帯域での透過損失は-0.4dB -0.1dBとなっ た。HFSSで解析する際、180 230GHz,230 280GHz のように区切って解析しており、解析を異なる周波 数で行う場合、メッシュのサイズや密度の影響により 解析結果に段差が生じることがある。そのため、図 7の高周波側の透過損失に段差が生じている。



図 7: BPF の透過損失と反射損失の解析結果



図 8: BPF の透過損失の解析結果

6 測定結果

自然科学研究機構 国立天文台 先端技術センター (ATC)にて測定を行った。その際、VNA(Vector Network Analyzer)を用いた。以下のグラフの実践が測 定結果である。波線は図 8 のシミュレーション結果 である。





数で行う場合、メッシュのサイズや密度の影響により 結果としては、透過帯域が 20GHz ほど低周波側に 解析結果に段差が生じることがある。そのため、図 ずれていることがわかった。また、TE 波の損失は最 高地点では一致しているのに対し、TM 波はシミュ 7 レーションよりも損失が大きくなった。

また、実際の写真と、光学顕微鏡でフィルター表 面を拡大した写真を以下に示す。



図 10: 実物の写真 図 11: 表面の拡大写真

電子顕微鏡で六角形の一片の長さと六角形同士の 間の幅を測定した。フィルターの面裏で数箇所測定 した平均を以下の表に示した。

| | 六角形の一辺[um] | 六角形間の距離[um] | フィルターの厚み[um] |
|-------|------------|-------------|--------------|
| 実物の平均 | 214 | 55 | 450 |
| 図面 | 228 | 43 | 292 |

図 12: 実物と図面のサイズ

これより切削誤差も大きいと考えられるので、 HFSS で大きさを変更することにより、ズレの原因 調査を行った。その結果フィルターの厚みの違いが 有力であるという結論になった。以下に、シミュレー ション上で厚みを 411um に変更した結果と、実測の 結果のグラフを示す。



図 13: 厚み 411um のシミュレーション結果と、実測 の結果のグラフ

図 13 より、実測のグラフと概ね一致していること がわかる。したがって、今回の実測とシミュレーショ ンとのずれの原因はフィルターの厚みであったと考 えられる。

7 まとめと今後

私は今回、1.85m 電波望遠鏡による3帯域同時観 測のための準光学系周波数分離フィルターの開発に 取り組んだ。その結果シミュレーション段階では、透 過帯域80 118GHz、透過損失 ; -0.4dB を達成。実 測では、透過帯域が低周波側に10GHz ほどずれてお り、偏波の違いによる透過特性の違いが見られない など多くの誤差があった。その原因としてフィルター の厚みの切削誤差が考えられることが分かった。

図 12 より六角形の隙間の距離が図面よりも 2 割 ほど大きくなっていることがわかる。よって、43um までの細かい切削は厳しいことが分かった。次回に 向けて、大きめなモデルを検討する。今回は誘電体 や銅を削る作業が必要なモデルであったが、次回は、 切削なしの作成が簡単なモデルを検討。以下に、次 回実物化を検討しているモデルのシミュレーション 結果を示す。



図 14: 第2版 BPF の透過損失の解析結果

前回のモデルは既製品を削る作業の必要なモデル であったが、今回は全ての層を既製品そのままで作成 できるモデルである。また、六角形間の隙間は 50um となっている。今後はこのモデルをさらに改良した のち、発注・実測を行う。

8 参考文献

[1] 太田裕也 "1.85m 電波望遠鏡搭載 230GHz 帯 両偏波 2SB 受信機の開発 "2012 年度修士論文

[2] 山崎康正 "210–375 GHz 帯 超広帯域同時観測 へ向けた 電波望遠鏡光学系の開発" 2020 年度修士 論文 -index へ戻る

観測a16

CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD 低周波望遠鏡用偏光変調 器のための低温保持機構の開発

秋澤 凉介

CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD 低周波望遠鏡用 偏光変調器のための低温保持機構の開発

秋澤 涼介 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

LiteBIRD は大気の影響のない宇宙空間で宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)の全天精密観測を行い、原始重 力波由来 B モード偏光の検出を目指す。ここで用いる「偏光変調器」は半波長板を連続回転させて入射偏光 を変調し、観測装置由来の系統誤差を低減することで目的信号を最大化する。限られた衛星リソースで偏光 変調器を運用するため、超伝導磁気浮上ベアリング (SMB)と3相同期モーター回路を組み合わせた非接触 な「低発熱・低温連続回転機構」を開発し、5 K 冷却環境下において数 mW の低発熱で動作させることを目 指す。本発表では低温連続回転機構の構成部品のうち低温保持機構の開発について報告する。この低温保持 機構は軌道上において、偏光変調器の回転子保持機構および回転子の熱伝導経路として働き、低温ステッピ ングモーターによって駆動される。開発した保持機構と低温ステッピングモーターの詳細を述べる。また低 温保持機構の 7.1 K における発熱測定として 532 秒の動作時間に対して 2.39 ± 0.09 mW の暫定値を得た。 これらの発熱測定手法およびさらなる保持機構の低発熱化に向けた改良についても議論する。

1 Introduction

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background Radiation; CMB) は、ビックバンによ る宇宙の始まりから、約38万年後における観測可能 な最古の光であり、2つの偏光成分 (Eモード,Bモー ド)を持つ。この CMB 偏光は ACDM モデルで記述 される標準宇宙論を超えた新物理を探索する手がか りとなる。その1つが「インフレーション仮説」の 検証である。インフレーション仮説は宇宙開闢後の 極短時間に空間が指数関数的に加速膨張したとする 仮説で、標準宇宙論で説明できない観測事実(地平 線問題や平坦性問題)を一挙に解決する。このイン フレーション中には原始重力波が生じると予言され、 これは CMB に B モード偏光を刻む。すなわち原始 重力波由来の B モード偏光精密観測によって、イン フレーションのエネルギースケールを調べ、検証する ことができる。特に未発見の原始重力波由来Bモー ド偏光の信号検出のためには、欧州衛星実験 Planck のおよそ100倍の感度が求められ、これは輝度温度 にしてナノケルビンとなる。観測される時系列デー タには、欲しい CMB 偏光の信号に加えてノイズと なる統計誤差や系統誤差、天の川銀河からのダスト 放射やシンクロトロン放射などによる前景放射が含 まれる (図1)。ゆえにナノケルビン精度の偏光観測 を実現するためには、観測データにおける統計・系 統誤差の低減や前景放射の正確な理解が必要となる。 代表的な観測装置由来の誤差である熱ノイズは装置



図 1: 前景放射と 1/f ノイズ (Ghigna, T. et al. 2024)

自体を冷却環境下に置くことで低減できる。目標と するナノケルビン精度偏光観測のためには、低周波 領域で卓越するノイズ成分である 1/f ノイズや、検 出器間のゲイン差等の差分起因の誤差の低減が必須 である。これらの 1/f ノイズや差分起因の誤差を低 減する装置が、回転する冷却半波長板によって入射 する CMB 偏光に変調をかける低温偏光変調器であ る。この偏光変調器はすでに地上 CMB 望遠鏡で運 用されている一方で、電力や冷凍能力の限られた衛 星環境で安定動作できる低温偏光変調器は未開発で 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

ある。特に半波長板を回転させるための低温連続回 転機構には数 mW の低発熱かつ低摩耗な回転機構が 必要となる。その実現のために超伝導磁気浮上を用 いた完全非接触式軸受と同期モーターを組み合わせ た回転機構を開発し、口径 330 mm のブレッドボー ドモデル (Takaku, R. et al. 2024) での実証実験およ び低温発熱評価を行ってきた。この回転機構には衛星 の打上後に軌道上で超伝導体が冷却されるまで半波 長板を含む回転部分を保持する「低温保持機構」(図 2)を搭載予定である。これはステッピングモーター と機械式リニアアクチュエーターで構成され、それ ぞれの発熱評価と低減が求められる。そこで本発表 では低温保持機構全体の暫定的な発熱測定結果と考 察、さらなる展望について述べる。



図 2: 低温保持機構の概観

2 Instruments

2.1 低温ステッピングモーター

低温保持機構のために多摩川精機社の2相バイポー ラステッピングモーター (TS3690N1E) をベースに、 図3に示した低発熱モーターを新たに開発した (Iida, T. et al. 2024)。このモーターは10 K以下の冷却環 境下において10 mW 程度の発熱で動作することを 目指して開発した。特に動作時の発熱に対する目標 値を達成するために、モーターの4つの発熱要因で ある銅損、ヒステリシス損、摩擦損および渦電流損 に対する改良を行った。モーター固定子側のシャー シはアルミニウムから絶縁体材料であるガラスエポ キシ材料に変更し、固定子におけるヒステリシス損 と渦電流損を低減した。またモーターコイルをマグ ネットワイヤーから 6N 高純度銅線にすることで銅 線におけるジュール発熱を低減した。ただし 10 K 以 下の低温で動作させるため、モーターシャフトを支 持する 2 個のボールベアリングは凍結を防ぐため無 潤滑のものを用いた。



図 3: 低温ステッピングモーターの概観

2.2 低温保持機構

低温保持機構は、保持機構アーム、機械式リニアア クチュエーターおよび前項の低温ステッピングモー ターで構成され(図2)、衛星の打上後に軌道上で YBCO 超伝導体が冷却されるまで回転子位置を保 持する。ステッピングモータおよびリニアアクチュ エーターが半径方向にアームを動かすことで、アー ムのウェッジ形状を回転子側のV字型溝に挿入して 保持する。またこの保持機構は低温回転機構に搭載 される半波長板を含む回転子への熱伝導経路として 働く。



図 4: 低温回転機構の CAD モデルと保持機構

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

3 Methodorogy

3.1 本実験の測定系

本実験における測定系の 3D-CAD および写真を図 5 に示した。ステッピングモーターを含む低温保持 機構は、肉厚 0.5 mm の中空ステンレススチール柱 を用いて、4K-GM 冷凍機のコールドプレートに接 続された銅ブロックに固定した。保持機構のベース プレートには較正済みダイオード温度計(図中赤丸) を取り付け、保持機構からの発熱による温度変化を 測定した。クライオスタット内での保持機構の動作 は可変抵抗器を用いたリニアエンコーダによって測 定した。



図 5: クライオスタットと測定系

3.2 測定方法

3.2.1 準備実験:較正曲線の測定

保持機構の発熱測定に先立って、入熱に対する系 の温度変化をヒーターを用いて調べることで較正曲 線の測定を行った。保持機構ベースプレートに取り 付けた抵抗器 (100 Ω) をヒーターとして用いて、既 知の直流電流を印加したときの温度変化を記録し (図 6)、そこから初期状態と平衡状態における温度上昇 ΔT を測定した。このときこのヒーターと保持機構、 冷凍機からなる系は (1) 式の熱モデルで考えられる。 C は保持機構の実効的な熱容量、G はステンレスス チール柱を含む保持機構と銅ブロック間の実効的な 熱伝導率を表す。

$$P_{\rm in} = C \frac{\mathrm{d}T_{\rm assy}}{\mathrm{d}t} + G\Delta T, \qquad (1)$$

ただし簡単のため、*C*,*G* は温度によらない定数とした。このとき (1) 式は解析的に解くことができて、一

定の入熱 P_{in} に対する系の過渡的な温度変化を次式 で記述できる。

$$T_{\text{assy}} = (T_f - T_{\text{init}})(1 - e^{-t/\tau}) + T_{\text{init}},$$
 (2)

ここで、 T_{init} は保持機構の始状態における平衡温度、 $T_f = P_{\text{in}}/G + T_{\text{init}}$ は入熱に対する終状態の平衡温 度そして、 $\tau = C/G$ は過渡応答の時定数である。



図 6: ヒーターの入熱 (0.9 mW) に対する温度曲線

図7に得られた較正曲線として一定電流の直流を抵抗に印加したときのジュール発熱 P_j と、それに対応する温度変化 $\Delta T = T_f - T_{init}$ を示した。較正曲線として (3) 式を仮定して各項の係数を最小二乗法によって定めた。得られた係数は $a = 1.20 \pm 0.04$ K/mW および $b = 0.08 \pm 0.03$ K である。特にパラメータの不確かさは冷凍機運転の際の 30 mK 以下の微小な温度変化が支配的であった。

$$\Delta T = aP_j + b \tag{3}$$



図 7: ヒーターを用いた較正曲線

3.2.2 保持機構動作時の発熱測定

保持機構の発熱測定は次のように行った。まず保 持機構を含む系全体を 7.1 K 程度に冷却した。その 後ステッピングモーターを 0.05 Hz の一定速度で回 転させることで保持機構を 30 mm(最大ワーク径)だ け動作させた。これに対応する動作時間は 532 秒で ある。また保持機構の動作を確認するために直線可 変抵抗にバイアス電圧 100 μA を印加してエンコー ダとして用いた。このときの発熱は最大で 0.12 mW であり、保持機構全体の発熱よりも充分小さかった。 このときの系の温度変化を保持機構ベースプレート に取り付けた温度センサによって測定した。

4 Results

図 8 に測定した温度曲線および対応する直線エン コーダの電圧値を示す。(2) 式によるフィットによっ て求めた時定数は $\tau = 52.8 \pm 2.8$ 秒で、平衡温度は $\Delta T = 10.02 \pm 0.02$ K であった。ここから図 7 を用 いて温度変化を発熱に変換することで、保持機構動 作による発熱を 2.39 ± 0.09 mW と推定した。



図 8: 保持機構動作時の温度変化 (上段) と直線エン コーダの電圧の変化 (下段)

5 Discussion

得られた動作発熱および動作時間から、保持機構 の 30 mm の動作に対する総発熱量は 1.27 J と得ら れた。ただし次のことに注意する必要がある。保持 機構の最大ワーク径である 30 mm では、 図 8 に示 したように、保持機構全体が熱平衡には到達しない。 ゆえに (2) 式による動作時だけのフィットでは平衡温 度が過少に見積もられている可能性がある。これは 今回参照した保持機構ベースプレート上の温度セン サの位置に依存しする。モーターや保持機構機械部 分における発熱のすべてが、動作時間の 532 秒のう ちにベースプレートに移動せず、遅い時定数によって 移動するからである。これを解決するためには温度 センサを保持機構全体と銅ブロックをつなぐチュー ブに取り付けて測定することや、平衡温度に到達す るまで繰り返し保持機構を往復動作することが考え られる。

6 Conclusion

本研究では LiteBIRD 低周波望遠鏡用の低温保持 機構について 10 K 以下における発熱測定を行い、 2.39±0.09 mW と推定した。これによってステッピ ングモーターと保持機構全体が 10 K 以下で動作す ることを確認したとともに、mW オーダーの発熱測 定手法を構築できた。これを元にさらなる低発熱化 および動作時間の最適化を実施予定である。

Acknowledgement

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP23H00107, and JSPS Core-to-Core Program, A. Advanced Research Networks.

Reference

- The LiteBIRD mission to explore cosmic inflation, 2024, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2024
- Development status of the polarization modulator using 330 mm diameter sapphire-based achromatic halfwave plate for LiteBIRD, 2024, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2024
- Development status of cryogenic holder mechanism for LiteBIRD LFT PMU, 2024, SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2024
- Development of a cryogenic stepping motor using highpurity copper wire, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1301 (2024) 012006

--index へ戻る

観測a17

CMB 偏光観測に向けたアルミナ赤外吸収フィルター のためのレーザー加工によるモスアイ反射防止構造の 開発

相澤 耕佑

CMB 偏光観測に向けたアルミナ赤外吸収フィルターのためのレーザー加 エによるモスアイ反射防止構造の開発

相澤 耕佑 (東京大学大学院 理学系研究科物理学専攻 修士2年)

Abstract

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) に刻印された原始重力波由来の B モード 偏光の観測に向け、地上 CMB 偏光観測用望遠鏡では更なる高感度化を目指すべく大スループットの大型ミ リ波光学素子の開発が進行中である。そこで、主要な放射熱源である赤外線を吸収し、かつ熱伝導率が高いア ルミナからなる赤外カットフィルターの搭載が要請される。しかしアルミナは屈折率が 3 程度あることに起 因する高い Fresnel 反射率を持ち、CMB 観測帯域であるミリ波の透過の妨げになっている。したがって実装 においてはミリ波に対して高い透過性能を低温でもロバストに保つような反射防止機構の作製が必須となっ ている。我々はモスアイ構造と呼ばれるサブミリ長の周期構造を超短パルスレーザーを用いてアルミナ表面 に直接加工することで反射防止を実現した。本研究では偏光観測対象帯域を大気窓で 30~40 GHz、90~150 GHz、220~270 GHz の三つの帯域に分割し、各帯域に対応する構造を作製した。光学性能については、透 過率スペクトルを数値計算によりシミュレーションしたのちに各帯域を 30 % の比帯域を持つ二つのサブバ ンドに分割し、各バンドにおける帯域平均透過率を持って評価した。誘電損失 4 × 10⁻⁴、入射角 < 20° を 考慮して実行した結果、すべてのバンドで平均透過率 97 % 以上を達成した。また p 偏光と s 偏光に対する 透過率の差分の各帯域における平均は 0.4% 以下であった。

1 Introduction

宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background;CMB) はビッグバンの残光であり 観測 可能な宇宙最古の光である。現在の標準ビッグバン 宇宙論を確立する上で CMB の詳細観測は大きな役 割を果たした。しかし今なお、この標準宇宙論では 説明できない観測事実が複数存在し、それらを一挙 に説明するインフレーション仮説が提唱されている。 インフレーションは宇宙初期 10⁻³² 秒後に起きたと される空間の指数関数的膨張であり、インフレーショ ンによって生成された原始重力波が CMB に B モー ドという偏光状態を刻印する。これにより原始重力 波由来の B モードを検出することでインフレーショ ンのエネルギースケールに実験的制限をかけること が可能であり、その発見に向け世界的に熾烈な競争 がある。

インフレーションの高精度探索のためには輻射温 度でおよそ 10⁻⁹ K 程度という極めて微弱な原始重 力波由来 B モード偏光の信号を検知する必要がある。 よって十分な統計感度を得るべく多素子極低温検出器 にてノイ ズを避け最大限の入射放射量を受け取るこ とが重要である。このためには、ミリ波である CMB に高い透過率を示し、同時に熱放射源となる赤外線 を除去する広帯域赤外線カットフィルターが次世代 地上 CMB 偏光観測望遠鏡における高感度観測に要 求される。近年、赤外に吸収帯を持ち、かつ熱伝導 率も高いアルミナが赤外カットフィルターの素材と して大きな注目を集めており、使用例が増えている [Y.Inoue et al. (2014)]。

一方でアルミナはその屈折率 (~3) に起因する反 射による透過率の低さが課題である。高感度かつ広 帯域の偏光観測を実現するためには、低温でもロバ ストに機能する反射防止機能を実装した大型ミリ波 光学素子 (直径 0.5 m 以上) が必要不可欠だが、偏光 感度への系統誤差を最小限に抑えつつ広帯域 反射防 止機能を実装する技術確立には至っていない。

2 レーザーによる反射防止構造の 実装と評価方法

以上の課題を解決し、高感度 CMB 観測実験の設 計制約である単一望遠鏡の広帯域観測を打破すべく、



図 1: LF 帯域用の 3×3 のモスアイ構造の 3D 画像 (左)とモスアイの大きさを定義する値(右)。これら の画像は共焦点顕微鏡によって撮影した。

| 表 1: 各帯域ごとに設計したピッチ (p) の値 | | | | |
|---------------------------|-------------|---------------|---------------|---------------------|
| | | \mathbf{LF} | \mathbf{MF} | HF |
| | $p \; [mm]$ | 1.90 | 0.50 | 0.27 |

図1のようなモスアイ構造と呼ばれるピラミッド型 のサブ波長構造を超短パルスレーザーを用いてアル ミナ表面に直接加工し、広帯域反射防止を実現する。

一般的に地上 CMB 偏光観測はミリ波帯域である およそ 20~300 GHz 帯域で行われ、大気窓による吸 収を避けるべく 30 GHz 帯、125 GHz 帯、250 GHz 帯の三帯域に分割される。本研究では各帯域ごとに 最適化した反射防止構造を設計し、それらに従って 図1のように3×3=9個の構造の超短パルスレーザー による加工を繰り返し、設計した構造の再現を目指 した。作製した形状に対して、RCWA 法を用いた透 過率スペクトルのシミュレーションを適用し、光学 性能の評価とした。

反射防止構造の設計 3

設計では構造のピッチ (p) と高さ (h) が主なパラ メータとなる。各帯域ごとに、ピッチは以下の式で 決定する。

$$p \le \frac{c/\nu_h}{n+\sin\theta_i},\tag{1}$$

cは光速、nはアルミナの屈折率、 θ_i は最大入射角 (FoV)、 ν_h は各帯域の最大周波数である。これによ り p よりも長い波長の光が入射した際に回折を抑 え、より高い透過率が実現できる。表1に、各帯 域ごとに最適化した p の値を示した。h は Klopfen-

表 2: 各帯域における、作製した構造の形状パラメー タの9個の平均値と標準偏差

| [mm] | \mathbf{LF} | MF | HF |
|-------|-----------------|------------------|------------------|
| d_x | 3.22 ± 0.01 | 0.89 ± 0.003 | 0.45 ± 0.02 |
| d_y | 3.20 ± 0.04 | 0.92 ± 0.02 | 0.39 ± 0.01 |
| d_t | 4.13 ± 0.07 | 1.33 ± 0.01 | 0.66 ± 0.01 |
| w_x | 0.43 ± 0.03 | 0.14 ± 0.01 | 0.06 ± 0.004 |
| w_y | 0.42 ± 0.03 | 0.15 ± 0.01 | 0.05 ± 0.003 |

ング手法により最適化した空気層からアルミナ層の 滑らかな屈折率の変化を、有効媒質近似 [R. Bräuer and O. Bryngdahl (1994)] によりモスアイの構造に 焼き直すことによって決定した。図2の点線にその 設計した形状を示した。一般に構造のアスペクト比 (h/p)が高くなるほど広帯域で高い透過率を保持する ことができるが、同時により加工時間を要するため、 光学性能と加工時間のトレードオフが焦点となる。

加工結果 4

超短パルスレーザーにより加工した形状のパラメー タを表2にまとめた。また、形状の断面図及びイン デックスプロファイルを図2に示した。

光学性能の評価 $\mathbf{5}$

作製した形状データに基づき、透過率性能を計算 した。計算時のモデルでは、ベースアルミナの両面 にモスアイ構造が施されていると仮定した。また誘 電正接 $(tan\delta)$ を 4.0×10^{-4} を設定し、吸収の効果 を再現した。図2に示すように、ピラミッド形状は x 方向と y 方向で同一ではない。そこで構造をアル ミナの両面に配置する際に、一方の面のモスアイ構 造をもう一方の面に対して 90 度回転させ、対称にす る処理を施した。これは R. Takaku et al. (2021) に より透過率パフォーマンスへの効果を実証済みであ る。計算には、9個のモスアイのうち中心にある構造 の形状データを用いた。ベースアルミナの厚さは2.4 mm とした。これは、実際の赤外カットフィルター の設計時に最適化するパラメータの一つである。図 3に、以上の過程に基づいて RCWA 法により計算し stein[Klopfenstein (1956)] のインピーダンスマッチ た、各帯域における5つの異なる入射角に対する透



図 2: 各帯域における設計した形状 (点線) と作成した 形状 (実線) の断面図及びインデックスプロファイル

過率スペクトルと入射偏光に対するスペクトルの差 (Instrumental polarization; *IP*) を示した。*IP* は以 下の式で定義される。

$$IP(\nu) = \frac{T_S(\nu) - T_P(\nu)}{T_S(\nu) + T_P(\nu)},$$
(2)

ここで、 $T_P \ge T_S$ はそれぞれ p 偏光 $\ge s$ 偏光の入射 光の透過率である。また各値の平均値は、三つの各 帯域の中でさらに二つに分割した比帯域 0.3 を持つ 各サブ帯域の中で計算した。表 3 にそれらの値を示 した。

表 3: 各入射角における、帯域平均透過率 (上) と *p* 偏光と *s* 偏光に対する帯域平均透過率の差 (下)。そ れぞれの表において、各行は上から 27 GHz 帯、39 GHz 帯、93 GHz 帯、145 GHz 帯、225 GHz 帯、280 GHz 帯の値を示す。

| | | T | | |
|----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| $\theta_i = 0^\circ$ | $\theta_i = 5^{\circ}$ | $\theta_i = 10^\circ$ | $\theta_i = 15^{\circ}$ | $\theta_i = 20^\circ$ |
| 0.976 | 0.976 | 0.975 | 0.973 | 0.970 |
| 0.989 | 0.989 | 0.989 | 0.989 | 0.989 |
| 0.980 | 0.980 | 0.980 | 0.979 | 0.978 |
| 0.973 | 0.973 | 0.973 | 0.973 | 0.973 |
| 0.973 | 0.973 | 0.973 | 0.972 | 0.972 |
| 0.963 | 0.963 | 0.963 | 0.964 | 0.965 |
| | | \bar{IP} | | |
| $\theta_i=0^\circ$ | $\theta_i = 5^{\circ}$ | $\theta_i = 10^{\circ}$ | $\theta_i = 15^{\circ}$ | $\theta_i = 20^\circ$ |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | -0.001 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.003 |
| 0.000 | 0.000 | -0.001 | -0.002 | -0.003 |
| 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.003 |
| | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.000 |

この結果、LF 及び MF 帯域においては全てのサブ 帯域で 97% 以上の平均透過率を実現した。HF 帯域 については、モスアイの形状に対するアルミナベー スプレートの厚さの比率が他の二つの帯域に比べ小 さいため吸収の効果が比較的大きく出てしまったこ とにより、平均透過率は 96% 程度に収まった。また 全てのサブ帯域で *IP* の帯域平均は 0.4% 以下に収 まった。

6 Discussions

以上のように作製した反射防止構造は吸収を考慮 しても96%以上の帯域平均透過率を保持しており、 これは実際の望遠鏡への実装が十分可能な値だとと らえる。今後、実際のミリ波による透過率性能の評価 とTHz帯域の吸収測定により赤外カットフィルター としての性能評価を行う。また感度計算パイプライ ンを用いた計算により、形状の系統誤差が望遠鏡の 感度に与える影響を評価することで、望遠鏡への実 装に向けた実証実験とする。

| 表 4: | 各帯域における | volume | remo | val rate |
|------|---------|--------|------|----------|
| | | | _ | |

| | LF | MF | HF |
|-------------------|------|------|-----|
| VRR $[mm^3/min.]$ | 19.8 | 13.4 | 3.2 |

表 5: ヒストグラムのフィットにより算出した形状 データの平均値と標準偏差

| | MF |
|----------------------|-----------------|
| $d_x [\mathrm{mm}]$ | 0.90 ± 0.02 |
| $d_y [{\rm mm}]$ | 0.92 ± 0.02 |
| $d_t [\mathrm{mm}]$ | 1.29 ± 0.02 |

達成した光学性能の一方で、加工に要した時間にも 注目したい。これらは体積アブレーション率 (Volume removal rate; VRR) をもって評価する。表4に各帯 域ごとの値を一覧にした。これらの結果により、多く の地上望遠鏡の要求値に近い値である直径 500 mm のアルミナプレートに本反射防止構造を作成したと 仮定した場合、各帯域でおよそ10日ほどで加工が終 了すると見積もられる。これは実際に素子を作製す るにあたって十分現実的な時間である。

また、大面積を加工する際に着目すべき観点は構 造の均一性がアルミナ表面全体に渡って保持される か否かである。そこで MF 帯域に対して最適化した 形状を、直径 60 mm の径内全体に加工した。次に作 製された構造のうちおよそ 4,000 個ほどの構造の形 状パラメータの平均値と標準偏差をヒストグラムの フィットから算出して均一性を評価した。その結果 を表5に示した。結果、直径 60 mm に加工範囲を拡 大しても標準偏差は平均値のおよそ 2% 程度にとど まっていることが分かり、均一性は担保されている と言える。

Reference

Inoue et al., Appl. Opt. 53(9), 1727-1733 (2014)

- Klopfenstein, R. W., Proc. of the IRE, 44(1), 31-35, (1956)
- R. Bräuer and O. Bryngdahl, Appl. Opt. 33, 7875-7882 (1994).
- R. Takaku, Optics express 29(25), 41745-41765 (2021).



図 3: 設計した形状に基づいた透過率スペクトルのシ ミュレーションの結果 -index へ戻る

観測a18

CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD 低周波望遠鏡偏光変調器 のための低温回転機構の開発

岩垣 大成

CMB 偏光観測衛星 LiteBIRD 低周波望遠鏡 偏光変調器のための低温回転機構の開発

岩垣 大成 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background; CMB)は宇宙の晴れ上がり時に直進できるようになった現在観測できる宇宙最古の光であり、黒体放射の図白とるを持つ。宇宙誕生直後に急激な空間の膨張があったとするインフレーション仮説では、インフレーションによって生み出される原始重力波が CMB に B モードと呼ばれる特殊な偏光パターンを生成すると考えられているため、この B モード偏光を精密に 観測することでこの仮説を検証できる。現在、JAXA/ISAS が中心となってこの B モード偏光観測に特化した人工衛星計画 LiteBIRD が進められている。LiteBIRD の科学目標は原始重力波強度に相当するパラメー タであるテンソル・スカラー比の誤差 δr < 0.001 の観測精度を実現することである。

Kavli IPMU では LiteBIRD の低周波望遠鏡に使われる偏光変調器の開発をしている。これは観測対象で ある CMB の偏光が観測システム由来の 1/f ノイズに埋もれないために、入射偏光を半波長板で回転させる ことで変調する装置である。感度向上に鍵となる装置である一方で、検出器へ寄与する熱ノイズを低減する ために望遠鏡自体を約5Kの低温に保つ必要があり、衛星環境の限られた冷凍能力でその性能を実現する技 術的課題がある。この偏光変調器の低発熱化を実現すべく、現在各装置の改良・回転時の発熱量の算出を目 的とした低温環境下での回転試験を行なっている。本講演では、この回転機構の構造と現在得られている結 果と課題、今後の計画について報告する。

1 Introduction

宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background; CMB)はその温度スペクトルが約 2.726K の黒体放射として近似できる、現在の宇宙 をほぼ一様に満たしている放射である。これは宇宙 初期にプラズマ状態の電子などの荷電粒子によって トムソン散乱されていた光子が、宇宙誕生後約 38 万 年後に陽子と電子が結合したことによって直進でき るようになった(宇宙の晴れ上がり)ために観測で きる、ビッグバンの名残だと考えられている。

現在確立されている標準ビッグバン宇宙論では平 坦性問題、地平線問題、モノポール問題などの極初 期宇宙において説明できないいくつかの問題点を抱 えており、これらを一気に解決する仮説としてイン フレーション仮説が考えられている。

インフレーション仮説は、宇宙誕生直後の非常に短 時間に急激な空間の膨張があったとする仮説であり、 このとき物質場の量子ゆらぎから原始重力波が生み 出される。この原始重力波は CMB に E モードと B モードの偏光パターンを生成するが、インフレーショ ンで同時に生み出される密度ゆらぎからはEモード しか生成されない。そのため、CMBのBモード偏 光から原始重力波由来のものを発見することはイン フレーションの存在の強い証拠となる。

この原始重力波由来のBモード偏光観測に特化し た人工衛星として LiteBIRD(Lite satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection)が計画さ れている。LiteBIRD の科学目標は原始重力波強度 に相当するパラメータであるテンソル・スカラー比 の誤差 $\delta r < 0.001$ の観測精度を実現することであ る。LiteBIRD はその観測帯域 34 – 448 GHz を 3 つ の望遠鏡で分けて観測するが、そのうち日本は 34 – 161 GHz を観測する低周波望遠鏡(Low Frequency Telescope = LFT)の開発を担当している (Y.Sakurai et al. 2020)。

Kavli IPMU では LFT のうち 偏光変調器 (Polarization Modulator Unit; PMU) (R.Takaku et al. 2024) の開発を主に行なっている。PMU は観測シ ステム由来の 1/f ノイズと系統誤差を低減するため に、望遠鏡の開口部で半波長板を回転させることで 入射偏光を変調する装置である。PMUによって入射
 (偏光は半波長板の回転周波数の4倍の周波数に変調
 されるため、検出器由来の1/fノイズに埋もれずに
 検出できる。また、半波長板の回転周波数を常に測定することで入射偏光の周波数を復調できる。

2 Instruments

LiteBIRD の PMU には約5Kという低温環境下 で直径約50 cm の半波長板を低発熱で安定的に連続 回転させる低温回転機構の開発を行なっている。こ の低温回転機構は主に磁気浮上のための超伝導磁気 軸受、回転させるための駆動メカニズム、回転周波 数・回転角度再構成のための光学式エンコーダー、回 転子保持のためのグリッパーで構成される。以下で はこの各部分について詳細に説明する。



図 1: 低温回転機構の全体像

2.1 超伝導磁気軸受

低温回転機構は回転部分(回転子)と非回転部分 (固定子)に分けられ、固定子側の第2種高温超伝導 体であるYBCOと回転子側の永久磁石(SmCo磁石) を向かい合わせることで構成される超伝導磁気軸受 (Superconducting Magnetic Bearing; SMB)(J.Hull 2000)を用いている。これはYBCOの転移温度であ る約95 K以下ではYBCOが超伝導状態になり、永 久磁石の磁束が束縛されるという磁束ピン留め効果 によって回転子を浮上させた状態を維持できるとい うものである。これにより回転子を回転させたとき の物理的な摩擦による発熱を抑えられる。

2.2 駆動メカニズム

この回転機構では、回転子を回転させる方法とし て同期モーターと同じ原理を用いている。回転子の 外周部分に72個の永久磁石、それと向かい合う位置 の固定子側に54個のコイルを配置し、これらのコイ ルに3相交流を流すことで電磁誘導により回転子を 回転させる。3相交流と回転子の回転が同期してい ると、交流の周波数を徐々に上げることで回転周波 数も比例して上げることができる。

2.3 光学式エンコーダー

半波長板は約5Kの低温かつ密閉された高真空の 環境下で回転するため、その回転の様子をカメラな どで観察することはできない。しかし、変調した入 射偏光の周波数を復調するには半波長板の回転角度 を測定する必要がある。そのため、この回転機構で は多数のスロット付きディスクと LED、フォトダイ オードを用いた光学式エンコーダーによって回転周 波数を測定している。ディスクは外周部分に128個、 その内側に1個のスロットが付いたものであり、回転 子に取り付ける。このディスクを上下で挟むように 固定子側に LED とフォトダイオードを向かい合わせ て設置している。LED とフォトダイオードは A.B.Z の3セットあり、A,Bは1周で128個のスロットが 通過し、Zは1周で1個のスロットが通過する位置 にある(図2)。回転子の回転周波数によって LED の光を検出する周期が変わるので、この信号の周期 から回転周波数を、エンコーダーZの信号のタイミ ングとそこから A または B の信号の数を数えること で回転角度を再構成することができる。



図 2: エンコーダー・エンコーダーディスクのイメージ

2.4 低温保持機構(グリッパー)

この回転機構では、YBCO が超伝導状態になるま での間、回転子を適切な高さで保持しておくための装 置を用いており、これを低温保持機構(グリッパー) (R.Akizawa et al. 2024) という。固定子側に3つ設 置しており、ステッピングモーターを用いて半径方 向に駆動する。回転子を保持するときは内側に、放 すときは外側に動作させる。また、回転子が磁気浮 上しているときは熱交換する手段が放射しかないた め、半波長板の温度が上がったときにグリッパーを 閉じることで回転子を冷却する機能も果たす。

3 Results and Discussion

2024 年 4 月 ~ 7 月にかけて、開発中の回転機構 のモデルを低温のクライオスタット内で回転させる 回転試験を行なった。この試験の概要と光学式エン コーダーの測定データから得られた回転周波数再構 成と周波数振動の周波数・駆動電流依存性の結果に ついて述べる。

低温での回転試験を行うために、まずクライオス タット内に回転機構を入れて密閉し、冷凍機を用い てクライオスタット内を約10Kまで冷やして熱平衡 状態を実現させる。クライオスタット内が一定の温 度に保たれると、グリッパーを開けて回転子を浮上 させ、コイルに3相交流を流し、その交流の周波数 を階段状に上げることで、回転子を静止していた状 熊から一定の加速度で加速させ、交流が指定した周 波数に達するとその周波数に留まることで回転子を 定常回転させる。その後任意のタイミングでコイル に流す電流を止めることで回転子は主に磁気摩擦に よってトルクを失っていき、やがて回転が止まる。こ の回転開始から終了までの一連の流れを、駆動電流 の大きさ(交流の振幅)や定常回転における回転周 波数、回転の加速の仕方(交流周波数を上げる周期 と上げ幅)を変えながら繰り返す。この回転試験で はコイルに流す3相の電流、電圧、光学式エンコー ダーのフォトダイオードで得た信号、回転機構内の 温度計で測定した各装置の温度、といった測定値の 時間変化のデータを得る。

3.1 回転周波数再構成

回転機構に搭載している光学式エンコーダーから 得られた信号を用いて回転子の回転周波数を再構成 できる。従来は1回転で1つの信号が得られるエン コーダーZの信号を元に再構成していたが、より詳 細に回転周波数の変化を測定して回転安定性を実現 する方法を探るために、Bの信号を元に回転周波数 再構成を行なった。

図3の上段のグラフは実際のエンコーダー B の測 定データと LED の光を検出した時刻を読み取る箇所 を表したものである。この測定データでは信号を検 出したとき下にピークが出ており、これらの時刻を 読み取るために閾値となる直線を1本引き(図3の オレンジ色の線)、赤色の丸と矢印で示したように その閾値を上から下に跨いだ時刻を読み取っている。 図3の下段のグラフは信号を検出した時刻の算出方 法を示したものである。エンコーダーの測定データ (青色の点)は有限個であるため、閾値を跨いだ前後 の2点を結んだ直線と閾値が交わる時刻を信号を検 出した時刻(図の t_0)としている。



図 3: 上段:エンコーダー B の測定データ(青色)と 信号の読み取り箇所(赤色)、下段:信号時刻の算出 方法

これにより信号を検出した時刻のリストができる ため、このリストから隣り合う信号同士の時間差(Δ*t* とする)を計算し、それが 1/128 回転に相当するこ とからその時刻での回転周波数は 1/128Δ*t* と計算で きる。これを回転開始時から終了時までについて行 なった結果、回転周波数の時間変化は図 4 のように なる。



図 4: 回転周波数の時間変化

3.2 周波数振動の周波数・駆動電流依存性

図4の一部を拡大すると図5のように、回転周波 数が振動していることが分かる。ここで赤色の線は 交流周波数から導いた指令の回転周波数を示してい る。この振動が回転安定性と関係していると考え、こ の振動の原因を探るために振動の周波数の回転周波 数依存性、駆動電流(交流の振幅)依存性を調べた。



図 5: 回転周波数の時間変化(0.5Hz付近を拡大)

図6は図5で見られた周波数の振動の周波数(「振動周波数」と呼ぶ)の回転周波数依存性と駆動電流

依存性をプロットして線形フィットしたものである。 回転周波数依存性については弱い依存性があるよう にも見えるが、ほぼ横ばいであり依存性はないと考 えることもできる。今後多くのデータを集めて誤差 付きでプロットすることなどにより詳細に考察する 必要がある。一方、駆動電流依存性については横軸 を電流の平方根にとることでかなり線形に近い依存 性が見られた。これは周波数の振動を単振動と見做 したとき、駆動電流の大きさがバネ定数に対応する と考えると理解できるものであり、今後この回転機 構におけるモデル構築を行うことでこの依存性の検 証を行う予定である。



図 6: 上段:振動周波数の回転周波数依存性、下段: 振動周波数の駆動電流依存性

Reference

Y.Sakurai et al., 2020, Proc. of SPIE, 11453 $114534\mathrm{E}$

R.Takaku et al., 2024, Proc. of SPIE

J.Hull 2020, Superconductor Science and Tech 13 R1

R.Akizawa et al., 2024, Proc. of SPIE

-index へ戻る

観測a19

CMB偏光観測のための低温光学測定系の開発

井澤 拓海

CMB 偏光観測のための低温光学測定系の開発

井澤 拓海 (東京大学大学院 理学研究科)

Abstract

現代宇宙論ではビッグバンと呼ばれる初期宇宙の状態から始まったことがわかっている。この描像を確立する 上で大きな役割を果たしたのが、特にビッグバンの残光である宇宙マイクロ波背景放射(Cosmic Microwave Background radiation = CMB)の詳細観測である。現在、現代宇宙論では解決できない問題を一挙に解 決すべく、初期宇宙にて指数的な膨張があったとするインフレーション仮説が提案されている。この仮説は CMB の偏光観測により検証が可能であり、この科学目的に特化した JAXA/ISAS の LiteBIRD 計画は ESA Planck 衛星計画後の世界唯一の次世代 CMB 観測衛星計画である。LiteBIRD 衛星に搭載予定の望遠鏡用偏 光変調器はサファイアを用いた半波長板 (Half-Wave Plate; 以下 HWP)を連続回転させることにより入射偏 波を変調する。微小偏波を観測するために、光学素子は冷却される必要があり結果として冷却環境でのミリ 波光学素子の評価が必須となる。しかし、実験室にて 5 K 程度でのミリ波光学測定を行う測定系は未だ構築 できていない。そこで今回は比較的簡単で安価に測定ができる液体窒素温度での測定を目指した。ミリ波を 通し、サンプルを保持することができる特別なクライオスタットを用意した。まずは常温で透過率を測定し た。その結果、透過率のデータにノイズのようなものがのることがわかった。そこで角度調整機器の内側と 外側に吸収体を貼り付けて透過率を測定したところ、大幅にノイズを抑えることができた。しかし、フィッ ト結果はサンプルのみのフィット結果と有意に異なりさらなる定在波の低減が求められる。

1 Introduction

CMB はあらゆる方向から到来する 2.725 K の黒体 放射である。したがって CMB のパワーは 10⁻¹¹ W とかなり弱い。そこで常温の半波長板を設置すると 半波長板からの熱放射で CMB がノイズに埋もれて しまう。したがって半波長板を低温に冷やす必要が ある。そこでどのくらい冷やせば良いのか判断材料 となるのがサンプルの誘電損失である。そこで我ら はサンプルの透過率を測定し、誘電損失をフィットか ら求めることにした。

LiteBIRD に搭載する半波長板はサファイアを用い る。しかし、複屈折材のサファイアは回転させると 透過率が変わるため測定系の構築のために使われる 光学素子としては向いていない。したがって今回は 複屈折材でなく、サファイアと同じ化学組成のアル ミナを用いる。

2 Methods/Instruments

低温で透過率の測定を実現させるために真空、低 温を維持する装置、クライオスタットを用いる (図 1)。ミリ波を通し、サンプルを保持することができ る特別な設計になっている。(図 2)。



図 1: クライオスタット

クライオスタットにはミリ波を通すための窓があ り、窓材には透過率が高く、大気圧に耐えられる zotefoam 社の PPA-30 を使用した。図 3 のようにセット アップを組み、G バンド (140-220 GHz) で透過率を 測定した。



図 2: 閉じている状態の角度調整機器



図 3: セットアップ

得られた透過率のデータをモデル式にフィットさせることによりフィットパラメータである屈折率と 誘電損失を求められる。

3 Results

最初にクライオスタットを置かずにサンプルのみ **4**の透過率を測定した。

フィットすると

図 5 となり、屈折率 $n = 3.1301 \pm 0.0009$ 、誘電損 失 $tan\delta = (2.59 \pm 0.02) \times 10^{-4}$ と求められた。これ が基準となる値である。クライオスタットにサンプ ルを設置した場合でも同じ値になることが望ましい。



図 4: サンプルの透過率



図 5: サンプルのフィット結果

次にクライオスタットにサンプルを載せた時の透 過率の測定結果を示す。

図 4 と見比べると図 6 はかなりノイズのようなも のがのっている。フィットすると

図 7 となり、屈折率 $n = 3.1301 \pm 0.0009$ 、誘電損 失 $tan\delta = (3.4 \pm 0.2) \times 10^{-4}$ と求められる。

1 Discussion

図6のようにノイズのようなものがのる原因はど こかで定在波が発生していると考えられる。定在波 が発生する要因はどこかでミリ波が反射しているこ とによるものだ。したがって私はクライオスタット の中にある角度調整機器まわりに定在波を吸収する 吸収体を貼り付けた。



図 6: クライオスタットにサンプルを載せた時の透 過率



図 7: クライオスタットにサンプルを載せた時のフィッ ト結果

吸収体を付けなかった場合、外側のみ付けた場合、 内側のみ付けた場合の透過率の結果を図9に示す。

図 9 より吸収体を角度調整機器の内側に付けると 定在波を大幅に抑えることができることがわかった。 吸収体を角度調整機器の内側につけた時のフィット結 果を図 10 に示す。フィットすることにより屈折率 n =3.1245±0.0009、誘電損失 $tan\delta = (3.41\pm0.06) \times 10^{-4}$ と求められる。

サンプルのみのフィット結果と角度調整機器に吸 収体をつけなかった時のフィット結果と角度調整機器 の内側に吸収体をつけた時のフィット結果、さらにそ れぞれのデータとフィット結果の root mean square ; RMS をまとめると表1となる。



図 8: 角度調整機器の外側と内側に吸収体を貼り付け た様子



図 9: 角度調整機器の外側と内側に吸収体を貼り付け た時の透過率



図 10: 角度調整機器の内側に吸収体を貼り付けた時 のフィット結果

| | サンプルのみ | クライオスタット (吸収体なし) | クライオスタット (内側吸収体あり) | |
|------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--|
| 屈折率 | 3.1301 ± 0.0009 | 3.1283 ± 0.0009 | 3.12544 ± 0.0009 | |
| 誘電損失 | $(2.59 \pm 0.02) \times 10^{-4}$ | $(3.4 \pm 0.2) \times 10^{-4}$ | $(3.41 \pm 0.06) \times 10^{-4}$ | |
| RMS | 0.007 | 0.051 | 0.012 | |

表 1: フィット結果

表1から分かるように吸収体ありのフィット結果 は吸収体無しと比べて RMS が小さくなったがサン プルのみのフィット結果と有意に異なることがわかっ た。したがってサンプルのみのフィット結果と同じ結 果を得るには RMS をさらに小さくする必要がある。

5 Conclusion

高精度観測を実現するための CMB 偏光望遠鏡で は、ミリ波光学素子が低温で使用されることが必須 である。したがってミリ波光学素子の低温性能評価 が可能となる透過率測定系の確立が必要である。今 回は光学素子試料の低温測定の準備としてクライオ スタット、窓材を用いて光学素子試料の透過率を常 温で測定した。角度調整機器の内側に吸収体を付け ることによって定在波を低減できることが実験的に 示すことができた。今後はさらなる定在波の低減が できるか検討する。 ——index へ戻る

観測a20

宇宙重力波望遠鏡におけるバックリンク干渉計の開発

大熊 悠介

宇宙重力波望遠鏡におけるバックリンク干渉計の開発

大熊 悠介 (東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻/ISAS)

Abstract

0.1 Hz~10 Hz 帯の重力波を観測することで中間質量ブラックホール連星合体などをとらえることができ ると期待されている。この周波数帯域でファブリペロ方式の宇宙重力波望遠鏡を実現するため、バックリン ク干渉計 (BLFPI)が提案されている。BLFPI は二基の独立なレーザーの干渉信号をとることで衛星軌道の 精密な制御を必要とせず、また干渉計各部の信号を組み合わせることで雑音の低減を行う。本研究は BLFPI の実験実証を行い、引き算法によって重力波信号が歪められないことを示す。現在までに BLFPI のテーブル トップ実験系に模擬重力波信号を注入する手法を開発し、実験系の設計を行った。今後実験系を構築し BLFPI の実証実験を行う。

1 Introduction

重力波は一般相対性理論により予言された、時空 のゆがみが波として伝搬する現象である。重力波の 放射源としてはブラックホールや中性子星などのコ ンパクト天体の合体、また超新星爆発やインフレー ションなどが挙げられる。これらの天体現象、宇宙 論現象はそれぞれ異なった周波数の重力波を放出す るため、各周波数帯域で重力波を観測する必要があ る。現在稼働している干渉計型の地上重力波望遠鏡は アメリカの LIGO(Aasi et al. 2015)、ヨーロッパの Virgo(Acernese et al. 2014)、日本の KAGRA(Aso et al. 2013) である。これらは 10 Hz~kHz 帯の重 力波に高い感度を持ち、1 M_☉~100 M_☉ のコンパク ト連星合体に伴う重力波を観測している。また nHz 帯の重力波はパルサータイミングアレイを用いて観 測され、2023年にはバックグラウンドとなる重力波 が検出されている (Agazie et al. 2023)。

現在 0.1 Hz~10 Hz 帯に高い感度を持つ宇宙重力 波望遠鏡 DECIGO(Kawamura et al. 2008)の開発 が進められている。この帯域では 100 M_{\odot} ~1000 M_{\odot} の中間質量ブラックホール連星合体による重力波な どの検出が予想される。中間質量ブラックホールは 超大質量ブラックホールの形成を通じて宇宙の構造 形成に影響すると考えられ、その観測が期待されて いる。

DECIGO は互いに 1,000 km 離れて編隊飛行する 三台の衛星からなり、これらの衛星がファブリペロ干 渉計を構成する。ファブリペロ干渉計にはレーザー 光を共振させることで重力波に対して高い感度を持 つという特徴がある。しかしながら 1,000 km もの衛 星間でレーザー光の共振を維持することが現在課題 となっている。これまでに衛星の軌道を精密に制御 することで共振を保つ手法が考案されているが、衛 星間の距離を数 10 nm の精度で精密に制御する必要 があり実現するのは容易ではない。そこで提案され たのがバックリンク干渉計 (BLFPI) である (Izumi & Fujimoto 2021)。BLFPI は一台の衛星に二基の レーザーを搭載し、レーザー周波数を制御すること でレーザー光の共振を維持する。これにより衛星軌 道の精密な制御が必要なくなる。一方で BLFPI は 異なるレーザーの干渉を取り重力波信号を得るため、 それぞれのレーザーの周波数雑音が重力波信号を汚 染してしまう。そのため二基のレーザー光の干渉信 号とそれぞれのレーザーを共振に制御するエラー信 号の三信号を取得し線形結合をとる (引き算法)。こ の操作によりレーザー周波数雑音を除去し重力波信 号を抽出することができる。

BLFPIを実現するために実証する必要がある機能 は大きく分けて二つある。引き算法を用いてレーザー 周波数雑音を除去する機能と、引き算法を用いた際 に重力波信号を歪めずに取得する機能である。レー ザー周波数雑音を除去する機能はテーブルトップ実 験で実証されている (Sugimoto et al. 2024)。一方で 重力波信号を歪めずに取得する機能はこれまでに実 験的に実証されたことがない。本研究が目標とする のは、BLFPIの重力波信号を歪めずに取得する機能 を実証することである。そのために BLFPI に模擬重 力波を注入する手法を開発した。また現在実験実証 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

に向けて実験系の構築を行っている。

2 BLFPIにおける引き算法

図1に BLFPI を用いた宇宙重力波望遠鏡の概念図 を示す。三台の宇宙機にそれぞれ二基のレーザーが 搭載され、各レーザーがそれぞれ一つのファブリペ ロ共振器で共振する。重力波が到来すると宇宙機間 の距離が変動し共振器の共振周波数も変動する。そ のため六つのレーザーの周波数をそれぞれの共振器 の共振周波数に制御し二つのレーザーの干渉信号を 取得することで、重力波信号を取得することができ る。また独立な二つのレーザーの干渉信号から取得 する重力波信号はレーザー周波数雑音に汚染されて いる。そのためレーザー周波数雑音を除去するため、 BLFPIでは二レーザーの干渉信号に加えてそれぞれ のレーザーの周波数を制御するエラー信号を取得す る。これら三つの信号と共振器の応答関数を用いて 線形結合をとることでレーザー周波数雑音を除去す ることができる (引き算法)。

図 2 に一機の宇宙機内の光学系の概念図を示す。 レーザー $j(j \in 1, 2)$ のエラー信号 y_j とレーザー 1、 2 の干渉信号 $\delta\nu_b$ は周波数空間でそれぞれ式 (1, 2) のように表せる。ここで S_j , G_j , ν_j , L_j , $\delta\nu_j$, δL_j はそれぞれ共振器 j の伝達関数 [V/rad]、レーザー j の周波数制御のオープンループ伝達関数、レーザー j の周波数、共振器 j の共振器長、レーザー j の周波 数雑音、共振器 j の共振器長変動を表す。

$$y_j = \frac{S_j}{1+G_j}\delta\nu_j + \frac{S_j}{1+G_j}\frac{\nu_j}{L_j}\delta L_j \qquad (1)$$

$$\delta\nu_{\rm b} = \frac{1}{1+G_1}\delta\nu_1 - \frac{G_1}{1+G_1}\frac{\nu_1}{L_1}\delta L_1 -\frac{1}{1+G_2}\delta\nu_2 + \frac{G_2}{1+G_2}\frac{\nu_2}{L_2}\delta L_2 \quad (2)$$

引き算法ではこれら三つの信号を用いて次のように 線形結合を取る。

$$\delta\nu_{\rm b} - \frac{y_1}{S_1} + \frac{y_2}{S_2} = -\frac{\nu_1}{L_1}\delta L_1 + \frac{\nu_2}{L_2}\delta L_2 \quad (3)$$
$$\simeq \nu \left(\frac{\delta L_2}{L_2} - \frac{\delta L_1}{L_1}\right) \quad (4)$$

式(4)より、引き算法を用いることで干渉信号から レーザー周波数雑音を除去し二つの共振器長の差動 変動を得られることが分かる。ただし最終行は二つ のレーザーの周波数が等しいと近似した。



図 2: 宇宙機内の光学系の概念図

BLFPIの実験実証としては主に次の二つの機能の 実証が求められる。引き算法によるレーザー周波数 雑音除去の機能と、引き算法により重力波信号を歪 めずに抽出する機能である。このうちレーザー周波 数雑音除去機能は (Sugimoto et al. 2024) により実 証された。本研究では引き算法により重力波信号が 歪められないことを実証する。BLFPIの引き算法に よって重力波信号が歪められないことを実証するた めに、重力波信号を模擬した信号を注入する必要が ある。



図 3: 重力波によるレーザー位相変動の概念図。重力 波によって共振器長が変動すると、反射レーザーの 位相が変動する。

3 補助レーザーによる重力波の模 擬

BLFPI に重力波が到来すると共振器長が変化し、 共振器からの反射レーザーの位相が変化する。この レーザーの位相変化を測定することで、重力波を検 出できる (図3)。本研究ではこの効果を模擬するため に共振器に追加で補助レーザーを注入し、補助レー ザーの位相を変化させる。これによっても共振器か ら反射するレーザーの位相が変化するので、重力波 信号を模擬することができる (図4)。

また、補助レーザーの位相変動の効果を最大化する ために補助レーザーの位相を共振器内の主レーザー の位相と合わせる必要がある。このために主、補助 レーザーの位相差を測定して補助レーザーの位相が完全 制御する。主レーザーと補助レーザーの位相が完全 に一致しているときの、補助レーザーの位相が完全 に一致しているときの、補助レーザーの位相変動に 対する BLFPI の応答を図5 に示す。同図中の重力波 に対する応答と比べて概ね同じ応答をしていること が分かる。細かく見ると 10 kHz 付近で異なる振る 舞いをしてしまっているが、本研究では問題となら ない。なぜならば本研究で目指すのは引き算法で重 力波信号が歪められないことを実証することであり、 問題となるのは引き算法前後の信号の変化であるた めだ。

4 実験セットアップ

本研究では図6に示すような模擬重力波を注入でき る BLFPI を実験室に構築する。本実験では 1064 nm の波長のレーザーを二基用いる。レーザー1 は出射



図 4: 補助レーザーによるレーザー位相変動の概念 図。共振器に追加で注入する補助レーザーの位相を 変動させると、反射レーザーの実効的な位相が変動 する。



図 5: 重力波に対する応答と模擬重力波に対する応 答。青線で示した重力波に対する応答と比較して、橙 色で示した模擬重力波に対する応答は 10 kHz 付近 以外では概ね同じ振る舞いをする。

後偏光依存の無いビームスプリッタ (NPBS) を用い て二つに分けられ、一方はレーザー2と干渉をとる。 NPBS で分けられた他方は EOM を通過し20 MHzの 周波数変調を受ける。EOM 通過後に S 偏光成分 (主 レーザー) は PBS を通して共振器に導入され、PDH 法 (Drever et al. 1983) を用いてレーザー周波数を 制御することで共振状態に保たれる。また P 偏光成 分 (補助レーザー) は共振器の反対側から共振器に導 入される。この際、共振器を透過してきた主レーザー と共振器で反射した補助レーザーの干渉をとる。こ の干渉信号を用いて補助レーザーの光路長を制御する。模 擬重力波の注入は補助レーザーの光路長を変動させ 位相を変えることによって行うことができる。レー ザー2 は出射後 NPBS を用いて二つに分けられ、一



図 6: 実験系の概念図

方はレーザー1と干渉を取り他方は共振器に導入さ れ PDH 法を用いて共振状態に保たれる。レーザー 1、2 の干渉信号は Phase locked loop と Delay line を用いて読み出す。

二つの共振器の共振器長は約 46 cm であり、cavity pole はそれぞれ約 5.6 kHz と 13 kHz である。各レー ザーを共振状態に保ったままレーザー 1、2 の干渉信 号 ν_b とレーザー 1、2 を共振状態に制御するエラー 信号 y_j をそれぞれデータロガーを用いて取得する。 データ取得後にこれら三つの信号を用いて引き算法 を行う。

5 Conclusion

本研究は将来のファブリペロ方式を用いた宇宙重 力波望遠鏡の実現を目指した地上実証実験である。 ファブリペロ方式の一方式である BLFPI は重力波 への感度と技術的な実現性を両立させた新手法であ り、実験実証が求められている。本研究では BLFPI の主要な機能である引き算法を用いたときに重力波 信号が歪められないことを実証する。実証に向けて 補助レーザーを用いて重力波を模擬する手法を開発 し、テーブルトップ実験でこの手法を用いた実験を 行うため光学系の設計を行った。今後は実際に光学 系の構築を行い BLFPI の機能実証を完了する。

Reference

Kawamura, S., Ando, M., Nakamura, T., Tsubono, K., Tanaka, T., Funaki, I., ... & Yoshino, T. 2008, Journal of Physics

- Agazie, G., Anumarlapudi, A., Archibald, A. M., Arzoumanian, Z., Baker, P. T., Bécsy, B., ... & NANOGrav Collaboration. 2023, The Astrophysical Journal Letters
- Aso, Y., Michimura, Y., Somiya, K., Ando, M., Miyakawa, O., Sekiguchi, T., ... & KAGRA Collaboration). 2013, Physical Review D
- Acernese, F., Agathos, M., Agatsuma, K., Aisa, D., Allemandou, N., Allocca, A., ... & Meidam, J. 2014, Classical and Quantum Gravity
- Aasi, J., Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T., Abernathy, M. R., Ackley, K., ... & DeSalvo, R. 2015, Classical and quantum gravity
- Drever, R. W., Hall, J. L., Kowalski, F. V., Hough, J., Ford, G. M., Munley, A. J., & Ward, H. 1983, Applied Physics B
- Izumi Kiwamu & Masa-Katsu Fujimoto 2021, Progress of Theoretical and Experimental Physics
- Sugimoto Ryosuke, Okuma Yusuke, Nagano Koji, Komori Kentaro & Izumi Kiwamu 2024, Physical Review D

——index へ戻る

観測a21

トモグラフィー補償光学における波面推定の開発に向 けた波面再構成手法の検討

田邊 ひより

トモグラフィー補償光学における波面推定の開発に向けた波面再構成手法 の検討

田邊 ひより (東北大学大学院 理学研究科)

Abstract

補償光学は地球大気を通ることで乱れた光の波面を観測し、可変形鏡などを用いて波面を補正することで地 上望遠鏡による観測の空間分解能を向上させる光学技術のことである。その際レーザーガイド星(LGS)な どを用いて波面の乱れを測定するが、1つの LGS のみを使用する場合は無限遠にある天体と有限の高さに ある LGS の通る光路が異なることにより補正の精度を減少させるコーン効果が生じる。これを改善するた めに考案されたのが LTAO(Laser Tomography Adaptive Optics) であり、4つの LGS を用いて通る光路 の差を埋め、トモグラフィー推定法を使用し波面乱れを推定することでコーン効果を軽減することができる。 このトモグラフィーを行うには、波面センサーで測定したスポットの位置ずれから波面の再構成を行うこと になる。その際逆問題を解く必要があるが、同時に波面上でワッフルのような模様が生じる waffle-mode が 擬似的に現れることには注意が必要である。これを踏まえた上での逆問題の解き方は2通り存在する。1つ 目は waffle-mode を抑制するフィルターを付け加えた上で最小二乗法や特異値分解を用いて逆問題を解く方 法であり、2つ目は最小分散推定を用いて大気モデルやノイズの統計性質を計算に含むことでフィルターを 付け加えることなく逆問題を解く方法である。本研究では、すばる望遠鏡においてシャックハルトマン波面 センサーを用いて観測したデータを使用し、位相構造関数を用いることで再構成する際の手法を比較評価し た。地球大気は Kolmogorov の大気モデルに従うことが期待されており、この時の位相構造関数の傾きの理 論値は 1.667 となる。この値に対して再構成手法の比較を行なった結果、最小二乗法と特異値分解でラプラ スフィルターを作用させた時の傾きが 1.753 となり最も近い値を取った。また手法の比較に加えて模擬光源 系に位相板を取り付けて測定を行うことで、観測結果が Kolmogorov の大気モデルに従うかの確認も行う。 これらの結果を踏まえて最適な波面の再構成手法について考察をする。

1 背景と研究目的

補償光学とは地球大気の乱れを波面センサーで検 出し、可変形鏡などを用いて波面を補正することで地 上望遠鏡の観測精度を向上させる光学技術のことで ある。その中でも Laser Tomography Adaptive Optics(LTAO) は大気補正の指標となるレーザーガイド 星 (LGS)を複数用いることでターゲット天体と LGS の通る光路が異なることに起因するコーン効果を軽 減させ、観測精度を向上させることができる。この LTAO を行う際には各高度に対応した波面を再構成 し重ね合わせることで波面の推定を行う。

波面の再構成には Shack-Hartmann 波面センサー を使用する。これは小さなレンズが並んだレンズレッ トに波面が入射した時に像が重心からどれくらいず れているかを測定でき、Fried-Geometry の関係を用 いて波面の傾きを得ることができる (図1参照)。



図 1: 左は Shack-Hartmann 波面センサーにおける 重心位置からのずれ、右は Fried-Geometry の関係。 この時スポットの重心位置からのずれ s_x, s_y と位相 点 $w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}$ の関係式は $s_x = \frac{1}{2}(w_{11} - w_{12} + w_{21} - w_{22}), s_y = \frac{1}{2}(w_{11} - w_{21} + w_{12} - w_{22})$ となる。

スポット全体で傾きと位相点を結びつける関係式 を $\vec{s} = G\vec{w}$ とする。波面を再構成するためにはこの 逆問題を解くことが必要となる。逆問題の解き方に は複数の方法があるため、本研究はそれぞれの方法 を比較して波面を再構成するのに最適な方法を提案 することを目的に行った。

2 研究手法

2.1 逆問題の解き方

本研究で使用した逆問題の解法は2通りである。

まず1つ目が最小二乗法 (LSM) である。最小二乗 法は測定された波面のずれsと推定された波面のず れ \hat{s} の差の絶対値の二乗平均 < $|s - \hat{s}|^2$ > が最小にな るような $\vec{w} = (G^T G)^{-1} G^T \vec{s}$ を求める。

2つ目が特異値分解 (SVD) である。特異値分解は 解きたい行列を $G = U\Sigma^{-1}V^T$ と3つの行列に分解 することで $\vec{w} = V\Sigma^{-1}U^T\vec{s}$ を求める。このとき、 Σ 中の著しく小さい成分を取り除くことで解にノイズ 成分が乗ることを抑えることができる。

しかし上記の方法を用いて波面の再構成を行うと ワッフルのような模様が生じる Waffle-mode が現れ る (図 2 参照)。これは Fried-Geometry では Wafflemode の原因となるモードに制限をつけることがで きないことが原因であり、Waffle-mode を改善する ためには追加の条件式が必要となる。



図 2: Waffle-mode が生じている波面。大気の位相ず れに加えてでこぼこした模様が生じている。

Waffle-modeの改善方法は3通り存在する。

まず1つ目は01の重みづけを行うことである。これは値の低い点と高い点それぞれの平均値を0とすることで波面の平坦化を行う方法である。

2つ目はラプラスフィルターである。これは隣接す る5点に対して、中心の点の重みづけを4、その他 の点の重みづけを-1とすることで値が高くなってい る点を滑らかにする方法である。

3 つ目は最小分散推定 (MVR) である。これは解やノイズの統計的性質を計算に含め、 $\min_{R} < ||\hat{w} - w||^{2} >$ のような解を求めることができ

る (\hat{w} :推定した波面の位相、w:実際の波面の位 相)。ノイズが Gaussian noise であることや大気が Kolmogorov のモデルに従うことを適用し、共分散 行列をラプラスフィルターで近似することで逆問題 を解くと $\vec{w} = (G^T G + \sigma^2 L^T L)^{-1} G^T \vec{s}$ と求めること ができる (L:ラプラスフィルター, σ :測定誤差)。 なお、今回の観測では測定誤差について直接測定し ていなかったため、最小分散推定で求めた \vec{w} に対し て G を作用させて得られる推定量 $\hat{s'}$ と観測量 s の 差の絶対値の二乗平均 < $||s - \hat{s'}||^2$ >を測定誤差 σ^2 とする。

2.2 ラプラスフィルターと最小分散推定の 関係

ラプラスフィルターと最小分散推定の関係につい て、行列の形から考察を行う。

G にラプラスフィルターを加えた行列を G_L とすると、今回解く行列 $\vec{s} = G_L \vec{w}$ について、

$$\begin{pmatrix} \vec{s} \\ \vec{s_0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G \\ aL \end{pmatrix} \vec{w}$$

と上下に分けて考える。

(a:任意の定数、*s*₀:0ベクトル)

この行列を最小二乗法で解くと、

 $\vec{w} = (G^T G + a^2 L^T L)^{-1} G^T \vec{s} + (G^T G + a^2 L^T L)^{-1} L^T \vec{s_0}$

ここで $\vec{s_0}$ は 0 ベクトルなので第 2 項は $\vec{0}$ となり、 $\vec{w} = (G^T G + a^2 L^T L)^{-1} G^T \vec{s}$

よって最小分散推定の形と一致する (表1参照)。

表 1: ラプラスフィルターと最小分散推定の比較

| · · - · · · · · · · | |
|---------------------|---|
| Laplace filter | $\vec{w} = (G^T G + a^2 L^T L)^{-1} G^T \vec{s}$ |
| MVR | $\vec{w} = (G^T G + \sigma^2 L^T L)^{-1} G^T \vec{s}$ |

このことから、最小分散推定は測定誤差から重み づけを評価し、ラプラスフィルターは任意に重みづ けを変化させられることが分かる。

2.3 再構成手法の評価方法

再構成手法の評価方法として、本研究では位相構 造関数を使用する。位相構造関数は乱流など定常で ないランダムな関数を記述するのに使われ、

 $D_{\phi}(r) = < \|\phi(x+r) - \phi(x)\|^2 >$

と表すことができる ($\phi(x)$: 位相)。

Kolmogorov の大気モデルの時の位相構造関数は、 $D_{\phi}(r) = 2.914 k^2 C_N^2 \delta h r^{5/3} \propto r^{5/3}$

となり、位相構造関数の近似曲線の距離依存性を理論 と比較することで再構成手法を定量的に評価できる。

2.4 シミュレーション時の構造関数の傾き

シミュレーションの設定は表2の通りである。な お大気ゆらぎの強度分布は0.7546,0.0497,0.0141, 0.0133,0.00545,0.0467,0.0671である。

| シミュレーションコード | OOMAO |
|-----------------|--------------------------------------|
| 望遠鏡口径 | 7.92m |
| 大気レイヤーの数 | 7 |
| レイヤーの高さ成分 | $0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16 \mathrm{km}$ |
| フリード長 | 14.9cm |
| Outer scale の長さ | 30m |
| 解像度 | 32×32 |
| | |

表 2: シミュレーションの設定

表2のような設定のシミュレーションで作成した 波面の位相構造関数の近似曲線を求めた結果、傾き は1.400となった。よって解像度が 32 × 32 の時は Kolmogorovの大気モデルを適用した時の傾きと一 致しないことが分かる。これは解像度が小さいとセ ル内で値が平均化されてしまうことが原因であると 考えられるため、本研究では Kolmogorovの大気モ デルに従う時の構造関数の近似曲線の傾きの理論値 を1.400とする。

2.5 使用したデータ

本研究で使用したデータは表3のようになっている。

3 結果

観測データを再構成した時における位相構造関数 の近似曲線の傾きの平均と理論値との差は表4のよ うになった。

| 表 | 3. | 観測 デー | タ |
|----|----|----------|---|
| 11 | J. | モガ (只) ノ | ~ |

| 観測日時 | 2022年11月10日 |
|---------|----------------|
| 観測場所 | すばる望遠鏡 |
| 観測対象 | Altair |
| 観測波長 | V バンド |
| レンズレット数 | 32×32 |
| フレームレート | 400Hz |
| データサイズ | 22123 |

表 4: 位相構造関数の近似曲線の傾きの平均と理論値 との差

| 解析手法 | 平均 | 理論値との差 |
|--------------------|-------|--------|
| 理論値 | 1.400 | |
| LSM+ 改善なし | 0.636 | 0.764 |
| LSM+01 の重みづけ | 0.636 | 0.764 |
| LSM+Laplace filter | 1.840 | 0.440 |
| SVD+ 改善なし | 0.636 | 0.764 |
| SVD+01 の重みづけ | 0.636 | 0.764 |
| SVD+Laplace filter | 1.840 | 0.440 |
| 最小分散推定 | 1.366 | 0.034 |

また、最小分散推定を用いて再構成を行った時と、 01の重みづけを行い最小二乗法用いて再構成を行っ た時の構造関数の概形は図3のようになった。



図 3: 左は最小分散推定、右は 01 の重みづけで最小 二乗法を用いて再構成を行い求めた位相構造関数の 概形。赤線は近似曲線を表している。

その結果、位相構造関数の近似曲線の傾きは、 Waffle-mode を改善しなかった時と 01 の重みづけ をした時は 0.636、ラプラスフィルターを作用させた 時は 1.840、最小分散推定の時は 1.366 となった。

最小二乗法と特異値分解をした時の傾きを比較す ると、Waffle-mode をどの方法で改善を行なっても 傾きが等しくなっていることが分かる。

また図3を見ると、01の重みづけをした時は位相

構造関数が2つに分かれていることが分かる。

加えて、傾きは最小分散推定を作用させた時が最 も理論値に近くなることが分かる。

4 議論

結果よりどの再構成手法が最適な波面再構成か考 察を行う。

まず、最小二乗法と特異値分解の傾きの比較や01 の重みづけを行った時の位相構造関数の概形の比較 から、どちらの方法で解いても結果がほとんど変わ らないことが分かる。したがって、逆問題はどちら の方法で解いても良い。なお、特異値分解において 結果はどこで特異値を切るかに依存することに注意 が必要である(今回のように著しく小さい特異値の みを切るような値を選べば結果に影響しない)。

また、01 の重みづけを加えた時の傾きに着目する と、01 の重みづけを行った時と Waffle-mode の改善 行列を加えた時の傾きは全く同一であり、01 の重み づけをした時の位相構造関数の概形では関数が2つに 分かれていることが分かる。これはどちらも Wafflemode の改善が行われていないことを示しており、01 の重みづけだと Waffle-mode の改善を行うことがで きないことが分かる。

加えて、近似曲線の傾きは最小分散推定を作用さ せた時が最も理論値に近くなることから、最小分散 推定が最適な波面再構成手法であることが分かる。

5 実験室データの解析

最小分散推定が最適な再構成手法かどうか確かめ るために、模擬光源系を用いて同様の測定を行った。 模擬光源系を用いた測定においては Kolmogorov の 大気モデルに従う位相板を用いており、スパイダー や副鏡の影を再現したマスクをつけた時と外した時 の2通りで測定した。

模擬光源系はドーム内の Kolmogorov に従わない 乱流などの影響を受けないため、より理想的な条件 で測定を行うことができる。

模擬光源系に位相板を取り付けて測定を行った時 のデータは表5のようになっている。なお、今回の 測定においては模擬光源としてハロゲン光源と拡散 光を使用している。

表 5: 模擬光源系における実験データ

| 観測日時 | 2024年2月24日 | |
|---------|----------------|--|
| 観測場所 | ハワイ観測所実験室 | |
| 観測対象 | 模擬光源 | |
| レンズレット数 | 32×32 | |

模擬光源系データを再構成したときにおける位相 構造関数の近似曲線の傾きは 表6のようになった。

表 6: 模擬光源系における位相構造関数の近似曲線の 傾き

| 解析手法 | マスクなし | マスクあり |
|--------------------|-------|-------|
| LSM+ 改善なし | 1.223 | 0.605 |
| LSM+01 の重みづけ | 1.223 | 0.624 |
| LSM+Laplace filter | 1.666 | 1.723 |
| SVD+ 改善なし | 1.223 | 0.624 |
| SVD+01 の重みづけ | 1.223 | 0.624 |
| SVD+Laplace filter | 1.666 | 1.723 |
| 最小分散推定 | 1.322 | 1.219 |

ラプラスフィルターと最小分散推定の傾きを比較 すると、マスクがある時とない時のどちらも最小分 散推定の方が理論値に近くなっていることが分かる。

したがって、実験室データからも最小分散推定を 用いた時が最適な波面再構成手法であると結論づけ ることができる。

6 結論と今後の展望

波面の逆問題を7通りの方法で解いた結果、波面は 最小二乗法か特異値分解のどちらで解くかによらな いことが分かった。また、01の重みづけでは Wafflemode を改善することができないことが分かった。

観測データと Kolmogorov の大気モデルに従う実 験室データを用いて位相構造関数の近似曲線の傾き を求めると、最小分散推定が最適な波面再構成手法 であると結論づけることができた。

また、今回は誤差の測定を行っていなかったため、 誤差推定の精度について検討する必要がある。また、 実験室のデータより、マスクをつけた時と外した時 の位相構造関数の傾きが異なったことから、波面の 再構成を行う際の副鏡やスパイダーの影の影響につ いて評価する必要がある。
--index へ戻る

観測a22

赤外全天雲モニタの開発

小嶋 拓斗

赤外全天雲モニタの開発

小嶋 拓斗 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

天文学の研究で望まれている「望遠鏡を用いた天体観測の完全自動化」には、雲の監視が必要不可欠であ る。京都大学の保有するせいめい望遠鏡では人が目視で天候を判断するのに可視光の雲モニタを使用してい るが、これは雲の監視に適していないため、雲の監視に適した中間赤外線の雲モニタ導入が望まれる。しか し、従来の赤外全天雲モニタは高価なゲルマニウムの魚眼レンズを用いたり、あるいは全天をカバーできな いなどの欠点を抱えていた。本研究ではこれら欠点を克服した雲モニタの開発を進めている。採用した方式 は、複数の廉価な市販の赤外カメラの画像を統合し、全天をカバーするというものである。

まず、試作機としてカメラ1つを制御し一枚の画像を読み出して web ページに表示する 1ch. システムを開発した。次に、この試作機を用いてカメラの歪曲を測定し、正確な視野形状と、画像の統合に必要な歪曲の 補正量を得た。この結果をもとに、カメラ12 個で全天をカバーする配置を設計した。高額な Ge 製の光学窓 のサイズを抑えつつ気密する方法としては金属製の「窓枠」に Ge 窓を接着する方法を検討しており、天文台 のある岡山の気温条件下で接着剤が 10 年間耐用することを加速試験と温度サイクル試験によって確認した。 現在は 1 個のマイコンで 6 個のカメラを制御する 6ch. システムの開発、筐体構造・カメラの固定構造・気 密構造の設計を進めている。

今後は残りの開発、装置の評価、雲の検出方法の確立を行う。

1 Introduction

1.1 背景

京都大学の保有するせいめい望遠鏡で実現しよう としている自動観測には雲量の定量的な評価が不可 欠である。現在せいめい望遠鏡では人が目視で天候 を判断するのに可視カメラが用いられている。しか し、可視光では雲は街明かりの反射で光っていて、街 の明るさや月光の散乱の影響を受けるため雲の監視 に適切でない。一方、雲は熱放射で光っていて、中 間赤外カメラを使うことで定量的な評価が可能であ る。以上の理由から、雲量の定量的な評価ができる 中間赤外カメラを用いた全天雲モニタの導入が望ま れている。

1.2 課題

従来の赤外全天雲モニタには3つのタイプがある。 一つ目のタイプはゲルマニウムの魚眼レンズを用 いるタイプである。赤外線はガラスを透過しないた め、ゲルマニウムが光学材料として使われる。高価 で加工が難しいゲルマニウムを使った魚眼レンズは 非常に高価になるため、この方式の導入は現実的で ない。

二つ目は2枚の鏡と狭視野カメラを組み合わせて 全天を撮るタイプである。これはカセグレン望遠鏡 の様に配置した2枚の鏡で全天の光を狭視野の赤外 カメラに集めるという仕組みで、Geの魚眼レンズを 使わないためコストが抑えられる。しかしこの方式 では天頂と支柱部分に遮蔽ができてしまう。

三つ目は富士山型の鏡と狭視野カメラを組み合わ せて全天を撮るタイプである。低空からの光は視野 中心部に入り、天頂からの光は視野端に入るように なっていて、天頂に遮蔽ができないというメリット がある。しかしこの方法では低空にいくほど分解能 が低くなる。導入したい雲モニタは自動観測に使う 都合上空間分解能がどの方向でも一様であることが 望ましく、低空の分解能が低いこのタイプは適して いない。また、特殊形状の鏡が高価で、導入が困難 である。

せいめい望遠鏡に導入する赤外全天雲モニタはこ れらの課題を克服している必要がある。

方法 $\mathbf{2}$

低コストで遮蔽がなく、空間分解能が全視野で一 様となる赤外全天雲モニタ開発を目指すにあたり、狭 視野の廉価な赤外カメラを並べる方式を研究してい る。使用したカメラは、FLIR 社の Lepton3.5 で、こ れは2万5千円ほどの廉価な市販の赤外カメラであ る。波長帯域は 8-14 µm で、雲の熱放射に感度があ る。このようなカメラを複数マイコンに繋ぎ、マイ コンでカメラ制御・画像読み出しを行う。読み出し た画像は無線で PC にアップロードし、PC は集約さ れた画像を一枚の全天画像に統合する。

開発・実験 3

必要な開発・実験の工程は大きく分けて次のとお りである。

- 電気回路の設計・製作、 組み込みソフトウェアの開発
 - 1ch. システム開発
 - 6ch. システム開発
- カメラの歪曲収差の測定実験
- 設計
 - カメラ配置
 - 筐体
 - カメラ固定、気密構造
- 画像制作ソフトの制作

これらのうち今まで1ch.システム開発、歪曲収差 の測定、カメラ配置設計を完了した。また、カメラ 固定、気密構造の設計にあたり Ge の窓と金属製の 「窓枠」の接着を評価する実験を行った。以下、これ らの開発や実験の詳細を報告する。

1ch. システム開発 3.1

Lepton3.5 はそれ単体では機能しないため、カメ ラ制御用のプログラムをマイコンに書き込む「組み 込み開発」が必要になる。そこで、まずは1個のマ 角に渡って一定の角度ごとに熱源を撮影した。 イコンで1個のカメラを制御しWi-Fiを通じて一枚

の画像を PC にアップロードするという最低限の機 能を持たせた「1ch.システム」を開発した。マイコ ン、カメラ、電源などを組み込んだ基盤の回路設計 を行い、図1のように実装した。また、Lepton3.5を 制御するためのソフトウェアを開発した。開発した 1ch. システムは機能した。



図 1: 開発した 1ch. システム

3.2 カメラの歪曲収差の測定実験

3.2.1 目的

実験の目的は、以下の二つである。一つ目は、全 天をカバーするカメラ配置の設計に必要な、正確な 視野形状把握のためである。二つ目は、複数の画像 を一つの全天画像に統合するソフトウェアの歪曲補 正量把握のためである。

3.2.2 方法

ハンドルで角度の微調整ができる回転ステージに カメラをおき、3m離れた位置に熱源を置いた(図2)。



図 2: 実験を真上から見た模式図

このセッティングで、カメラを回転させて全視野

歪曲は、

歪曲 = 実像高 – 理想像高 理想像高

より求められる。

理想像高はレンズが理想的で歪曲がないと仮定し た時の像の高さであり、カメラの角度により求めら れる。実像高は実際の像の高さであり、撮影した画 像上の熱源のスポット重心の画像中心からの距離に より求められる。

3.2.3 結果

実験で得られた各点での歪曲から、図3のグリッド マップが得られた。このグリッドマップは仮に Lepton3.5 で方眼紙状の熱源を撮影した場合、歪曲なし であれば黒い点線のように映るところ、歪曲により 赤い実線のように映ることを表す。



図 3: 歪曲より作成したグリッドマップ

このように、正確な視野形状と必要な歪曲の補正 量が得られた。

3.3 カメラ配置設計

測定した歪曲収差により得られたカメラの視野形 状に基づいた 3D モデルを製作した (図 4)。このモデ ルを組み合わせて全天を収めるカメラ配置を探った。 全天がカバーできる配置では紫色の半球が出来上が る。どのカメラにも映らない領域があるとその部分 は黄色く見える。この方法により図 5 のようにカメ ラ 12 個で全天をカバーする配置を設計した。

3.4 Ge 窓と窓枠の接着の評価実験

3.4.1 目的

カメラや電気回路基板が野晒しにならないように するため、装置には Ge 製の光学窓が必要となる。Ge



図 4: 視野の 3D モデル



図 5: 全天をカバーするカメラ配置

窓は高額かつサイズに値段が依存するため、このサ イズを抑えることが重要となる。また、水や湿気が 侵入しないようにするため、窓の固定部分には気密 性が求められる。気密にOリングを使う場合は必要 な窓のサイズが大きくなるため、Ge 窓と「窓枠」を 接着することで気密・窓の固定を行うことを検討し ている。

そこで、接着が使用年数 (10 年) 分保つのかを実験 により確かめた。接着剤の劣化を評価する「加速試 験」と、温度変化で接着が剥がれないかを確かめる 「温度サイクル試験」の二種類の実験を行った。

接着剤は変性シリコーン系を用い、アルミニウム 板に穴を開けたものと Ge 窓の反射防止コーティン グ面を接着した (以下、これをサンプルと呼ぶことに する)。

3.4.2 方法:加速試験

温度が10℃変わるごとに寿命が2倍変わるという 経験則である「10℃2倍則」と天文台のある岡山の 気象データに基づき、セッティングは80℃で172時 間とした。サンプルは密封容器にいれ、80℃の湯に 入れて保温した。

3.4.3 方法:温度サイクル試験

恒温槽 (IN804) に入れ、サンプルを温度変化させ カメラや電気回路基板が野晒しにならないように た。低温側サイクルを 0-10 ℃、高温側サイクルを 301年分の温度変化とし、これを10年分行った。

3.4.4 結果

ボールペンのノック部分を使い、バネばかりの要 領で力を加える簡易的な試験により評価した。2.7N で20秒間、接着を剥がす向きに力を加えて接着力が 保たれているかを確かめた。

加速試験、温度サイクル試験ともに接着力が保た れ、10年間耐用することがわかった。

3.5 実施中の開発

3.5.1 6ch. システム

カメラ12個を一つの装置にまとめ望遠鏡の近くに 設置してしまうと、望遠鏡のドームによって遮蔽が できてしまう。そのため、1個のマイコンで6個の カメラを制御する「6ch.システム」を2セット作り、 ドームを挟むように設置することで遮蔽を避けるこ とにした。

1ch. システムの回路やソフトウェアをベースに 6ch. システムを開発した。このシステムは機能し、6枚の 画像を得ることができた (図 6)。

現在は、実際にプリント基板を作るために画像読 み出しの安定化に必要な条件を調査している。



図 6: 6ch. システムで得た画像

3.5.2 構造設計

カメラの固定方法としては、「窓枠」に窓とカメラ を固定したものを、穴を開けた球殻状の筐体に固定 する方法を検討している (図 7)。この方法であれば シンプルな穴あけ加工のみでほとんど筐体を製作で

40 ℃とし、それぞれのサイクルを183 回行うことで きる。またカメラと窓を近づけやすいため窓のサイ ズを抑えられる。

> 窓枠に関しては、Ge 窓と窓枠の接着が可能であ ることがわかったため、それを前提に設計を進めて いる。





4 **今後の展望**

今後は 6ch. システムのプリント基板の設計、装置 内の温度・湿度の調整方法の検討、画像統合ソフト ウェアの開発を行う。また、開発完了後は装置の性 能評価や雲の検出方法の確立を行う。

5 まとめ

せいめい望遠鏡での自動観測のために、低コスト で光学的欠点のない赤外全天雲モニタの開発に着手 した。1ch.システムを開発し、実際に機能すること を確認した。カメラの歪曲収差を測定し、正確な視野 形状と必要な歪曲補正量を得た。視野形状のデータ を用い、12個で全天をカバーするカメラ配置を設計 した。加速試験、温度サイクル試験により、Ge 窓と 窓枠の接着が10年間耐用することを確認した。6ch. システムの開発と構造設計を実施中であり、今後は 残りの開発や装置の性能評価、雲の検出方法の確立 を行なっていく。

-index へ戻る

観測a23

Lobster Eye Optics を用いた広視野光学系のアライメ ント実証

安藤 慶之

Lobster Eye Optics を用いた広視野光学系のアライメント実証

安藤 慶之 (金沢大学大学院 自然科学研究科)

Abstract

HiZ-GUNDAM は、宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト (GRB) を高感度の広視野 X 線モニター により観測する人工衛星である。これによって観測された GRB から初期宇宙や重力波源の探索を行う。HiZ-GUNDAM に搭載する広視野 X 線モニターには、Lobster Eye Optics (LEO) と呼ばれるガラス製の X 線 光学系と 2 次元イメージセンサを用いたシステムが検討されている。この検出器は、0.4-4.0 keV の軟 X 線 帯域において、約 0.6 ステラジアンの視野を 10⁻¹⁰ erg/cm²/s (100 秒間露光) の感度で監視し、入射 X 線 の到来方向を目標精度 <3 arcmin で決定する。広視野 X 線モニターは、9 枚の LEO で 1 台の検出器を 構成し、合計 16 台の検出器を配列することで目標視野を実現する。しかし、LEO には製造時に生じた焦点 距離のばらつきが存在するため、個々の素子のアラインメント調整が必要となる。本研究では、広視野 X モ ニターのプロトタイプとなる光学フレームを用いて、複数の LEO で結像位置が合うように LEO の位置を 調整し、そのアライメントの再現性の確認・検証を行なった。また、X 線ビームの平行度が高い宇宙研の 30 m X 線ビームラインを用いて、アライメント評価後の結像性能や角度応答の評価を行った。本発表では、広 視野 X 線モニターの試作フレームを用いて、LEO のアライメント実証を行った結果を報告する。

1 導入

ガンマ線バースト (GRB) は 10^{52-54} erg のエネル ギーを数秒間のうちに放出する宇宙最大の爆発現象 である。非常に明るく、高赤方偏移の GRB も多数発 見されているため、GRB を用いた初代星の探査や、 GRB を背景光とした初期宇宙環境の調査が可能にな る。HiZ-GUNDAMは、このGRBを観測して初期宇 宙や重力波源の探査を目的とした人工衛星である。搭 載する広視野 X 線モニターには Lobster Eye Optics (LEO) と呼ばれるガラス製の X 線光学系と 2 次元 イメージセンサを用いたシステムが検討されている。 この検出器は、0.4-4.0 keV の軟 X 線 帯域において、 約 0.6 ステラジアンの視野を 110⁻¹⁰erg/cm²/s (100 秒間露光)の感度で監視し、入射 X 線の到来方向を 目標精度 <3 arcmin で決定する。広視野 X 線モニ ターは、9枚の LEO で1台の検出器を構成し、合 計 16 台の検出器を配列することで目標視野を実現 する。1 枚の LEO の構造は 40 μm × 40 μm の四面 を反射鏡で囲まれたマイクロポアが約 10¹⁶ 個で構 成されており、マイクロポアにX軸かY軸方向の内 壁で一回反射するとX軸、Y軸に集光し、X、Y軸 で一回ずつ反射すると十字の中心に集光して十字の 像を形成するメカニズムを持っている。この性質に より、複数の LEO を球面上に配置することで広視野

の実現を目的としている。X 線の到達方向は、この 十字の像の中心位置から求めることができる。しか し、LEO には製造時に生じた焦点距離のばらつきが 存在するため、個々の LEO のアラインメント調整が 必要となる。本研究では、この広視野 X モニターの プロトタイプとなる光学フレームを用いて、複数枚 の LEO のアライメント技術の検証を行い、X 線結 像試験と熱真空試験、振動試験を行う。また、X 線 ビームの平行度が高い宇宙研の 30 m X 線ビームラ インを用いて、アライメント評価後の結像性能や角 度応答の評価を行った。



図 1: 左:LEO と右: 拡大図



図 2: LEO の集光メカニズム

2 手法

試験目的は、Photonis 社製の LEO の並行光源に対 する結像性能(焦点距離、角度応答)、金沢 5m ビー ムラインで調整された 2 枚の LEO のアライメント精 度、2 枚の LEO にまたがる角度応答・有効面積を調 査することである。

(1)LEO#19の焦点距離をdxステージを移動させて、
 焦点距離を275 mm 325 mm まで5 mm か10 mm
 ずつ変化させて測定した。

 (2) アライメント測定をLEO#18 と LEO#19 の中心 に垂直に照射できるように角度調整を行なった。300 mm ± 25 mm の範囲に 5 mm 間隔で 5×10 のグリッ ド照射を行った。



図 3: アライメント測定

2.1 アライメント調整の手順

LEO の製造時の曲率のズレにより、個々の LEO は焦点距離や焦点位置が異なる。焦点距離の異なる LEO が隣接する場合、十字の像は二重になり位置決 定精度が低下してしまう。この問題を解消するため に、中心の LEO#19を基準 LEO とした。LEO#19 に隣接する LEO の角度を調整して、同じ方向からく る X 線が基準 LEO と同じ位置に集光するようにし た。これにより、LEO の製造時の誤差を修正するこ



図 4: アライメント測定の集光イメージ

とができる。広視野 X 線モニタの光学系側の構築手 順は、(1) 個々の LEO の焦点距離を測定し、(2) 焦点 距離の近い LEO ごとにグループを作成し、1つのモ ジュールとしてフレームに収納した。そして、(4) 異 なる LEO に入射した X 線がセンサ上の同じ位置に 集光するように、LEO の角度を調整した。最後に、 (5) 2枚の LEO の周囲をシリコン接着剤で固定した。 LEO を保持する治具の高さを、治具とフレームにス テンレス製のリングを挟むことで調整し、LEO の角 度を調整することができる。

2.2 焦点距離測定と解析

ダーク撮影データを X 線照射データから引き算を して、イベントを判定した。焦点距離の解析により、 fits ファイル、イベントリスト、イメージ画像、スペ クトルを取得した。取得した X 軸と Y 軸射影ヒスト グラムデータを使用して、ダブルガウシアンでフィッ トすることで十字の像の幅を調べる。焦点距離ごと に十字の幅をプロットし、二次関数でフィットする。 一般的にガウス分布は平均 μ、標準偏差σとして、次 の式で表す。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} exp(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2})$$
(1)

この式から、ダブルガウシアンは次の式で表され る。

$$f(x) = a \exp(\frac{-(x-b)^2}{2c^2}) + d \exp(\frac{-(x-e)^2}{2f^2}) \quad (2)$$

cとfは二つのガウシアンの標準偏差σをであり、 aを含む項はヒストグラムのなだらかな部分、dを含 む項は幅の狭いとんがった部分を示す。



図 5: ダブルガウシアンフィット

得られたダブルガウシアンフィットしたデータを 用いて、焦点距離と十字の像の広がりを調査するた め、縦軸が半値全幅 (FWHM)[mm]、横軸が焦点距 離 [mm] の二次関数でフィットしベストフォーカスを 算出する。



図 6: 金沢 5m ビームラインでの焦点距離測定

続いて、アライメント測定をLEO#18とLEO#19 の中心に垂直に照射できるように角度調整を行なっ た。300 mm ± 25 mm の範囲に 5 mm 間隔で 5×10 のグリッド照射を行った。

3 結果と考察

3.1 焦点距離

スリットサイズは 8 mm × 8 mm、ビーム強度は Al 1.5 keV、5 kV, 10 mA, exposure 20 ms, 1000 frame/1grid 画像を取得した。図 7 に LEO#19 の焦 点距離イメージ、図 8、図 9 にそれぞれ X 軸、Y 軸 射影ヒストグラムデータ、そのデータから縦軸が半 値全幅 (FWHM)[mm]、横軸が焦点距離 [mm] の二次 関数でフィットしたものを図 10 に示す。



図 7: LEO#19 の焦点距離イメージ



図 8: 十字イメージの X 軸射影



図 9: 十字イメージの Y 軸射影



図 10: ベストフォーカス

この解析結果から、ISAS で得られた LEO#19 の 焦点距離は 27.28 m で、X 軸 300.63 ± 0.14 mm、Y 軸 290.76 ± 0.12 mm となった。無限遠換算すると、
X 軸 299.28 mm、Y 軸 293.69 mm となる。
金沢 5 m ビームラインの無限遠換算結果は、X 軸 302.60 mm、Y 軸 296.88 mm であり、これと比較すると ISAS で得られた焦点距離は X 軸で- 3.32 mm、
Y 軸で- 3.19 mm の差があることがわかった。

3.2 アライメント測定

LEO#18 と LEO#19 の間の中心に垂直にビーム が当てた。このようにして、ISAS の 30 m ビームラ インで取得したアライメント測定イメージを図 11 に 示す。図 12 は金沢大学の 5 m ビームラインで取得 したイメージからの解析結果で、図 13 は ISAS の 30 m ビームラインで取得したイメージの解析結果で ある。



315 mm

図 11: アライメント測定イメージ



図 12: 金沢 5m ビームラインでのアライメント測定 の解析結果

図 12 では、金沢での基準 LEO (LEO#19)のベス トフォーカス焦点距離での、2 枚の LEO からの集光 位置のずれを解析結果を示した。

センサ上の集光位置のずれ量が 0.5505 ± 0.1143 mm あって、焦点距離 283.01 mm を使って角度換算する と 6.687 ± 1.388 arcmin だった。

同様に、図 13 では、ISAS での基準 LEO (LEO#19)



図 13: ISAS の 30 m ビームラインでのアライメント 測定の解析結果

のベストフォーカス焦点距離での、2枚の LEO から の集光位置のずれを解析結果を示した。

センサ上の集光位置のずれ量が 0.1130 ± 0.0736 mm あって、焦点距離 295 mm を使って角度換算する と 1.316 ± 0.8577 arcmin だったは 0.1130 [mm] で 1.316 [arcmin]、誤差は 0.0736 [mm] で 0.8577 [arcmin] となった。

これより、ISAS の 30 m ビームラインでのアライメ ント測定では、目標精度 <3 arcmin となった。

4 まとめ

本研究では、プロトタイプモデルを用いて、複数 枚の LEO のアライメント技術の実証を行った。 LEO#19の焦点距離を測定し、その結果を解析して ベストフォーカスを調査した。また、アライメント 測定を行い、ISAS の 30 m ビームラインでは目標精 度 <3 arcmin であることを確認することができた。 今回は 2 枚の LEO のみを用いてアライメント実証 を行ったが、今後枚数を増やして1フレーム9 枚の LEO のアライメント調整を行う予定である。3 枚以 上のアライメントでも、手法は 2 枚の場合と同じで あるので、今回の実証により今後のアライメント作 業の妥当性も確認することができた。今後は LEO の 設置枚数を増やし、最終的には 9 枚の調整済み LEO とプロトタイプフレームを用いて、X 線結像試験と 熱真空試験、振動試験を行う予定である。 -index へ戻る

観測a24

将来衛星計画HiZ-GUNDAMのためのFPGAベースの pnCCDドライバ&読み出しシステムの設計と開発

今度 隆二

将来衛星計画 HiZ-GUNDAM のための FPGA ベースの pnCCD ドライバ&読み出しシステムの設計と開発

今度 隆二 (金沢大学大学院 数物科学研究科)

Abstract

ガンマ線バースト(GRB)は、10⁵² – 10⁵⁴ erg 程度のエネルギーを数十ミリ秒から数百秒かけて放出する宇 宙で最も明るい爆発である。HiZ-GUNDAM は、GRB をプローブとして初期宇宙を探査する将来の衛星ミッ ションである。ロブスターアイ光学系(LEO)と焦点面検出器からなる広視野 X 線モニタを利用し、GRB の 検出と方向決定を行う。焦点面検出器の候補としては、CMOS イメージセンサと pnCCD イメージセンサの 2 つがある。過去に、我々は CMOS イメージセンサの高速読み出しと X 線イベント抽出のための FPGA シ ステムを開発した。現在は、もう一つの候補である pnCCD のドライバ&読み出しシステムを開発している。 PNSensor 社の pnCCD イメージセンサは、高速読み出し、大面積、高感度を特徴としており、55 mm×55 mm 以上の撮像エリア、10 fps 以上のフレームレート、約 100µm のピクセルサイズなどのミッション要件を 満たしている。pnCCD ドライバ&読み出しシステムには、pnCCD の駆動信号を生成する機能と、pnCCD からのアナログ信号を AD 変換する機能が必要である。FPGA システムは、高速読み出しと X 線イベント抽 出に流用できる。これらの機能を実現するために、pnCCD の電荷転送信号を生成する PHI ドライバ基板、 pnCCD からのアナログ信号を AD 変換する ADC 基板、本システムの電源を供給する電源基板を開発した。

1 導入

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) は 10⁵² - 10⁵⁴ erg 程度のエネルギーを数十ミリ秒か ら数百秒かけて放出する宇宙で最も明るい爆発であ る。GRB はガンマ線で短時間に輝く即時放射と X 線から赤外線、可視光と様々な波長域にわたり数日 かけて輝く残光という現象に分けられる。即時放射 のあと、すぐに始まる X 線残光を観測することで、 GRB の発生位置を精度良く決定することができる。 そこで、我々は *HiZ-GUNDAM*(High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission)[1] \geq いう人工衛星計画を進めている。*HiZ-GUNDAM*で は、軟X線に感度のあるロブスターアイ光学系 (Lobstar Eye Optics: LEO) という集光光学系と焦点面検 出器からなる広視野 X 線モニタにより GRB の検出 と方向決定を行う。焦点面検出器への要求を表1に 示す。この要求を満たす検出器として、PNSensor 社 の pnCCD が候補となっている。我々はイメージセ ンサの読み出しと X 線イベント抽出を FPGA(Feild Programmable Gate Array) を用いて行うことを想 定しており、このシステムに pnCCD イメージセン サを落とし込むためには新たに電荷転送信号 (PHI 信

表 1: 焦点面検出器への要求

| 項目 | 要求パラメータ |
|---------|--|
| エネルギー範囲 | $0.4-4~{ m keV}$ |
| 受光面積 | $\geq 55~\mathrm{mm}\times 55~\mathrm{mm}$ |
| ピクセルサイズ | 75–100 $\mu {\rm m}$ |
| フレームレート | $\geq 10 \text{ fps}$ |

号)を生成する機能や pnCCD からのアナログ信号を AD 変換する機能が必要となる。

2 pnCCD

pnCCD は PNSensor 社が開発する高速読み出し可 能な CCD イメージセンサである。図 1 に示すよう に、pnCCD は専用の ASIC である CAMEX[2] と同 じセラミック基板に実装される。pnCCD は CAMEX と共に使用することでマルチチャネル読み出しを行っ ている。これにより従来の CCD の約 1 fps と比べて 10 倍から最大で 1000 倍の高フレームレートを可能 としている。さらに、軟 X 線 (0.3-11keV) に対して 高感度 (効率 90%以上) であり、大きなピクセルサイ 2024 年度 第54回 天文・天体物理若手夏の学校



図 1: pnCCD と CAMEX がのったセラミック基板

ズ、広い撮像面積により WFXM に搭載する焦点面 検出器の要求を満たしている。

3 各機能の要求と電子基板開発

FPGA システムに pnCCD のドライバ機能と読 み出し機能を落とし込むには1節で述べたように、 (1)PHI 信号を生成する機能と (2)pnCCD からのア ナログ信号を AD 変換する機能を設計する必要があ る。PHI 信号は CCD を駆動するための信号である。 pnCCD はピクセルごとに3つの制御電極があり、電 圧を印加することで電位障壁が生まれ、ピクセルご とに電荷を蓄えることが可能である。蓄えた電荷を 読み出すときには、制御電極に印加する電圧を適切 に変化させることで1方向に電荷をシフトさせるこ とが可能となる (図 2)。CAMEX を動作させ、PHI 信号を生成するには様々な電圧の電源を必要とする。 特に、PHI 信号は電荷転送の効率を最大化するため に波高値を調整可能とする。そのため、各 IC に電源 を供給する機能を追加しなければならない。我々は 各機能を電子基板として設計した。

3.1 PHI 信号生成

PHI 信号のタイミングは FPGA ロジックによって 制御し、FPGA から PHI 信号の元となる低電圧 (~3 V) の信号を出力する。この信号を処理し、PHI 信号 (3–15 V) を生成する (図 3)。この機能には次のよう な性能が要求される。(i) 駆動波形の周波数は最大で 5 MHz、(ii) 駆動波形の波高値は 3–15 V。(iii) 波高値 は電荷転送の効率を最適化するために調整する必要が あり、可変にしなければならない。(iv) また、この信 号に大きなノイズがのっている場合、適切な電位障壁 を生成できず電荷転送が正しく行われないため、十分



図 2: PHI 信号 (Φ_1, Φ_2, Φ_3) と CCD の電荷転送



図 3: PHI 信号の生成概念図

なノイズ対策が必須である。以上のようの要求を実現 するために図4に示す PHI ドライバ基板を作成した。 要求 (i),(ii),(iii) については高速の MOSFET ドライ バを用いることで実現する。立ち上がり、立ち下がり の典型的な速さが25 ns (= 40MHz) であるため、十 分速いスイッチングが可能となる。また、MOSFET ドライバに入力する電源電圧により~3 V の電圧を 3-15 V の範囲で増幅することできる。MOSFET に 入力する電源は電源供給の機能への要求とした。要求 (iii) については FPGA から LVCMOS で出力される 2024 年度 第54回 天文・天体物理若手夏の学校



図 4: PHI ドライバ基板の写真と主要な IC

信号を PHI ドライバ基板まで、LVDS(Low Voltage Differential Signal) で伝送することでノイズを軽減 する。さらに、光アイソレータを追加することで電 気的にノイズを遮断する。

3.2 AD 変換

CAMEX からのアナログ信号は最大 5 MHz の周 波数で出力される。ADC のサンプリングレートに あわせて CAMEX の出力周波数は調整可能である が、高フレームレート (>10 fps) を実現するために はなるべく高速な ADC が必要である。そこで、最 大で 25 MHz のサンプリングレート、14 bits の分 解能をもつ ADC3441 を用いる。これにより、最大 で 25 MHz/14 bits \approx 1.8 Mpixels/s で CAMEX からアナログ信号を読み出せることになる。1 枚の 画像を読み出す時に 1 つの CAMEX が担う部分は 132 channels × 96 lines \approx 1.3 × 10⁴[pixels/frame] だ けであるから、フレームレートは最大で

$$\frac{1.8 \times 10^6 \text{ pixels/s}}{1.3 \times 10^4 \text{ pixels/frame}} \approx 140 \text{ fps}$$
(1)

となる。このフレームレートはHiZ-GUNDAMのミッ ション要求を満たす。以上を踏まえて、図5に示す ADC 基板を作成した。CAMEX が読み出すアナロ グの電圧信号は低電圧であるため、ADCドライバが 必要となった。また、PHI信号のタイミング信号を LVCMOS → LVDS 変換する機能を ADC 基板に設 けた。



図 5: ADC 基板の写真と主要な IC



図 6: 電源供給基板のブロック図

3.3 電源供給

CMOS用のFPGAシステムをpnCCDドライバ& 読み出しシステムに落とし込むには、上記(3.1,3.2 節)の通り、機能を追加する必要がある。またpnCCD やCAMEX、ICなどに電源供給を行ったり、PHI信号 の増幅幅を調整するための電圧を可変にしたりしなけ ればならない。固定電圧の電源についてはLDO(Low Dropout)レギュレータを用いて、電源電圧を生成す る。電圧を可変にするにはDAC(Degital to Analog Converter)とオペアンプを組み合わせる。可変動作 をDACにFPGAからデジタル値を書き込むことで 実現し、オペアンプを組み合わせることで高電圧(10-30 V)を生成する。よって、図6のブロック図のよ うな電子回路を設計した。作成した電源供給基板の 写真を図7に示す。 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校



図 7: 電源供給基板の写真と主要な IC

4 まとめと展望

HiZ-GUNDAM に搭載する検出器候補である pnCCDのドライバ&読み出しシステムを我々が開 発したFPGAシステムに落とし込むためには、新た に(1)PHI信号を生成する機能と(2)センサからのア ナログ信号を AD 変換する機能が必要であった。本 研究では、二つの機能に対する要求とそれを満たす 設計を考え、3枚の電子基板の設計・開発を行った。

現在、製造した3枚の電子基板のデバッグ作業を 行っている。今後、電子基板が設計通りに正しく動 作することを確認したのち、pnCCDを動作させて軟 X線への応答などを調べることを計画している。

Reference

- D. Yonetoku. High-redshift gamma-ray burst for unraveling the dark ages mission: Hizgundam. In M.H. Loew, editor, Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray, volume 11444 of Proc. SPIE, page 114442Z, 2020.
- [2] Sven Herrmann, Werner Buttler, Robert Hartmann, Norbert Meidinger, Matteo Porro, and Lothar Strueder. Camex readout asics for pnccds. In 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, pages 2952–2957, 2008.

-index へ戻る

観測a25

X線分光撮像衛星XRISM搭載 軟X線撮像検出器(SXI) の軌道上における検出感度の評価

樋口 茉由

X線分光撮像衛星 XRISM 搭載 軟 X 線撮像装置 (SXI) の軌道上における 軟 X 線帯域の検出感度の評価

樋口 茉由 (東京理科大学大学院 創域理工学研究科)

Abstract

我々は 2023 年 9 月に打ち上げられた X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載の、軟 X 線撮像検出器 (SXI) の性能 評価を行っている。SXI は 4 枚の裏面照射型の X 線 CCD からなり、200 μm の厚い空乏層を持つことで、 0.4–13keV の広い¥エネルギー帯域で高い検出効率を実現している。しかし、X 線 CCD は紫外線や可視光線 にも感度があるため、それらを遮光する必要がある。そこで、可視光線を遮光する目的で CCD の X 線の入 射面に厚みが 230 nm のアルミニウムを主成分とする可視光遮光層 (OBL) を蒸着している。2015 年まで観 測を続けていた Suzaku 衛星搭載の X 線 CCD 検出器 (XIS) では、衛星内部のコンタミ物質が X 線 CCD 用 の可視光遮光膜 (OBF) に付着したことで、1keV 以下の軟 X 線帯域の CCD の検出感度が低下した。そこで XRISM 衛星の SXI では、コンタミ物質が付着することを防ぐことと、紫外線の遮光の両方の目的で、ポリイ ミドの両面にアルミニウムを蒸着したコンタミネーション防止膜 (CBF) を装備している。我々は、XRISM 搭載 SXI 用 CCD の打ち上げ前段階における検出効率の評価実験を、KEK の放射光施設 (KEK-PF) で行っ た。その結果、O-K 輝線 (525eV) 付近の CCD 単体の検出効率が 65%、CBF の X 線透過率は 52%、合わ せて SXI の検出効率が 34%という結果を得た。現在、地上の評価実験から求めた SXI の検出効率が軌道上 と同等であるかを確認するために、軌道上の観測データを用いて評価を進めている。また、CBF によるコン タミ防止の機能が十分に果たせているか確認することも行っている。これまでの解析により、光軸上のコン タミ物質の付着量を見積もった結果、増加の傾向は見られなかった。

1 X線分光撮像衛星 XRISM

1.1 XRISMの概要

XRISM 衛星は 2023 年 9 月 7 日に打ち上げられた 日本の 7 番目の X 線天文衛星である。XRISM は、高 いエネルギー分解能を特徴に持つ X 線マイクロカロ リーメーター「Resolve」と、過去最大の 38 分角四 方の広視野の撮像および 0.4–13keV のエネルギー帯 域の分光を行う軟 X 線撮像装置「Xtend」を搭載し ている。銀河団の構造形成の歴史、宇宙の元素合成 の歴史などの解明をミッションとして掲げている。

1.2 軟 X 線撮像検出器 SXI

本研究の対象は Xtend に搭載した軟 X 線撮像検 出器 SXI(Soft X-ray Imager) である。SXI カメラは 4枚の裏面照射型の X 線 CCD を田の字状に並べた 構造をとっている。図1に SXI カメラの外観と断面 の概略図を示す。SXI では、検出器にコンタミ物質 が付着することを防ぐことと、紫外線の遮光の両方 の目的で、ポリイミドの両面にアルミニウムを蒸着 したコンタミネーション防止膜 (CBF)を装備してい る。また、可視光線の遮光を目的として X 線 CCD の入射面に厚みが 230nm のアルミニウムを蒸着して いる。



 \boxtimes 1: XRISM/SXI

2 研究背景

2015年まで観測を続けていた Suzaku 衛星搭載の X線CCD(XIS)は、打ち上げ後まもなくの時期に、 冷却された検出器の約 20 mm の距離に設置されてい た可視光遮光膜 (OBF) にコンタミ物質が付着した。 コンタミ物質はH,C,O で構成される有機化合物であ り、それらの元素は軟 X 線を吸収してしまう。図 2 は 2005 年 8 月から 2006 年 5 月までの時期ごとの超 新星残骸 1E0102.2-7219(以下、E0102 と呼ぶ) のエ ネルギースペクトルである。この図から 2005 年7月 に打ち上げられてから約1年で1keV以下で強度が 減少していることがわかる。E0102 は我々の寿命ス ケールで明るさが変動しない天体であるため、この 減少は天体のスペクトルが変化したのではなく、コ ンタミ物質による X 線の吸収が原因である。このよ うに、検出器へのコンタミ物質の付着は、天体の明 るさを誤って測定する原因となる。コンタミ物質の 蓄積状況を継続的に調査し、正確なデータを確保す ることは科学的な成果を正しく導くために非常に重 要である。



図 2: Suzaku/XIS で取得した 1E0102.2-7219 の時期 ごとのエネルギースペクトル (青木 修論 2023)

3 研究目的

背景で述べた Suzaku 経験から、XRISM ではコン タミネーション対策が施された。図 1(b) のように、 SXI カメラ外部からのアウトガスの侵入を防ぐため に、カメラの HOOD の上部にコンタミネーション防 止膜 (Contamination Blocking Filter;CBF) を装備 している。また、CCD によって冷却されることを防 ぐために CCD から遠ざけて設置されており、約 25 °Cに保たれている。そこで本研究の目的は、このコ ンタミネーション防止膜の機能が十分に発揮できて いるかを定量的に調べることである。

4 解析手法

図3にSXIで取得する観測データのイメージの概 略図を示す。SXIカメラの上部にはX線望遠鏡(Xray Mirror Assembly;XMA)が装備されており、図の ようにSXIの4枚のCCD(これらをCCD1, CCD2, CCD3, CCD4と名付けている)のうち望遠鏡の光軸 上の焦点面にCCD2の★マークの部分が位置してい る。この領域をOn-Axis、その他の領域をOff-Axis と呼ぶ。天体のイメージを捉えているOn-Axisでコ ンタミ量の絶対値を求め、昼地球の観測データを用い てコンタミの空間分布を調べることで、4枚のCCD に付着するコンタミ量を見積もることができる。以 下で詳細を述べる。



図 3: SXI で取得されるイメージ

4.1 コンタミ物質の絶対量

4 枚の CCD 全面に付着するコンタミ量の絶対値を 求めるため、まず On-Axis のコンタミ量を E0102 の 軌道上データを用いて求める。

E0102 は明るさが変動せず、O, Ne, および Mg の 輝線が強いため、Chandra, Suzaku, Swift, および XMM-Newton に搭載された検出器の軟 X 線キャリ ブレーション天体として選ばれている。本解析では E0102 を表現する既存のモデル (IACHEC Standard Model v1.9((Paul P. Plucinsky et al. 2016))) と天体 と検出器間の H, C, N, O の柱密度を計算するモデル を用いて、モデルフィットを行った。図 5 は E0102 の 2023 年 11 月 01 日から 2024 年 2 月 19 日の間の 5 観測のエネルギースペクトルである。



図 4: XRISM/SXI で観測した超新星残骸 1E0102.2-7219 の 2023 年 11 月 ~ 2024 年 2 月の時期ごとのエ ネルギースペクトル

る。図6に示すように、太陽の光の照射を受けている 地球の面のこと昼地球 (Day-Earth) と呼び、大気中 に含まれる窒素原子、酸素原子が太陽からの X 線を 光電吸収し、蛍光 X 線を放射する。それぞれ N-Kα、 O-Ka といい、得られるエネルギースペクトルはそ れぞれ 390 eV, 525 eV に輝線を持つ。そこで、昼地 球から得られる X 線イベントが 4 枚の CCD 全面に 一様に降ることを利用し、スペクトルから N-Kαと O-Kαの強度の比を求める。ここでは強度比を NO 比 (=N-K α の強度/O-K α の強度) と呼ぶこととする。 CCD 全体で検出感度が等しければ、NO 比は CCD 全体で一様となる。コンタミ物質が付着していれば、 それが分厚くなるほどコンタミによる低エネルギー 帯域の光電吸収が起きるので、窒素の強度が酸素のも のに比べ小さくなるため、NO比は小さくなる。Off-Axis のコンタミ物質の絶対量は、天体の軌道上デー タを用いて求めることはできないため、このように 昼地球の軌道上データを用いた解析を行うことで、4 枚の CCD 全体に付着するコンタミの空間分布を調 べることができ、4.1 で述べた On-Axis のコンタミ 量の絶対値の結果と合わせて CCD 全体のコンタミ 量を求めることができる。



図 5: 打ち上げ後のコンタミ量の時間変化

4.2 コンタミの空間分布

XRISM は高度約 550km を周回しており、天体の 位置によって地球大気が望遠鏡の視野に入ることがあ



図 6: 太陽と地球および衛星の位置関係

5 まとめと今後の展望

我々は、XRISM 衛星搭載の軟 X 線撮像検出器 SXI の、軟 X 線帯域の検出感度の評価を行っている。今 回は、SXI に付着するコンタミネーションの評価結 果の報告を行った。SXI に付着するコンタミ物質は、 天体の軌道上データでコンタミ物質の絶対量を求め、 昼地球の軌道上データで得られる地球大気からの窒 素と酸素の蛍光 X 線のスペクトルで SXI の CCD の 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

コンタミの空間分布を調べることで、見積もること ができる。天体のイメージを捉えている On-Axis の 領域のコンタミ量を、超新星残骸 1E0102.2-7219 の 軌道上のデータを用いて見積もったところ、現時点 の解析では、打ち上げ後から約 5ヶ月の間ではコンタ ミの付着はないという結果となった。今後は、昼地 球のスペクトルを用いた軟 X 線の検出感度の解析を 継続し、コンタミの空間分布を求める解析手法の確 立を進めていく。

Reference

青木大輝 2023, 東京理科大学修士論文

Paul P. Plucinsky, Andrew P. Beardmore, Adam Foster, Frank Haberl, Eric D. Miller, A.M.T. Pollock, and Steve Sembay 2016

-----index へ戻る

観測a26

太陽フレア観測ロケット FOXSI-4 搭載用 X 線望遠鏡の開発 光線追跡シミュレーション

吉田 有佑

太陽フレア観測ロケット FOXSI-4 搭載用 X 線望遠鏡の開発 ~ 光線追跡シミュレーション~

吉田 有佑 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

我々は地上の X 線結像系開発で培われた高精度電鋳技術を用いて高結像性能宇宙 X 線望遠鏡を開発して いる。本望遠鏡は世界で初めて太陽フレアの X 線撮像分光観測に成功した日米共同の NASA 観測ロケット 実験「The 4th Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI-4)」に搭載された。本ミッションで我々は 軟/硬 X 線望遠鏡を各々1 台ずつ製作し、その地上較正試験を実施した。結果、12 keV にて広がった天体 に対する感度の指標である HPD は ~16 秒角、点源の分解能力の指標である FWHM は ~1 秒角を達成し た。これらのデータをモデル化し、観測データから物理量を正確に求めるために必要となる応答関数を構築 するため、我々は独自の光線追跡シミュレータを構築してきた。本研究では反射鏡の母線方向形状誤差に起 因する反射角の不確かさをモデル化し、本シミュレータに初めて実装した。その不確かさが従う分布をコー シー分布と仮定し、実測値の FWHM と HPD を再現するように分布のフリーパラメータを調整した結果、 on-axis 光に対して Point Spread Finction (PSF) を ~50 秒角まで高い精度で再現することに成功した。さ らに off-axis 光に対してもコーシー分布のパラメータを最適化し、その off-axis 角依存性を調べた。

1 はじめに

FOXSI (Focusing Optics X-ray Solar Imager) は、 太陽コロナにおける高エネルギー物理現象の解明を 目的とした日米共同の NASA 観測ロケット実験であ る*1。1~3回目の打ち上げでは比較的静穏期の太 陽の軟/硬 X 線撮像分光観測が行われた *2,3,4。4 回 目となる FOXSI-4 はフレアに伴って解放されるエ ネルギーや加速される粒子、生成される高温プラズ マ等を理解することを目的としている。2024年4月 17 日 (UTC) に打ち上げられ、世界初の太陽フレア の軟/硬 X 線撮像分光観測に成功した。観測データは 無事に回収され、現在はデータ解析のための処理が 行われている。本ミッションには2つの二次曲面(1 段目が放物面で2段目が双曲面)からなる2回反射 型の光学系である Wolter-I 斜入射望遠鏡が搭載され ている。反射鏡の光軸に対して平行(on-axis) に入 射した光は両方の面で反射し、焦点面で結像するが、 一方で光軸に対して非平行である(off-axis) 光は一 つの面のみで反射して検出器に到達する場合があり、 これらの一回反射光は迷光と呼ばれている。今回の 観測対象である太陽は視直径が 0.5 度であり、複数 の明るい X 線源が存在するため、そのうち off-axis にあるものから放射された X 線は迷光の原因とな

る。迷光はデータ解析において無視できない場合が あり、観測データから正確に物理量を得るためには 迷光の振る舞いを正しく理解し、モデル化すること が重要である。すなわち、on-/off-axis Point Spread Function (PSF)のモデル化は科学成果を得るために 不可欠である。本研究では結像性能の主な劣化要因 である反射鏡母線方向の形状誤差をシミュレータに 組み込むことで、on-/off-axis 光に対する結像性能の モデル化を試みた。

2 FOXSI-4 搭載用 X 線望遠鏡

我々は軟 X 線望遠鏡 (SXR) と硬 X 線望遠鏡 (HXR)の2種類の望遠鏡を開発し、FOXSI-4 に 搭載した (図1)。これらの望遠鏡には、地上の X 線 結像系開発で培われた高精度電鋳技術を駆使して製 作された全周2段一体の Wolter-I 型反射鏡が含ま れている*⁵。この反射鏡は Ni 製で、焦点距離2m、 放物面と双曲面の境界部の直径 60 mm、全長 220 mm、厚さ2 mm であり、片側のみ固着されている。 SXR は、反射鏡、ミラーセル、フロント/リアアパー チャー、フロント/リアライトブロッカー、プリコリ メータ、可視光防護フィルター (OBF) から構成され ている。一方、HXR には OBF とプリコリメーター 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

は搭載されておらず、SXR とは異なるデザインのブ ロッカーが取り付けられている。ライトブロッカー とプリコリメータには X 線の入射角を制限すること で迷光を抑制する役割がある。また、 SXR と組み 合わされた CMOS 検出器は可視光に感度があるた め、OBF によって可視光が検出器に入射することを 防いでいる。これらの搭載品について地上較正試験 を実施した結果、12 keV にて広がった天体に対する 感度の指標である Half Power Diameter (HPD) は 欧米の大型 X 線天文衛星の搭載品に匹敵する ~ 16 秒角、点源の分解能力の指標である FWHM は世界 最高レベルの ~ 1 秒角を達成した。



図 1: (左) FOXSI-4 に搭載された 7 台の Wolter-I 型望遠鏡。我々が製作した 2 台の望遠鏡の位置が 矢印にて示されている。(右) 我々の硬 X 線望遠鏡 (HXR)。

3 X 線照射試験

Super Photon Ring-8 GeV (SPring-8) BL29XU において off-axis 光に対する結像性能を評価するた め、フライトモデル (FM) HXR スペア品の地上較正 試験を行った。BL29XU は長さ 1 km のビームライ ンで、光源は長さ 4.5 m の標準的なアンジュレータ である。放射された X 線ビームは光源から 43 m の 位置に設置された 2 つのシリコン結晶からなる二結 晶分光器によって単色化され、その後フレネルゾー ンプレートによって拡大されている。図 2 に実験セッ トアップを示す。空気による散乱を最小限に抑える ため、カプトンで密閉された真空パイプが反射鏡の 上流と下流の両方に設置されている。角度および位 置合わせのために、反射鏡には x, y, z の並進、お よび θ_y , θ_z の回転ステージが、検出器には y およ び z ステージが取り付けられている。検出器はシン

チレーター、対物レンズ、CMOS カメラから構成さ れており、有効画素サイズは 6.5 μ m、視野は 13.3 mm×13.3 mm で、これは 23×23 arcmin^2 に相当す る。これらの測定は以下の手順で行われた。最初に、 有効面積の角度依存性を利用して、反射鏡の光軸と X 線の入射方向との角度アライメントを行った。次 に、検出器の位置によって結像の広がりが変化する ことを利用して HPD が最小となる長さを焦点距離 と定義した。最後に、 $\theta_y \ge \theta_z$ の関数として 20 分角 まで、焦点面における 12 keV の on-/off-axis イメー ジを取得した(図 2 右参照)。



図 2: (左) SPring-8 BL29XU での実験セットアッ プ。(右) 各 off-axis 角に対応する 12 keV における 結像イメージ。本研究では白丸で囲まれたデータを 使用した。

4 光線追跡シミュレータ

望遠鏡の光学性能を定量的に理解し、応答関数を 構築するため、我々は独自の光線追跡シミュレータ を構築している。このシミュレータでは、ライトブ ロッカー、アパーチャー、ミラーセル、反射鏡など の望遠鏡の基本的な構成要素を再現し、任意のエネ ルギーや入射方向を持つ光子に対する望遠鏡の応答 を予想することができる。つまり、各構成部品の様々 な設計パラメータの関数として、有効面積と結像性 能を on-/off-axis 光に対して見積もることが可能で ある。

ここでは、特に PSF の観点から応答関数を構成す るために、結像性能の劣化要因をシミュレータに組み 込むことにより、on-/off-axis 光に対して測定された PSF を再現し、モデル化することを試みた。我々の 望遠鏡では、結像性能の劣化は主に反射鏡母線方向 の形状誤差に起因することが判明しているため、形 状誤差によって生じる表面の傾き誤差をモデル化し、 本シミュレータに初めて導入した。傾き誤差の分布 は実際の測定に基づいてコーシー分布に従うと仮定 した。この手順の詳細を図3に示す。



図 3: (左)母線方向の傾き誤差を持つ反射鏡の断面 図。(右)左の図の拡大図。シミュレータ内で母線方 向の傾き誤差を想定して理想的な反射角に反射角ノ イズが付与される。

布が周方向に対称であると仮定しているため、実際 のイメージの非対称性は再現できなかった。



図 4: (左) 12keV の on-axis 光に対する実測(上) とシミュレーションイメージ(下)。(右)正規化さ れた PSF。実測値は橙色、シミュレーションは青色 でプロットされている。

5 On-axis PSF のモデル化

5.1 方法

まず、12 keV の on-axis 光を仮定してシミュレー ションを行った。次に、測定データとシミュレーション データの両方について、PSF と、最外半径で1 に正規 化された PSF の動径方向積分に対応する Encircled Energy Function (EEF)を計算し、Cauchy 分布に おけるスケールパラメータ γ を 0.15 秒角ごと変えて PSF を比較し、最終的に実測した FWHM と HPD を再現するように γ の値を最適化した。強度のピー ク位置は、実測値とシミュレーションの両方でプロ ファイルの原点として定義されている。結果は図 4 に示されており、100 万光子でシミュレーションを 行った。

5.2 結果

 $\gamma = 6.3$ arcsec のシミュレーション結果は、PSF で 100 秒角まで測定結果と一致した。しかし、半径 が大きくなるにつれて、実測値とシミュレーション の間に乖離が見られた。今回の方法では傾き誤差分

6 Off-axis PSF のモデル化

6.1 方法

次に、12 keV の off-axis 光を (θ_y [arcmin], θ_z [arcmin]) = (0, -2.5), (0, -5.0), (0, -7.5), (0, -10), (0, -12), (2.5, -2.5), (5.0, -5.0), (7.5, -7.5), (10, -10), (12, -12) の角度に設定し、シミュレーションを行った。 5.1 節 で説明したように、on-axis の場合と同じ方法でデータを分析した。特に off-axis 角度が比較的大きい場合には、画像の中心に局所的な強度ピークが見られる場合があった。そこで、平滑化処理を施したところ、それらのケース全てで大幅な改善が確認された。さらに、結像性能をモデル化するため、 γ の off-axis 角依存性を調べた。その結果を図 6 にまとめた。なお、off-axis 角は $\theta_y \ge \theta_z$ の2乗和として定義した。

6.2 結果

on-axis の結果と同様に、off-axis 角が大きくなる につれて、実測値とシミュレーション結果の乖離は 大きくなるが、off-axis 角が 12 分角に近づくと傾向 が変化した。具体的には、(θ_v [arcmin], θ_z [arcmin]) = (0, -12)の場合では、図5に示すように、PSF に おいてシミュレーション結果は実測値と 350 arcsec まで±50%以内の精度で一致した。しかし、反射鏡 の周方向非対称性に起因すると思われる差が局所的 に現れた。図6にまとめたように、 γ の off-axis 角依 存性は、12分角までは徐々に減少し、12分角を超え ると増加した。平滑化処理が必要となり、off-axis 角 が12分角 に近づくにつれて γ が減少することは、 反射鏡の歪み、周方向の表面形状誤差、波動光学的 な散乱の影響など、他の劣化要因が寄与している可 能性を示唆している。12分角以上の大きな off-axis 角では、放物面または双曲面の一方のみで反射する 迷光が HPD の計算に寄与していると考えられる。



図 5: 図 5 と同様。ただし、off-axis 角は (θ_y [arcmin], θ_z [arcmin]) = (0, -12)。



図 6: γ の off-axis 角依存性。(θ_y [arcmin], θ_z [arcmin]) = (0, 0), (0, -2.5), (0, -5.0), (0, -7.5), (0, -10), (0, -12) と (2.5, -2.5), (5.0, -5.0), (7.5, -7.5), (10, -10), (12, -12) がそれぞれ緑とオレンジでプロットされている。off-axis 角は $\theta_y \ge \theta_z$ の二乗和として定義される。

7 まとめと今後の展望

我々は地上の X 線結像系開発で培われた高精度電 鋳技術を用いた高結像性能反射鏡の製作、および過 酷な打ち上げ環境への耐性を有する高精度反射鏡支 持機構の開発を行っている。そして、製作した反射鏡 を支持機構に対して高精度に配置・調整することで 2 種類の X 線望遠鏡を開発し、FOXSI-4 に搭載した。 本打ち上げは成功し、太陽フレアの観測データを得 ることができた。太陽観測では複数の明るい X 線源 が存在するため、off-axis 光の影響が無視できない。 本研究ではデータ解析において物理量を正しく求め るために不可欠な結像性能のモデル化を試みた。そ こで、FM のスペア品を用いて、様々な off-axis 角 の場合で X 線照射試験を行った。そして、測定され た on-/off-axis PSF と EEF を再現し、モデル化す るために反射鏡母線方向の傾き誤差を初めて光線追 跡シミュレーションに導入した。結果、傾き誤差分布 をコーシー分布と仮定し、コーシー分布のスケール パラメータ(γ)を調整することで、反射鏡表面の周 方向非対称性に起因すると思われる実測値とシミュ レーションの乖離があるにもかかわらず、FWHM と HPD の実測値を再現することに成功した。さらに γ の off-axis 角依存性を調べたところ、 γ は 12 分角 まで徐々に減少し、12 分角 を超えると増加すること がわかった。この傾向から他の劣化要因の寄与が無 視できないことが示唆された。

Reference

- Krucker, S., Christe, S., & Glesener, L. et al., 2013, 8862, 88620R, SPIE
- Krucker, S., Christe, S., & Glesener, L. et al. 2014, The Astrophysical Journal Letters 793, L32
- Ishikawa, S., Glesener, L., & Krucker, S. et al., 2017, Nature Astronomy 1, 771–774
- Buitrago-Casas, J. C., Glesener, L., & Christe, S. et al., 2022 AA 665, A103
- Yamaguchi, G., Matsuzawa, & Y., Kume, T. et al., 2023, Review of Scientific Instruments 94, 124501

—index へ戻る

観測a27

高温塑性変形技術を用いた湾曲Siブラッグ反射型偏 光計

石牟礼 碧衣

高温塑性変形技術を用いた湾曲 Si ブラッグ反射型偏光計

石牟礼 碧衣 (東京都立大学大学院 理学研究科)

Abstract

宇宙 X 線観測において偏光は撮像・分光・時間変動と並ぶ第四の観測手段になると期待されている。我々 は将来の X 線偏光観測を目指して、ブラッグ反射を用いた独自の偏光計を開発している。Si 結晶のブラッ グ反射を利用する手法であり、従来の平板結晶を用いる手法では、偏光測定能力を示す M 値は理論上 100% 近くを達成出来るが、検出可能な波長帯域は狭く、集光も簡単ではなかった。そこで我々は平板の Si 結晶を 自由に湾曲させる高温塑性変形技術を活用することで、高い M 値を維持しつつ集光可能であり、かつ湾曲に よって反射角度を変えることで波長域を広げる手法を考案した。そして高温塑性変形によって球面変形させ た試作結晶を用いて世界で初めて X 線偏光の検出を確認してきた。私はこの開発をさらに進めるべく、2つ の異なる波長の X 線を湾曲 Si 結晶に当て、ブラッグ反射角の違いによる集光と、オフプレーンにわざと検 出器を配置することで、結像位置から分光が可能であることを確認した。実験は ISAS/ JAXA 30 m ビーム ラインを用いて、湾曲 Si 結晶に対して Fe K_{α1} 6.404 keV, K_{α2} 6.391 keV を照射し、集光像を取得した。 その結果、2 本の輝線に対応する位置に偏光 X 線像を取得することに成功した。これは本手法で世界で初め てである。

1 研究背景

宇宙での偏光X線の観測は、磁場を介したシンク ロトロン放射から磁場の情報を得る、あるいはブラッ クホール周辺におけるコンプトン散乱から降着円盤 について知ることが可能となり、高エネルギー宇宙 現象への理解が各段に深まるとともに、新たな現象 の発見に結び付くと考えられ、撮像・分光・時間変動 と並ぶ第四の観測手段になると期待されている。歴 史的には、宇宙での偏光X線の観測は技術的な困難 によって観測例のない時代が続いたが、近年 IXPE 衛星などが観測成果を挙げ [1]、今まさに黎明期と呼 ぶべき段階にある。

偏光X線の検出原理としては光電吸収、コンプト ン散乱、ブラッグ反射などが挙げられるが、これら はそれぞれ異なる M 値と検出可能なエネルギー帯 域を持つ。 M 値とは、偏光計の性能評価尺度の一つ であり、1 に近付くほど検出能力が高いことを示す。 偏光X線観測の実績を持つプロジェクトの M 値と エネルギー帯域の関係を図1 に示す。この中で我々 は、非常に狭い帯域のみではあるが 1 に近い M 値 を持つブラッグ反射に注目した。平板の Si 結晶を利 用したブラッグ反射は、ブラッグ条件を満たす波長 のみを反射する。そこで我々は、平板の Si 結晶を自 由に湾曲させる高温塑性変形技術を活用し、高い M 値を維持したまま、反射角度を変えることで波長域 を広げ、さらには集光が可能となる手法を考案した。 図 2 に集光原理を示す。



図 1: 主な偏光X線観測検出器の M 値とエネルギー 帯域の関係。

図3 に高温塑性変形の模式図を示す。高温塑性変 形技術とは、700 C°以上の高温下で Si 結晶をプレ スし、結晶面をずらすことで塑性変形する日本発祥 の手法である [2]。変形に用いる治具の形状を変える ことで様々な形状への変形が、また塑性変形のため その形状の保持も可能となる。



図 2: 従来の平板 Si ブラッグ反射型偏光計と新たな 湾曲 Si ブラッグ反射型偏光計の比較。



図 3: 高温塑性変形の模式図。

我々の研究室ではこれまでに、高温塑性変形により 球面変形した Si (100) 面の結晶を用いてモジュレー ションカーブの測定を行い、この手法を用いては世 界で初めて偏光の検出を確認している [3,4]。測定結 果を図4に示す。モジュレーションカーブとは、入 射X線の進行方向を軸とする回転角を偏光角と定義 した時、結晶格子の偏光角に応じて反射X線強度が 周期的に変化する依存性のことである。

しかし、この時の測定に用いた検出器は非撮像型 のものであり、湾曲 Si ブラッグ反射型偏光計の特色 である集光と分光は実証されていない。そこで今回 我々は撮像型検出器を用いたイメージング測定によ る集光と分光の実証を目的とした。



図 4: 高温塑性変形を用いた湾曲 Si 結晶で取得した モジュレーションカーブ [3,4]。

2 イメージング測定

今回の測定に際してまずは新たな球面変形基板を 製作した。目標とする曲率半径 1000 mm に対して 実際に製作した基板の曲率半径は 1042 mm となり、 目標曲率に対して 5% 以内の精度での変形を行うこ とができた。また表面形状についても球面フィットか らの残差が $\pm 5 \mu$ m の変形を実現した。そして、曲率 半径と Fe の K_{α 1} と K_{α 2} のエネルギー差 13 eV、す なわちブラッグ角の差 0.16 deg より、予想される集 光位置はサンプル中心から 385.3 mm と求められた。

以上の条件からイメージング測定用のセットアッ プを決定した。測定には ISAS/JAXA 30 m ビーム ラインを使用する。図5 に示す。X線発生装置の1 次ターゲットを Fe とし、およそ 30 m 離れた地点の 高温塑性変形偏光計に照射し、その反射光を CMOS 検出器で撮像する。予想した集光位置での集光像を 取得し、かつ集光の様子を捉えるために検出器は高 温塑性変形偏光計から 308.4 mm から 408.4 mm の 距離の範囲内を動かせるように設置した。図6 に模 式図を示す。この高温塑性変形偏光計と検出器間の 距離を L とする。



図 5: イメージング測定用セットアップの模式図。



図 6: イメージング測定用セットアップの高温塑性変 形偏光計と CMOS 検出器の位置関係。

3 結果

高温塑性変形偏光計に y 方向 3 mm, z 方向 1 mm のビームを照射した時に CMOS 検出器で取得した 集光像を図 7 に、集光像から作成した x 軸方向への プロジェクションを図 8 に示す。本来は Fe の K_{a1} と K_{a2} は分離され、2 本のまっすぐな縦線となるは ずだが、基板表面形状の影響によって像が歪んでし まったと考えられる。サンプルと検出器の距離を変 えながら 5 回撮影を繰り返し、撮影した 5 枚の画像 からそれぞれ x 軸方向へのプロジェクションを作成 して 2 通りの手法で集光位置を推定した。



図 7: 2024 年 3 月に取得した集光像。高温塑性変形 技術を用いた湾曲 Si 結晶では世界初である。



図 8: 集光像から作成した x 軸へのプロジェクション。

1 つ目の方法は、プロジェクションから集光像全体の幅を読み取り、その変化から集光位置を推定す る方法である。図 9 に結果を示す。まず像の幅が減 少傾向にある 308.4 mm から 383.4 mm の範囲で直 線フィットを行い、傾きを求めた。集光位置の前後で 像の幅の変化率は同じであると考えて、求めた傾き に -1 をかけた傾きの直線が 408.4 mm の点を通った 時の 2 本の直線の交点を求めて集光位置とした。こ れによって求められた集光位置は 395 ± 57 mm で あった。



図 9: 像の幅の変化。

2 つ目の方法は、プロジェクションに対してガウ シアンフィッティングを行い、Fe の K_{α 1} と K_{α 2} の ピーク位置の変化から集光位置を推定する方法であ る。図 10 に結果を示す。ただし、ピークの位置が明 確に特定できなかった 358.4 mm 地点でのデータは 除外した。こちらもそれぞれに直線フィットを行い、 K_{α 1} と K_{α 2} のピーク位置が交差する点を求めて集光 位置とした。これによって求められた集光位置は 377 ± 12 mm であった。



図 10: Fe の K_{a1} と K_{a2} のピーク位置の変化。

両手法で集光像から推定される集光位置は、いず れも曲率半径から予想される 385.3 mm と誤差の範 囲で一致し、集光と分光を確認できた。完全には一致 していないが、これは集光位置の予想に用いた曲率 半径が基板全面から求めた値であり、ビームを照射 した部分の局所的な曲率半径とは異なることが原因 として考えられる。また、集光像の歪みや 358.4 mm 地点でのピークの混在など、定量的な評価が難しい 結果となった。これは基板の表面形状が完全な球面 ではないために反射光が歪んでしまったこと、およ び高温塑性変形偏光計へ照射したのが単色ビームで はなく連続光であったことにより、 K_{a1} と K_{a2} 同 士やそれ以外の成分が混ざってしまったためと考え られる。今後、プロジェクションを細かく分割する、 二結晶分光器で K_{α1} と K_{α2} をそれぞれ単離した単 色ビームを照射したデータについて解析を行う、基 板表面形状の細かい分析を合わせて行うなどして改 善を図る。また、今回連続成分のために行うことが できなかったエネルギー分解能の見積もりも行う。

4 まとめ

高温塑性変形技術を用いて球面変形した湾曲 Si ブ ラッグ反射型偏光計で集光と分光を実証することを 目的として、偏光計と CMOS 検出器の距離を変え ながらイメージング測定を行った。その結果、高温 塑性変形技術を用いては世界で初めてブラッグ反射 のイメージングに成功した。これにより Fe の K_{α 1} と K_{α 2} の集光と分光が確認できた。

今後は二結晶分光器で K_{α1} と K_{α2} をそれぞれ単 離した単色ビームを照射したデータについて解析を 行い、今回の結果と比較する。またエネルギー分解 能の評価と基板表面形状の影響の考察を行う。

将来的には小型衛星への搭載に向けて設計を最適 化したい。

Reference

- [1] Bucciantini et al, 2023, Nature Astronomy
- [2] Nakajima et al, 2004, Nature Materials
- [3] 内野, 2021, 修士論文 (東京都立大)
- [4] Ueda et al., 2022, Proc. SPIE

-index へ戻る

観測a28

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

菅井 春佳

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

菅井 春佳 (中央大学大学院 理工学研究科)

Abstract

太陽フレアでは、磁気再結合をきっかけとして、まずは粒子の加速が起こると考えられているが、未だその現場は十分に理解されていない。しかし、並進運動をする電子がプラズマ中に突入すると偏光した輝線が 生じ、そこから電子加速の有意義な情報が得られると考えられる。我々は、中性 Fe および Fe イオンの輝 線群 (6.4 – 6.9 keV) を含む連続帯域 (5.5–8.1 keV) に感度を持つ、Si(100) 結晶と炭素繊維強化プラスチッ ク (CFRP) を用いた回転放物面状の反射鏡 (ParaDAXAS)、および X 線イメージセンサ (CMOS) から成る ブラッグ反射型 X 線偏光計を開発している。偏光能力を表す M 値はこの輝線群の帯域でほぼ 1 となってお り、高い偏光検出能力を持つ。また、CMOS センサをあえて焦点からずらすことでエネルギーごとの検出位 置を変化させ、高い分光能力も狙っている。この光学系の発明に対して、我々は 2020 年度に特許を取得し ている (飯塚亮、坪井陽子「X線分光偏光計」特開 2017-161480(P2017-161480A))。現在は CubeSat への 搭載を目標として、2U (10 cm 立方 × 2) に収まるサイズの反射鏡を作成している。Fe-Ka1 (6403.8 eV) と Fe-Ka2 (6390.8 eV) をターゲットとして分光実験を行ったところ、Fe-Ka1 におけるエネルギー分解能は反 射鏡の焦点から CMOS までの距離 d を用いて $\Delta E = (2.92 + 236.5 / (d [mm])) [eV] 、実用時 (d = 80 mm)$ $では <math>\Delta E = 5.9$ eV という結果を得た。これは、現在稼働中の XRISM/Resolve と同等の分解能といえる。 本講演では、分光実験の詳細を報告する。

1 Introduction

我々が開発中の ParaDAXAS(図 1) は、反射面に Si 結晶、土台に炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を使用した、偏光 X 線反射鏡である。

ParaDAXAS は回転放物面形状をしている。以降 では図1の鉛直方向を放物面方向、水平方向を円周 方向と定義する。



図 1: ParaDAXAS(反射鏡)

この形状とブラッグ反射を利用して、X 線の分光・ 偏光方向の特定を可能とする。 ブラッグ反射の反射条件

 $2dsin\theta = n\lambda$

より、X線はエネルギーごとに異なる位置で反射し、 焦点に向かう。図2のように焦点からずれた位置に 検出器を置くことで、分光を実現する。



図 2: 分光原理

またブラッグ反射では、反射面に平行な成分の反 射率は1、垂直な成分の反射率は *cos*²(2*θ*) となる (図 3)。



平行成分の反射率:1 垂直成分の反射率:cos²(2*θ*)

反射条件:2 $d\sin\theta = n\lambda$

図 3: ブラッグ反射

したがって反射鏡を四象限分設置し、全方向から の反射 X 線を見ることによって、最も明るい像が受 かった方向の反射面に対して平行に偏光していると わかる。



図 4: 偏光原理

我々は ParaDAXAS と検出器 (CMOS センサ) からなる偏光計を考案し、これを超小型衛星 CubeSat に搭載することを目指している。搭載時のスケール は図 5 のように 150 mm 程度で、検出器を取り付け る基盤を合わせて 2 U 幅となる予定である。



図 5: 偏光計のスケール

2 Methods

今回我々は ParaDAXAS のエネルギー分解能を評 価するために、分光実験を実施した。

ターゲットは Fe とし、Fe-K α 1 と Fe-K α 2 を利 用して実験を行った。

実験ステージは ParaDAXAS の X 線に対する角度 と検出器の水平方向に自由度を持たせ、図 6 のよう に組んだ。このステージを図 7 のようにビームライ ン内に取り付けて使用した。



図 6: 実験ステージ

| 検出器 | ステージ |
|-----|------|
| | X線 |
| | |

図 7: ビームライン

反射鏡の焦点をd = 0 mmとし、検出器を焦点に 最も近づけた状態 (d = 58 mm) から 10 mm ずつ遠 ざけながら計 7 箇所で X 線を撮像した。



図 8: 分光実験

Results 3

dが58mmのとき(図9)と118mmのとき(図10) の像は以下のようになった。



 \boxtimes 9: $d = 58 \,\mathrm{mm}$



🖾 10: $d = 118 \,\mathrm{mm}$

2本の像のうち、上が Kα1、下が Kα2 である。図 9に比べ図10では、像の間隔が広がり、像の幅も広 がっているのがわかる。

Discussion 4

エネルギー分解能は次の式で求めることができる。

図 12 の近似直線は D = 0.37d となった。このグ ラフから、像の間隔 D は ParaDAXAS の焦点と検出 器の距離 d に比例して広がっていることが読み取れ る。

エネルギー分解能 ΔE_{min} (FWHM)

次に像の幅について考える。図9や図10を水平方 = <u>(Kα1 と Kα2 のエネルギー差 [eV]) ×</u> (Kα1 の FWHM [mm]) 向に積算したグラフ (図 13) の FWHM を像の幅と定 義する。 $D \,[\mathrm{mm}]$

Dは2本の像の間隔を表す。



図 11: エネルギー分解能 ΔE と像の間隔について

エネルギー分解能を求めるため、D と K_{α1}のFWHM に着目する。

d = 58-118 mm の範囲で 10 mm ずつ撮像した結 果、像の間隔 D の変化は以下のようになった。





図 12: 像の間隔



図 13: d = 58 mm での水平方向の積算

d を 58 mm から 118 mm まで変化させたときの FWHM は以下のようになった。



図 14: 像の FWHM

検出器が ParaDAXAS の焦点から遠ざかるにつれ、 像の FWHM は増加している。図 14 の近似直線は K α 1 の FWHM = $(8.31 \times 10^{-2})d + 6.73$ となった。

5 Conclusion

 $d \ge D$ の比例式 y = 0.37x、 $d \ge K\alpha 1$ の FWHM の関係式 $y = (8.31 \times 10^{-2})x + 6.73$ を、エネルギー 分解能の式に代入して計算する。

$$\Delta E_{min} = \frac{\mathrm{Ka1} \geq \mathrm{Ka2} \, \mathcal{O} \\ \pm \\ \lambda \nu \\ \neq - \\ \frac{13 \, [\mathrm{eV}] \times \{(8.31 \times 10^{-2})d + 6.73\} \, [\mathrm{pix}]}{0.37d \, [\mathrm{pix}]}$$
$$= 2.92 + \frac{236}{d \, [\mathrm{mm}]} \, [\mathrm{eV}]$$

これより、分光実験で得られた ParaDAXAS のエ ネルギー分解能は

$$\Delta E_{min} = 2.92 + \frac{236}{d \,[\mathrm{mm}]} \,[\mathrm{eV}]$$

であることが判明した。これは検出器と ParaDAXAS との距離 *d* が増加するほどエネルギー分解能が向上 することを示す。

また、図 5 において我々の想定する *d* の値は *d* = 80 mm である。このときエネルギー分解能は

$$\Delta E_{min} = 5.87 \,\mathrm{eV}$$

となり、XRISM 衛星搭載の Resolve が持つエネル ギー分解能 ($\Delta E = 5-7 \text{ eV}$ @0.3-12 keV) と同程度の 値を示す (Goddard Space Flight Center 2023)。

Acknowledgement

この研究は瀬口剛弘氏、米山友景氏、坪井陽子氏、 井上諒大氏 (中央大学)、前田良知氏、伊師大貴氏 (宇 宙科学研究所) との共同研究である。

Reference

Goddard Space Flight Center 2023, https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xrism/about/index.html -index へ戻る

観測a29

ISS から観測する大気透過 CXB を用いた大気密度測 定の精度見積もり

岸本 拓海
ISS から観測する大気透過 CXB を用いた大気密度測定の精度見積もり

岸本 拓海 (近畿大学大学院 総合理工学研究科)

Abstract

高度 100 km 付近の超高層大気は、地球における気候変動や地震・火山などの影響を受ける一方、太陽から も影響を受けるため重要な研究対象である。しかし、人工衛星や気球によるその場観測が困難なため、観測 データが乏しい。そこで我々は、超高層大気を専門に測定する観測装置 SUIM を開発している。SUIM は、 我々が独自に開発している SOI-CMOS イメージセンサとコリメータを組み合わせることで、超高層大気を 透過した宇宙 X 線背景放射 (CXB) が受ける吸収を高度毎に測定し、大気密度を測定する。2025 年ごろに国 際宇宙ステーションの進行方向の曝露部に搭載し、地球の水平線方向を半年間観測する計画である。本研究 では、CXB の統計量を予想し、非 X 線バックグラウンド (NXB) と比較すること、で SUIM における大気 密度測定のフィジビリティスタディを行った。荷電粒子バックグラウンドに起因する検出器のデッドタイム と、ISS の姿勢に起因する視野のゆらぎを考慮すると、CXB の有効観測時間は全曝露時間の約 70%であり、 半年間で得られる CXB の統計量は 1 ピクセル当たり 1 photon で、高度 15 km 毎に 4.8 × 10³ photon が 得られることが分かった。また、SUIM の受光面積あたりの NXB を、検出原理の近いひとみ/SXI と同程度 と仮定すると、3-10 keV における CXB は NXB レベルの 21.5%であった。以上の結果から、SUIM で得ら れる半年間の CXB の統計量としては、高度 15 km 毎に大気密度を測定することが可能ではあるが、NXB レベルが高いため、実データに基づく NXB の見積もりが必要不可欠であることがわかった。

1 Introduction

高度 100 km 付近の高層大気は、気候変動、宇宙 天気予報、太陽と地球の相互作用などの観点から 重要な研究対象である (Roble & Dickinson 1989; Marubashi 1989)。一方、高度 100 km 付近の上層 大気は、気球や人工衛星などのその場観測が困難な ため、データが乏しい。Determan et al. (2007) は、 かに星雲とはくちょう座 X-2 のデータから、宇宙 X 線天体の大気掩蔽が上層大気の中性密度を測定する のに有効な方法であることを示した。また、Katsuda et al. (2021, 2023) では、かに星雲の大気掩蔽時の データを系統的に解析することで、中層圏と下部熱 圏の鉛直密度分布を測定した。しかし、X 線天文衛 星を用いた大気掩蔽の観測の問題点は、地球周回の 1 周ごとに 1 分程度、短時間しか観測できないため、 データが離散的であることである。

そこで、私たちは、大気掩蔽の長期的観測に特化し た新しい観測装置 SUIM (Soipix for observing Upper atmosphere as Iss experiment)を開発している。 この観測装置を、2025 年頃に国際宇宙ステーション (International Space Station; 以降 ISS)の曝露部に ある MISSE (Materials International Space Station Experiment) モジュールに 6ヶ月間搭載する予定であ る。ISS からは特定の天体を指向することが難しいた め、宇宙 X 線背景放射 (Cosmic X-ray Background; 以降 CXB)の大気吸収を、3–10 keV のエネルギー 帯域で観測する。SUIM の X 線検出器は、我々が独 自に開発した SOI-CMOS イメージセンサ「XRPIX」 である。検出器の前にコリメータを設置し、CXB の 入射角を決定することで、60–150 km の各高度にお ける大気中性密度を測定する。図 1 は SUIM 観測の 概略図である。



図 1: SUIM による大気観測の概略図。

本研究では、6ヶ月間の観測で得られる CXB の統 計量を推定し、非 X 線バックグラウンド (Non X-ray Background; 以降 NXB) と CXB を比較することで、 SUIM のフィージビリティスタディを行った。

2 CXBの統計量の推定

CXB は拡散放射であるため、その統計量は視野 (Field Of View; 以降 FOV)、検出面積、有効観測時 -間の積に比例する。以下では、SUIM の3つのパラ = メータを説明し、CXB の統計量を推定する。

2.1 SUIM の FOV と検出面積

FOV と検出面積は検出器の構成によって制約され る。図 2 に検出器の構成を、表 1 にパラメータを示 す。SUIM は 2 つの XRPIX 素子を搭載し、各素子に 対して 8 本ずつ、計 16 本のスリットを持つコリメー タを搭載する。コリメータのスリットは地球の地平線 に対して平行な向きで配置されている。1 スリット当 たり 73 (vertical) × 300 (horizontal) のピクセルがあ る。ピクセルサイズは 36 μ m × 36 μ m で、各ピクセル の FOV (空間分解能に相当) は 0.33 deg (vertical) × 22.0 deg (horizontal) である。垂直方向の空間分解 能は高度約 15 km に相当する。



図 2: (a) SUIM のコリメータと 2 つの X 線ピクセ ル検出器 XRPIX。(b) スリットに垂直な断面図。(c) スリットに平行な断面図。

2.2 有効観測時間

有効観測時間はバックグラウンドのカウントレー

| 表 1: Parameters | of the | SUIM | detector |
|-----------------|--------|------|----------|
|-----------------|--------|------|----------|

| Parameters | Values |
|-------------------------|---|
| 空間分解能 | |
| Ω_1 (vertical) | $0.33 \deg (\sim 15 \text{ km } に相当)$ |
| Ω_2 (horizontal) | 22.0 deg |
| ピクセルサイズ | $36 \ \mu m \times 36 \ \mu m$ |
| スリット毎のピクセル数 | 73 (vertical) \times 300 (horizontal) |
| 検出器毎のスリット | 8 |
| 検出器の数 | 2 |

トと ISS の姿勢に依存する。XRPIX は X 線だけで なく荷電粒子にも感度がある。XRPIX はピクセル毎 にトリガー出力機能を持ち、イベントごとに、入射 位置の周囲のピクセルのみを読み出すことができる。 読み出しとリセットには計 400 μs かかるため、この 時間がデッドタイムになる。そのため、バックグラ ウンドのカウントレートが高いほど検出効率が低下 する。そこで、ISS の全天 X 線監視装置 (MAXI) に 搭載されている放射線モニタ (RBM) のデータから、 ISS 軌道上のバックグラウンドのカウントレートを仮 定して CXB 検出効率のシミュレーションを行った。 図3のヒストグラム (灰色) は、6ヶ月間の観測におい て、各カウントレートが占める割合である。軌道上の 荷電粒子カウントレートは約 1 count s⁻¹ が支配的 であるが、10⁴ count s⁻¹ を超えることもある。荷電 粒子カウントレートは、一般に Cut-off Rigidity (以 降; COR) と負の相関を持つが、ISS が極付近を通過 する際には、Relativistic Electron Precipitation (以 降; REP) により、急激に増加することがある (Ueno et al. 2019)。各ビンのカウントレートにおける CXB の検出効率をシミュレーションした結果、ISS 軌道に おける観測効率は観測時間全体で、約89%であった。

ISS の姿勢は常に変動しているため、観測したい高 度 60-150 km が FOV から外れる可能性がある。そ こで、実際の ISS の姿勢データをもとに、6ヶ月の観 測中で観測対象の高度が FOV 内にある時間の割合を 求めた。その結果を図 4 に示す。6ヶ月の観測の内、 約 81%の割合で観測対象の高度が FOV 内にあると いう結果が得られた。

上記2つの要因に加え、日照ではSUIM が高温に

なり観測不可になる可能性を考慮し、日陰のみ観測 する想定で最終的な有効観測時間を見積もった。予 想される 6ヶ月間の有効観測時間は 5.7×10⁶ s (全観 測時間の約 36%) であるという結果が得られた。



図 3: (灰色) ISS 軌道上の荷電粒子数のヒストグラ ム。(赤) 各ビンにおける CXB の検出効率のシミュ レーション。



図 4: 実際の ISS の姿勢データを元に想定した、1日 のうち観測対象の高度が FOV 内にある時間の割合。

2.3 CXB 統計量

3–10 keV 帯域の CXB flux は、Kushino et al. (2002) によると、 1.82×10^{-6} photon s⁻¹ keV⁻¹ で ある。CXB flux と SUIM の FOV、検出面積、有効観 測時間から、 $6 \not = \beta$ の曝露期間に得られる統計量は、1ピクセルあたり 1 photon と予想できる。高度 15 km ごとには、 4.8×10^3 photon が得られることを意味 し、CXB の大気吸収を評価するのに十分な統計量で ある。

3 NXB flux の推定

CXB の大気吸収を評価するのに十分な統計量が得 られることはわかったが、軌道上の NXB が顕著であ れば CXB の観測が困難である。そのため本章では、 SUIM で予想される CXB flux と NXB flux の比較 を行う。SUIMのNXBを正確に見積もるには、本来 は粒子シミュレーションが必要であるが、ここでは SUIM の検出面積あたりの NXB を、X 線天文衛星 「ひとみ」搭載の軟 X 線撮像装置 (SXI) (Tanaka et al. 2018) と同程度と仮定し比較を行う。SXIのNXB スペクトル (Nakajima et al. 2018) を SUIM の検出 面積でスケーリングし、SUIM で予想される CXB レ ベルと比較した。結果を図5に示す。3 keV 付近で は、CXB レベルは NXB と同等であるが、3 keV 以 上では NXB が顕著である。実際、3-10 keV におけ る CXB flux は NXB レベルの 21.5% であった。した がって、大気吸収された CXB のスペクトルを得るた めには、NXBのスペクトルを差し引く必要がある。 我々は、検出器の一部(約15%)を遮光して NXB ス ペクトルのみを測定する領域を設けることを検討し ている。



図 5: (赤) ひとみ/SXI (Nakajima et al. 2018) で得 られた COR 4.0–5.0 GV (上) と 9.0–10.0 GV (下) の NXB スペクトル。(黒) SUIM で予想される CXB レベル。

4 Conclusion

本研究では、CXB 統計量とNXB レベルを推定す ることにより、SUIM のフィージビリティスタディ を行った。SUIM の FOV、検出面積、有効観測時間 から、6ヶ月間の観測における CXB 統計量は1ピク セルあたり1 photon と見積もられた。これは高度 15 km ごとに 4.8 × 10³ photon が得られることを意 味し、大気密度測定に十分な統計量である。一方で、 SUIM の検出面積あたりの NXB がひとみ/SXI と同 程度であると仮定すると、3 keV 以上では、NXB が 支配的 (CXB レベルは NXB レベルの 21.5%) にな ると予測された。そこで我々は、NXB スペクトルの みを測定する領域を検出器に設けることを検討して いる。

Reference

- Roble, R. G. & Dickinson, R. E., "How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere?", 1989, Geophysical Research Letters 51, 197
- Marubashi, K., "The space weather forecast program", 1989, Space Science Reviews 51, 197
- Determan, J. R. et al., "Measuring atmospheric density with x-ray occultation sounding", 2007, Journal of Geophysical Research 112, A06323
- Katsuda, S. et al., "New measurement of the vertical atmospheric density profile from occultations of the crab nebula with x-ray astronomy satellites suzaku and hitomi", 2021, Journal of Geophysical Research 126, A028886
- Katsuda, S. et al., "Long-term density trend in the mesosphere and lower thermosphere from occultations of the crab nebula with x-ray astronomy satellites", 2023, Journal of Geophysical Research 128, A030797
- Ueno, H. et al., "Radiation dose during relativistic electron precipitation events at the international space station", 2019, Space Weather 18, W002280
- Kushino, A. et al., "Study of the x-ray background spectrum and its large-scale fluctuation with asca", 2002, Publications of the Astronomical Society of Japan 59, 327
- Tanaka, T. et al., "Soft x-ray imager aboard hitomi (astro-h)", 2018, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems 4, 011211

Nakajima, H. et al., "In-orbit performance of the soft xray imaging system aboard hitomi (astro-h)", 2018, Astronomical Society of Japan 70, 21 --index へ戻る

観測a30

宇宙X線による超高層大気の密度測定に向けたコリ メータ開発

桒野 慧

宇宙 X 線による超高層大気の密度測定に向けたコリメータ開発

(近畿大学大学院総合理工学研究科)

Abstract

高度 100 km 付近の超高層大気は、地球温暖化により密度変化するなど、気候変動を予測する上で重要な 研究対象である。我々は、国際宇宙ステーションから宇宙 X 線背景放射 (CXB)の大気減光を観測して、高 度 100 km 付近の超高層大気の密度を測定する計画 SUIM を進めている。独自に開発している SOI ピクセ ル検出器 (SOIPIX)を搭載し、コリメータと組み合わせることで高度毎の密度分布を測定する計画である。 本研究では以下の 5 つの要求を満たすようコリメータの設計を行った: (1)高度 60–150 km の超高層大気 を観測するための、視野は 6.7°×48°、(2)高度 13.5 km 毎に密度を測定できるよう、SOIPIX の1 ピクセ ル (36 µm 四方)あたりの視野 (空間分解能)は 0.34°、(3)ペイロードの大きさの制限から、コリメータの 高さは 20 mm 以下、(4) コリメータの隣合うスリットへ 15 keV の X 線が透過してしまう割合は 5 %以下、 (5) SOIPIX を搭載した基板とコリメータ間の、熱膨張による相対位置のズレは 1 ピクセル以内。3D-CAD を用いてこれらの要求をすべて満たすコリメータを設計し、それをもとに試作品を製作した。

1 研究背景

地球の大気には、地上から高度 10 km までに対流 圏、高度 10 km から 50 km までに成層圏、高度 50 km から 90 km までに中間圏、高度 90 km から 400 km までに熱圏と電離圏が存在し、特に中間圏、熱 圏、電離圏は超高層大気と呼ばれている。下層大気 で二酸化炭素が増加し温暖化すると、超高層大気は 冷却され低密度化する (Roble. & Dickinson 1989)。 すなわち下層大気が変動することで起こる気候変動 の影響が、超高層大気の密度の変動として現れる。し かし高度 100 km 付近の超高層大気は、気球 (高度 50 km 以下)や人工衛星 (高度 300 km 以上) でその場観 測が不可能なため、大気の中で最もデータが乏しい 領域であり、気候変動・気象現象の理解や、宇宙天 気予報の観点で重要である。

1.1 先行研究による超高層大気の観測

先行研究 (Katsuda et al. 2020) では、X 線天文衛 星がかに星雲を観測中、かに星雲がたまたま夜地球 の地平線にかかる時間に、X 線の吸収から超高層大 気の密度を測定することに成功している。図1は、先 行研究で観測された、大気吸収によるかに星雲のスペ クトル 変化である。大気吸収により、低エネルギー 側のカウント数が減少していることがわかる。しか し、そのような機会は年に 1-2 日に限られ、データ は離散的であった。



図 1: 先行研究 (Katsuda et al. 2020) で観測された 大気吸収による、かに星雲 のスペクトル変化

1.2 ISS からの超高層大気の密度観測プロ ジェクト

我々は、高度 100 km 付近の超高層大気の密度を 宇宙 X 線背景放射 (Cosmic X-ray Background; 以降 CXB)の大気透過を用いて観測するため、 国際宇宙 ステーション (ISS)の曝露部への搭載を目指した大気 観測専用の X 線カメラの開発を行っている。ISS 上 の材料暴露実験 MISSE モジュール に、我々が独自 に開発してきた次世代 X 線検出器である SOI ピクセ 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

ル検出器「SOIPIX」を半年間搭載する計画である。 CXB は、活動銀河核にある巨大ブラックホールなど の無数の点源からの X 線であり、宇宙から等方的に やってくる。先行研究で使われていた X 線天文衛星 とは違い、図 2 のように、大気を常に同じ姿勢で観 測するので、24 時間超高層大気の密度を測定するこ とが可能となる。重要なことは、高度ごとに大気密 度を測定することである。ISS 曝露部に X 線カメラ である SOIPIX とコリメータを半年間設置する。夜 地球では CXB の大気透過を観測し、昼地球では太 陽 X 線の大気反射を観測する。SOIPIX の前にコリ メータを置くことで、X 線の入射位置から X 線が通 過した大気の高度がわかる。

2 研究目的、研究方法

本研究の目的は、SUIM プロジェクト用のコリメー タの設計である。本研究では、3D-CAD ソフトを使っ てコリメータを設計した。コリメータを設計する上 で以下の5つの条件を考慮した。一つ目は、X線検 出器全体が捉える「視野」である。垂直方向には高 度 60–150 km の超高層大気を観測し、水平方向には ISS の筐体が視野に入らないようにするため、視野は 6.7°×48°とする。二つ目は、高度ごとに密度を測定 する際に、1 ピクセルごとの視野、すなわち「空間 分解能」である。13.5 km 毎に密度を測定できるよ う、垂直方向に 0.34°の視野を持つように設計する。 三つ目は、コリメータのサイズである。ペイロード のサイズから、コリメータの高さは 20 mm 以下でな ければいけない。四つ目は、「X 線透過率」である。 15 keV の X 線が、コリメータのスリット以外の部分 や隣のスリットへ透過する割合を5%以下にする。五 つ目は、「温度膨張率」の影響である。温度変化に応



図 2: MISSE に搭載した X 線カメラよる CXB の観 測方法

じた、素子を載せる基板とコリメータの素材の熱膨 張による相対位置のズレは1ピクセル以内 (36 μm 平方)となるようにする。3章では、以上5点をした 設計を行った。

3 コリメータの開発

3.1 視野と空間分解能

図3は、視野と空間分解能を考えるためのコリメー タのスリット部分の構造を示したものである。高さ をl、スリットのピッチをd、スリット幅を Δd とす ると、スリット全体での視野の大きさ ϕ °と1ピク セルごとの視野、すなわち空間分解能 θ °は、

$$\Phi = \frac{180}{\pi} \frac{d + \Delta \ d}{l} \tag{1}$$

$$\theta = \frac{180}{\pi} \frac{\Delta d}{l} \tag{2}$$

と表せる。



図 3: コリメータの構造

まず垂直方向の視野と空間分解能について考える。 空間分解能はできる限り高い方がよいため、1 ピク セルの見る視野を可能な限り小さい値に設計する必 要がある。(1) 式から分かるように、コリメータのス リット幅 Δd と空間分解能 θ° には比例の関係がある。 そのため、 Δd は小さい方が望ましい。しかし現実的 に金属を加工する際の Δd の限界値はおよそ 100 μ m である。視野については、高度 60 km より低いと X 線は吸収されすぎてしまい、逆に高度が 150 km よ り高いと大気密度が低すぎて吸収が観測できないた め、60–150 km を観測対象とする。ただし、観測装 置の取り付けには誤差があり、ISS 自体にも 1 度程度 の姿勢の揺らぎがあるため、視野に観測したい領域 が入らない可能性がある。このことを考慮して、観 測したい領域の3倍分の視野となる高度0-270 km の範囲を観測するように設計した。以上を全て考慮 し、 $\Delta d=0.1 \text{ mm}$ 、d=2.6 mm とした。

続いて水平方向視野については、55°で構造物が 視野に入ってしまう。また、こちらも ISS の姿勢の 揺らぎ、取り付け誤差等を考慮する必要がある。水 平方向視野が 48° になるように設計を行った。以上 の点を反映させてコリメータを設計した。すなわち、 コリメータの高さを 20 mm、素子とコリメータの隙 間を 21.5 mm、水平方向の視野に対応するコリメー タ上部スリットの横幅とコリメータ下部の横幅を9 mm にしてそれを2列用意した。CXB のスペクトル を観測するためには、荷電粒子などの非 X 線起源の イベント (Non X-ray background 略称 NXB) が X 線イベントと判定されてしまうので、そのスペクト ルを引く必要がある。NXB はコリメータを貫通して 観測されるので、あえて NXB のみを観測できるよ うにコリメータで素子に影ができる部分を作る。今 回の設計では2列用意するスリットの間に 5.9 mm の壁を作った。

X 線透過率と熱線膨張率 3.2

コリメータを作る上では、1 スリット内に入射した X線が内壁を透過して隣のスリットに入り込んでし まってはいけない。またスリットの蓋も、視野を制 限するために、X 線が貫通しないように蓋として機 能しなければいけない。素材によって X 線の透過率 の違いで必要な厚みが変わってくるため、素材を何 にするかについて考える必要がある。そしてそれと ともに、素子を載せる基板とコリメータの素材の違 いについても考えなければいけない。この二つの素 材の温度による温度膨張率の差は、ISS での温度変 化で位置関係にズレを生じさせてしまう。膨張率の 計算は、線膨張率をρ、元の長さをτ、温度の変化 量を ΔT とすると、全体の変化量 $\Delta Total は以下の$ 式で表せる。

$$\Delta Total = \rho \tau \Delta T \tag{3}$$

各種素材の熱線膨張率を表1にまとめた。素子を載 せる基板の素材は加工のしやすさからガラスエポキ シ樹脂を採用する。それに熱線膨張率が近く、重量 も小さいアルミニウムをコリメータの素材にするこ あるので、スリットの傾斜角度は 25.26°となってい

| 表 1・ | 各種素材の熱線膨張率 |
|-------|------------|
| 11 1. | |

| 素材 | 熱線膨張率 10 ⁻⁶ (m/°C) |
|-----------|-------------------------------|
| SUS420J2 | 10.3 |
| ガラスエポキシ樹脂 | 21 |
| アルミニウム Al | 23.5 |
| タングステン W | 4.3 |
| 純銅 Cu | 16.5 |

とにした。実際の ISS では-20 – 50 °Cの間で温度変 化が起こるので熱線膨張率による素材のズレは次の ようになる。コリメータをアルミニウムにして素子 を搭載する基板をガラエポにした時の熱線膨張率の 差は 2.5(×10⁻⁶/℃) となり、素子は縦 21.88 mm、 横 26.4 mm なので、70 ℃の変動でズレは縦が 3.829 μm、横が 4.62 μm となる。素子の1ピクセルのサ イズが 36 μm なのでズレを気にする必要がないこと が分かる。コリメータの材質をアルミニウムにする 場合、15 keV の X 線を 95 % 遮蔽するスリットの厚 みは最低でも 1.5 mm は必要になる。今回 Δd=0.1 mm、d=2.6 mm であるが、隣りのスリットまでの距 離は 2.7 mm にしている。その理由として、図5に



図 4: ピッチ間の影ピクセル

あるように、ピッチ同士の間に 0.1 mm の影を設け ることで、約3ピクセル分(1ピクセル 36 μm)の 余白ができるので熱膨張や振動によるズレが生じて も隣のスリットの観測データが映り込んでくること を防げるからである。

3.3コリメータの試作品の設計

これまでに述べたコリメータへの要求をまとめた ものが表2である。MISSE は ISS の進行方向から8 °上を向いている。そのため高度 100 km を見るには コリメータのスリットは 25.26°下を向かせる必要が

| 垂直方向視野 $\phi(垂直)$ | 270 km=約 6.69 ° |
|-------------------|--------------------|
| 空間分解能 θ(垂直) | 約 13.5 km=0.338 ° |
| コリメータ上部スリット垂直幅 Δd | 0.1 mm |
| ピクセル部照射垂直幅 (ピッチ)d | 2.6 mm |
| コリメータ高さ <i>l</i> | $20 \mathrm{~mm}$ |
| 素子とコリメータ間の距離 | 21.5 mm |
| コリメータ上部スリット水平幅 | $9 \mathrm{mm}$ |
| コリメータ下部スリット水平幅 | $9 \mathrm{mm}$ |
| 水平方向視野 $\phi(水平)$ | 約 48 ° |
| 水平方向スリット間距離 | $5.9 \mathrm{~mm}$ |
| コリメータのピッチ | $2.7 \mathrm{~mm}$ |
| コリメータ下部のスリット垂直幅 | 1.2 mm |
| コリメータ内部スリット間の壁の厚み | 1.5 mm |
| スリット傾斜角度 | 25.26 $^{\circ}$ |
| 内壁傾斜角度 | 64.74 $^\circ$ |
| | |

表 2: コリメータ設計の具体値

る。実際に設計したコリメータが図5である。図は断



図 5: 設計試作

面を斜め上と真横から見ている。上蓋のスリットも 内壁傾斜角度と同じ角度で傾斜させてあるが、アル ミの厚み 1.5mm ではスリット幅 Δd=0.1 mm の時、 視野や空間分解能に影響を与えないようにスリット を削って加工する必要がある。

4 今後の展望

この設計には問題点がある。図7にあるように、地 球は丸いため、水平方向の視野内において同じ高度 を見ることができないので、垂直方向の空間分解能 を悪くしてしまう。よって、垂直方向の空間分解能



図 6: 水平視野内における高度差

を下げるか水平方向の視野を狭める必要がある。今 後の展望としては、現状の課題を踏まえた設計をつ くることである。

Reference

- Roble, R. G. & Dickinson, R. E., "How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean struc- ture of the mesosphere and thermosphere?", 1989, Geophysical Research Letters 51, 197
- Katsuda, S. et al., "Long-term density trend in the mesosphere and lower thermosphere from occulta- tions of the crab nebula with x-ray astronomy satel- lites", 2023, Journal of Geophysical Research 128, A030797

-index へ戻る

観測a31

GEO-X 衛星用 MEMS Wolter I型望遠鏡の開発

小笠原 勇翔

GEO-X 衛星用 MEMS Wolter I型望遠鏡の開発

小笠原 勇翔 (東京都立大学大学院 理学研究科)

Abstract

我々は地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X への搭載を目指し、 MEMS 技術を用いた X 線望遠鏡の開発を進めている。望遠鏡は薄い Si 基板にドライエッチングで微細穴を開け、側壁を反射鏡として用いる。そのために高温アニール、研削・研摩、高温塑性変形、Pt 成膜、組立というプロセスを組み合わせて、基本的にイン ハウスで望遠鏡を完成する。

1 はじめに

X線に対する物質の屈折率は1よりわずかに小さ いため、宇宙X線望遠鏡には全反射を利用した斜入 射光学系が広く用いられる。X線は地球大気中で吸 収されてしまうため、人工衛星を用いた観測が主流 となる。そのため望遠鏡には軽量性が求められる。し かし、従来の鏡の製法では、角度分解能の良い鏡は 剛性を高めるため厚くする必要があり、重くなると いうトレードオフの関係があった。

そこで我々のグループでは MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて世界最軽量の望遠 鏡を開発している (Ezoeet al. 2010 Microsys. Tech. 等)。薄い Si 基板に微細穴を加工し、側壁を反射鏡 として使用する方法であり、基板が薄いため世界最 軽量となりうる。我々のグループでは本手法で世界 初の X 線集光と結像を実証してきた。

本望遠鏡の世界初搭載を目指すのは地球磁気圏 X 線撮像を目指す GEO-X 衛星 (打ち上げ目標 2025-27 年) である (Ezoe et al., 2023, JATIS)。50 kg 以下 の超小型衛星であることから、望遠鏡には軽量性が 求められる。

2 MEMS X線望遠鏡の製法

本望遠鏡の最新のプロセスフローを図1に示す (辻 修論 2024、関口修論 2024)。直径 10 cm 厚さ 400 µm の Si (111) 基板に微細穴を加工する。まずドライエッ チングにより幅 20 µm の微細穴を約 45000 個形成 する。

次に高温アニール技術を用い、Si を高温 (~1100 °C) に保ち、原子の自己拡散を促して側壁を平滑化



図 1: MEMS X 線望遠鏡のプロセスフロー。

する。アニール後の側壁には基板端にドライエッチ ングに起因するバリと呼ばれる構造が残る。そこで 研削研磨によって基板端の形状の悪い部分を除去す る (Fukushima et al., 2002, Optics Express)。これ によって角度分解能は 10 分角台から 2 分角台まで向 上する。

さらに宇宙からの平行 X 線を集光するように高 温塑性変形という手法で基板を球面変形する。日本 発祥の手法であり (Nakajima, et al, 2005, Nature Materials)、高温でプレス変形することで結晶面をず らし、塑性変形を可能にする。2 回反射用に基板は2 枚準備する。

変形後の基板に、原子層堆積法を用いて Pt 成膜 を施し X 線の反射率を向上させ、最後に基板 2 枚を 正確に組み合わせることで、MEMS Wolter I 型望遠 鏡が完成する。



図 2: GEO-X 衛星用の MEMS X 線望遠鏡の試作品。

3 試作品

我々は上記の製法に則って性能実証のための望遠 鏡を製作した (図 2)。ドライエッチング後の基板の側 壁は形状精度は 3-5 分角と高く、アニールによって 表面粗さの要求である $\lesssim 1 \text{ nm rms}$ も満たすことが できた。基板厚が 400 μ m から 300 μ m になるよう に、研削研磨によって基板端の構造を除去した。

そして曲率半径 1000 mm になるように変形した 基板の形状を測定した結果、曲率半径 1067.4 mm、 標準偏差 14.3 μ m が得られた。曲率半径 333 mm になるように変形した基板は、曲率半径 334.3 mm、 標準偏差 5.7 μ m が得られた。基板に 30 nm 厚の Pt を成膜して X 線反射性能を向上させ、最後に 2 つの基板を組み立て MEMS Wolter I 型望遠鏡とし、 X 線を照射して全体性能を確認した。図 3 がその結 果であり期待通りの鋭い集光結像を確認できた。

4 まとめと今後

我々は次世代の宇宙 X 線観測に向けて MEMS 技術を用いた独自の超軽量望遠鏡をほぼ In-house で開発しており、GEO-X 衛星での世界初の宇宙実証を



図 3: 望遠鏡の集光結像の様子。

目指している。今回試作した性能実証用モデルでは、 各プロセスの有用性を確かめることができた。今回 得られた成果と課題を活かして衛星搭載品の製作を おこないたい。また、超軽量であるため、太陽系探 査衛星にも搭載が可能であり、今後の様々な太陽系 探査ミッションにも搭載していきたい。

Reference

- [1] Y. Ezoe et al., 2010, Microsys. Tech., 16, 1633
- [2] Y. Ezoe et al., 2023, J. Astron. Telescope Instrum. Systems, 9, 034006, 2023
- [3] 辻修論、東京都立大、2024
- [4] 関口修論、東京都立大、2024
- [5] A. Fukushim et al., 2022, Optics Express, 30, 25195
- [6] K. Nakajima, et al., 2005, Nature Materials, 4, 47
- [7] Numazawa, et al. 2024 SPIE

-index へ戻る

観測a32

MEMS 技術を用いた Wolter I 型望遠鏡の熱耐性の 検証

宮内 俊英

MEMS 技術を用いた Wolter I 型望遠鏡の熱耐性の検証

宮内 俊英 (東京都立大学大学院 理学研究科)

Abstract

我々は地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X への搭載に向け MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技 術を用いた超軽量な Wolter I 型 X 線望遠鏡の開発を進めている。我々は GEO-X 衛星で想定される熱環境 への耐性の検証のために新たに熱サイクル試験系を構築した。そして試作望遠鏡を用いて試験を実施し、改 善点を見いだした。

1 はじめに

我々は地球磁気圏 X 線撮像衛星 GEO-X (GEOspace X-ray imager) [1] に搭載予定の望 遠鏡の開発を行っている。GEO-X は 50 kg 以下 の超小型衛星であり、これに適した超軽量な望遠鏡 として、我々は MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を活用した独自の新しい望遠鏡を開 発している。望遠鏡は曲率の異なる 2 枚の Si 基板 を重ね、接着して製作する。本望遠鏡の衛星搭載は これが初めてであるため、望遠鏡は宇宙環境に対し て各種の耐性を持つかを確認する環境試験が必要で あり、この一環としてすでに放射線や音響といった 試験は実施済みである。今回は熱環境に対する耐性 を確認するための試験系を新たに東京都立大学に構 築し、試作望遠鏡で熱サイクル試験を行い、その前 後で基板に破損や歪みが生じていないか検証した。

2 実験セットアップ

実験セットアップを図1に示す。恒温槽、試験サ ンプル、試験治具、サンプルと治具の温度計測のた めの熱電対、恒温槽内部の温度・湿度を計測するた めの環境センサ及びサンプルをリアルタイムに監視 するためのカメラからなる。センサとカメラは恒温 槽外に設置したデータロガーとラズパイによってそ れぞれ制御する。

熱サイクル試験の条件は、軌道上での熱環境の推 定値 [2] を基準として、JAXA 試験標準を参考に3 段階に分けて設定した。最も厳しい条件は温度範囲 -5~45°Cかつ最低最高温度での晒し時間1hr、温 度変化率1°C/min であり、これを8サイクル行っ



図 1: 東京都立大学に構築した熱サイクル試験系。

た。その他の2条件についてそれぞれ温度範囲5~35 °C、0~40°C、サイクル数1、2として実施した。こ れら温度範囲は衛星試験における Qualification test level、Acceptance test level、軌道上での機能維持及 び保存温度に相当する。

3 実験結果

我々は試験サンプルとして、2枚の光学系基板を接 着して組み立てた熱サイクル試験用望遠鏡を製作し た。接着剤には広い温度耐性、高い熱伝導度、低い アウトガス特性等を併せ持つ AREMCO BOND 568 を採用した。熱サイクル試験系に設置し、基板と治 具の 10 ヶ所に取り付けた熱電対の温度プロファイル より、設定通りの条件で試験ができていることを確 認した。図 2 に試験の様子を示す。

試験前後に行ったサンプルの目視及び光学顕微鏡 観察から、接着剤の剥離や基板の破損がないことを



図 2: 試験サンプルと熱電対の貼付箇所及び温度プロ ファイルの例。

確認した。一方で、非接触三次元測定装置を用いた 表面形状の詳細から、基板の一部において、合格基 準として設定した±15 µm を超える変位が発生して いることがわかった。この大きな変位が見られたの は2枚の基板のうち1段目基板であった。ここで接 着部の模式図を図3に示す。1段目基板は望遠鏡と しての支持機構であるリングに直に接着されており、 リング側の面 (凸面; 図3中の下側)とその反対側の 面 (凹面)とで接着剤の量に偏りが生じる。これによ り、熱変化で接着剤が変形した際に基板の凸面と凹 面にかかる応力に差が生まれたことが変位発生の原 因と考えられる。接着部に土台を設け、基板凸面の 接着剤の量を減らすことで、凹面との差を小さくで きる。今後、この新たなサンプルを用いて熱サイク ル試験を再度実施する予定である。



図 3: 基板同士の接着部の模式図。本試験サンプルの 様子 (左) と新たに考案した手法 (右)

4 まとめと今後

我々は GEO-X 衛星への搭載を目指す望遠鏡の熱 耐性検証のために、熱サイクル試験系を東京都立大 学に構築し、試作品を用いて試験を実施した。その 結果、望遠鏡サンプルの温度が想定通り温度サイク ルに追従していることが確認できた。一方で、試験 後の観察から、基板の一部において接着手法に起因 すると思われる変位が確認された。この改善策とし て新たな接着手法を確立済みであり、2024年の夏に 再度試験を実施する予定である。

Reference

- [1] Y.Ezoe et al, 2023, JATIS, 9, 034006
- [2] 村川修論 2024, 東京都立大

-index へ戻る

観測a33

Wolter I型反射鏡における可視光評価システムの開発

康 哲洙

Wolter I型反射鏡における可視光評価システムの開発

康 哲洙 (愛媛大学大学院 理工学研究科)

Abstract

我々は、高い集光力と分解能を併せ持つ X 線望遠鏡を作成するため、Wolter I 型反射鏡の開発に取り組ん でいる。本研究では、可視光を用いた簡易評価でも反射鏡の性能評価を行えるようにするため、測定装置と データの解析ツール XTENSoft (X-ray Telescope Evaluation Soft)の開発を行なった。装置開発では、反 射鏡の任意の場所を測定可能にするため、回転ステージの製作と測定台へスリットの取り付けを行った。解 析ツールの開発では、得られた反射像データから光量の重心座標(WAP)と結像性能(HPW)の算出を行 う XTENSoft を作成した。これらを用いた可視光測定では、HPW と WAPの測定結果を得ることができ、 WAP の値の変動は測定時に反射鏡を回転させることによる首振りの影響が大きな割合を占めることが分かっ た。また、本研究の可視光測定と亀谷(2021)の X 線を用いた測定による HPW の比較から、反射鏡の可視 光評価によって、X 線測定の際に結像性能が悪くなる箇所の抽出が可能であることが分かった。

1 導入

ブラックホール周辺など、高エネルギーの領域か らは X 線が放射されており、その X 線を精密に観 測できれば高エネルギー現象にかかわる詳細な物理 機構の解明ができると考えられている。そのために は高集光力と高角度分解能を併せ持つ X 線望遠鏡の 開発が望まれる。また、X 線は地上観測ができない ため、観測衛星を宇宙空間に打ち上げる必要があり、 装置の軽量化も求められる。そこで我々は、高い成 型性を持ちながらも軽量かつ丈夫な素材である炭素 繊維強化プラスチック(CFRP) を用いて、回転放 物面 (P面)と回転双曲面 (H面)における 2回の 全反射によって X 線を集光する Wolter I 型反射鏡 を作成し、その反射鏡を用いた X 線望遠鏡の開発を 行っている。最終目標は、 15 arcsec の分解能を持 つ X 線望遠鏡の作成であるが、現在は 60 arcsec 以 下の分解能を持つ反射鏡の製作を目指している。

反射鏡の性能評価は、宇宙科学研究所の X 線発生 装置を用いて行っているが、利用できる機会が限ら れているため、可視光を用いた簡易評価を大学の実 験室で行っている。しかし、従来の可視光評価では 反射鏡全体による可視光像を一度に撮影していたた め、結像性能を表す HPW(Half Power Width)の 値と反射鏡の測定個所の対応が不明確であった。そ れにより、反射鏡の各箇所に対して行われる X 線を 用いた測定の結果と対応がつかず、可視光測定では X 線望遠鏡としての性能評価を十分に行えないこと が問題となっていた。そこで本研究では、可視光測 定においても反射鏡の任意の位置の測定を行えるよ うに装置の改良を行い、得られた可視光反射像の測 定画像に対して光量の重心座標(WAP)と HPW の 測定を行う解析ツールの開発を行なった。そして、X 線と可視光による測定結果を比較し、可視光測定で も X 線望遠鏡の性能評価を実施できるようにした。

2 可視光測定と解析方法

2.1 可視光測定の試験系と装置作成

可視光測定では、図1のように平行光源装置から出 た可視光を測定台に設置した X 線反射鏡に反射させ、 P 面と H 面両方の1回反射像をカメラで撮影し、得 られた画像を解析することで反射鏡の HPW と WA の測定を行っている。平行光源装置にはニュートン 式望遠鏡の接眼レンズ部分に光源装置を取り付けた ものを用い、可視光反射像を撮像する検出器として デジタルカメラを使用している。



図 1: 可視光測定を行う試験系の概略図。

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

反射鏡の任意の場所を測定可能にするため、図2 のようにスリット付きの回転ステージを製作した。反 射鏡を回転させるために、X 線望遠鏡のハウジング のリング部分にリングギアを取り付け、測定台には 駆動ギアとそれを回転させる駆動モーターを取り付 けた。リングギアと駆動ギアの歯数はそれぞれ 120 と 12、駆動モーターの基本ステップ角度が 0.024° となっているため、駆動モーターのコントローラー を half step 設定で作動させた場合、反射鏡の回転は 0.0012°間隔の制御が可能となっている。そして、反 射鏡の特定箇所のみによる反射像を測定するために、 測定台の可視光入射側にスリットを取り付けた。我々 は内径 φ 200 mm の 1/4 周鏡を製作しているため、 スリットの高さはハウジングの下側 45°を覆い隠せ るようにした。また、スリットの隙間面による可視 光の反射を防ぐため、入射方向に対して 45°方向に スリット間を削った。スリット間隔の制御は、マイ クロメーターによって行う。



図 2: 可視光測定に用いる測定台。

2.2 測定結果の解析ツール開発

可視光測定では、図3左側のような、P面とH面 による1回反射像が写った画像が複数枚得られる。そ の画像から反射像のWAPとHPWの算出を行う解 析ツール XTENSoft ¹(X-ray Telescope EvaluatioN Soft)を開発した。XTENSoft では、(1) BG フェー ズ(Batten Girls ではなく Back Ground の略)、(2) さがしものフェーズ²、(3) optHPW フェーズの3つ のフェーズによってWAPと HPW の算出を行う。



図 3: 可視光測定の解析ログ画像。この画像では P 面の各計算領域を緑の四角で表している。

BG フェーズでは、測定画像に現れるノイズ成分 (宇宙線やカメラ素子のホットピクセルなどによる影 響)を除去するために、可視光測定の前後に撮影さ れる複数枚のバックグラウンド (BG) 画像から BG 成分の計算を行う。初めに、CR2 形式で取得された BG 画像を fits 形式に変換し、全 BG 画像から各ピ クセルにおける平均光量を BG 成分として算出する。

さがしものフェーズでは、測定画像から WAP の探 索と可視光の強度分布の作成を行う。測定画像 (CR2 形式)を fits 形式に変換した後、天体解析ソフト ds9 で画像を開いて P 面と H 面それぞれの解析領域を 設定する (図 3)。ここで設定した領域が全ての画像 に対する WAP 探索で適用される。領域設定後、全 ての測定画像から BG 成分を差し引き、P 面と H 面 の両方の解析領域内において光量が 3 番目に大きい 座標をそれぞれ取得する。取得した座標を中心とす る幅 201 pixel の正方形領域 (図 3 (中))における光 量の重心座標を算出し、重心座標を中心とした画像 の y 方向 201 pixel における光量の強度分布 (図 4) を取得する。この際、重心の x 座標 前後 1 pixel を 通る幅 3 pixel の強度分布を足し合わせている。

optHPW フェーズでは、さがしものフェーズで作 成した強度分布から HPW を以下のように求めてい る。図4の強度分布で光量の積分値を計算する。図4 の強度分布について、重心座標を中心として、左右 1 pixel 毎に光量を足していき、足し合わされた値が 積分値の 1/2 を超えた時に足し合わせを止める。足 し合わせが行われたピクセルの幅にピクセルスケー ルを掛け合わせることで HPW を求める。

以上の処理から、各測定位置における 可視光像の 重心座標 (WAP)と HPW が得られる。

¹ばってんソフト(九州を拠点に活動するアイドルグループ 「ばってん少女隊」より命名)

²佐賀がモチーフのばってん少女隊の曲「さがしもの」に由来



図 4: さがしものフェーズで得られる測定画像 y 方向の強度分布。中心は光量の重心座標となっている。

2.3 反射鏡サンプルの可視光測定

本研究で作成した測定台を加えた試験系と XTEN-Soft を用いて、亀谷 (2021) で X 線測定がなされた CFRP 製の Wolter I 型 1/4 周反射鏡サンプル の可 視光測定を行った。このサンプル はスリット幅 2 mm で X 線測定がされていたため、同じスリット間隔で 可視光画像を取得した。可視光像の撮影は、1/4 周反 射鏡の端を始点として、モーター 0 $\leq n \leq$ 75、000 pls 間において 300 pls 毎に計 251 回行った。反射像撮 影の前後に光源を消した状態で BG 画像を 5 枚ずつ 撮影した。

3 測定結果

1/4 反射鏡サンプルの可視光測定から、HPW と WAP の値を得ることができた (図 5)。HPW の値は P、H の両方で反射鏡中心付近 (~ 0°) と ±40° より も外側で大きくなり、結像性能が悪化していること が判明した。±40° よりも内側における WAP の値 (誤差はその位置における HPW とした) は、P 面で は 900 から 1200 pixel まで変化し、H 面において も 300 から 600 pixel まで変化していた。可視光測 定のピクセルスケールは 2.59 arcsec/pixel のため、 HPW 以上の結像位置変動が起きていることが分かっ た。WAP の変動は、反射鏡の光軸と測定台の回転 軸のズレによる首振りにより発生した可能性があっ た。そこで、360 deg 毎に位相が元に戻る周期関数

$$y = a\sin\left(\frac{\pi}{180}(x+b)\right) + c\sin\left(\frac{\pi}{30}(x+d)\right) + e$$



図 5: 1/4 周反射鏡の各測定位置における HPW (上) と WAP (下)の結果。横軸は反射鏡の中心を動径方 向とした中心角で測定位置を表している。

で測定結果を説明できるかを確かめたところ、決定 係数 r² が 1 に近いフィッティング結果 (図 6、表 1) を得ることができ、WAP の変動は反射鏡の首振り により発生した可能性があることを示すことができ た。また、ベストフィット関数と WAP の残差の標 準偏差は P・H 面でそれぞれ 5.3 pixel、4.5 pixel と なり、実際の結像位置の変動は HPW 以下であるこ とが分かった。



図 6: 結像位置変動のフィッティング結果 (P 面)。

主 1. 結佈台墨亦動のフィッ

| 1 | 以 1. 州 | | 旦攵玛 | | 197 | インノ加木 |
|---|--------|-----|-----|----|------|---------------------|
| | | パラ | メージ | ター | | 沖完係数 ₂ 2 |
| | a | b | с | d | е | |
| Р | 387 | 244 | 32 | 0 | 1332 | 0.994 |
| Η | 559 | 264 | 24 | 4 | 890 | 0.988 |

、 、 が 対田

可視光測定で得られた HPW と亀谷 (2021) で行われた X 線を用いた評価で得られた HPW を比較すると、P 面 (図 7) と H 面の両方で大まかに一致する結果を得ることができた。



図 7: 反射鏡の P 面での可視光と X 線による HPW の比較。

4 議論

HPW の可視光と X 線の測定結果は大まかに一致 していたが、可視光では HPW が 60 arcsec 以下で あっても X 線では 60 arcsec 以上となる場合も存在 していた (図 7)。また、可視光の HPW が 80 arcsec 以上のところでは、X 線の HPW が 60 arcsec 以上 となっており、可視光測定では結像性能が良い結果 が出ても必ずしも X 線測定で同様の結果が出てくる と結論付けられないが、悪い結果となるところの検 出が可能であることが分かった。これより、反射鏡 を可視光を用いた評価によって、X 線を用いた評価 を実施する際には結像性能がある程度良いサンプル を選択することができると考えられる。

可視光の結像位置変動は測定台のハウジングの回 転に伴う反射鏡の首振りによって引き起こされる可 能性があることを示し、実際の変動は ~15 arcsec で ある結果を得ることができた。この変動には、反射 鏡自体の歪みやハウジングの設置誤差による影響な どが含まれていると考えられるが、今回の測定では 両者を切り分けるには至らなかった。今後は、ハウ ジングへの設置誤差など、反射鏡による影響以外の 要素を考慮することで、反射鏡の結像位置変動を精 度良く測定できると考えられる。

5 まとめと展望

本研究では、可視光を用いた簡易評価でも X 線望 遠鏡に用いる Wolter I 型反射鏡の結像性能を評価 できるようにするため、測定位置を特定可能にする ための装置を製作し、得られるデータの解析ツール XTENSoft の開発を行なった。装置開発では、反射 鏡の好きな箇所を測定するために回転ステージを製 作し、反射鏡の特定箇所のみによる反射像を測定で きるように測定台へスリットの取り付けを行った。解 析ツールの開発では、複数枚の測定画像に対して結 像位置探索、および、HPW の算出を行う評価ツー ル XTENSoft を作成した。これらを用いた可視光測 定では、WAP と HPW の測定結果を得ることがで き、WAP の変動は測定台のハウジングを回転させ ることによる首振りの影響が大きな割合を占めるこ とが分かった。また、可視光測定で得られた HPW と亀谷 (2021)の X 線を用いた測定による HPW の 比較から、反射鏡の可視光評価によって、X 線測定 の際に結像性能が悪くなる箇所の抽出が可能である ことが分かった。

今回は可視光と X 線の HPW の比較を 1 つの反 射鏡サンプルでしか行えなかったため、今後は比較サ ンプル数を増やし、X 線測定で結像性能が悪化する 可視光評価の閾値を修正していく必要がある。また、 結像位置変動は反射鏡のハウジングへの設置誤差に よる影響でも生じると考えられるため、X 線望遠鏡 のハウジングへの反射鏡設置方法の開発も行なって 我々にとって、精度の良い設置へ向けた足掛かりと なって行くと考える。

Reference

亀谷紀香, 2021, 愛媛大学理工学研究科 修士論文

-index へ戻る

観測a34

ガラスリボンを用いたX線反射鏡の反射率測定

岡野 恭祐

ガラスリボンを用いた X 線反射鏡の反射率測定

岡野 恭祐 (青山学院大学大学院 理工学研究科)

Abstract

広い宇宙において X 線の観測を行うことは様々な天体現象を解析するうえで有効な手段である。また、宇 宙に存在する天体は広いエネルギー帯域の電磁波で輝いていることが知られており、それらには可視光では 観測できないものも存在する。ここで、X線を観測することによって高エネルギー物理現象を探求すること が可能になる。

これより X 線望遠鏡を用いての観測が行われている。その際に用いる反射鏡面は滑らかであるものが適し ていると表面の粗さと反射率の関係から知られている。このため、反射鏡のベースとしてガラスを用いる。 その中でもガラスリボンは表面が極めて滑らかである上、曲げやねじりに強いため集光系の形状作成の自由 度が高い。そこで、これを利用して細長いリボンを円錐形に配置することで、高い反射率を持つミラーをつ なぎ目なく何層にも渡って製作できると期待される。本研究では幅、厚みの異なる二種類のガラスリボンに タングステンの薄膜形成を行い反射鏡面を試作し、X 線用のビームラインを用いての反射率測定を行うこと で性能を評価した。

1 Introduction

1.1 結像性能とX線天文学

X線天文衛星には、(コリメーター) + (エネルギー、 時間分解能を持つ検出器)という観測器が搭載され てきた。

しかし、1962年以降数々のX線天文衛星が打ち上 げられ、技術進化と共に発展を遂げてきた。1970年 代後半には広い有効面積を持つ観測器による検出感 度の限界の向上を図り、典型的な感度は1mClab 程 度であった。

その後、1978年に打ち上げられた「Einstein」衛 星によってX線天文学はさらなる進化を遂げる。従 来の観測器では開口面積を大きくすれば目的の天体 からフォトンを多く集められたが、同時にバックグ ラウンドである宇宙X線背景放射(CXB)、荷電粒 子等の宇宙線が増えるため検出器を大きくしても検 出感度に限界がある。これに対し、「Einstein」衛星 は、X線望遠鏡+マイクロチャンネルプレートとい う組み合わせを世界で初めて搭載し、検出感度の限 界の向上に成功した。

さらにその後、X線望遠鏡を搭載した望遠鏡とし て3秒角という高い分解能を持った「ROSAT」が 登場した。この衛星はX線望遠鏡を搭載した衛星で 初めて全天観測を行い10万個もの天体を発見するこ とに成功した。さらに、「EXOSAT」は 90 時間と いう長い周期を待つため長時間の観測が可能であっ た。また、0.1–10keV のX線領域で世界初の撮像分 光観測を可能にしたのが「あすか」である。この衛 星の登場によって、銀河中心付近からの蛍光鉄輝線 の発見や超新星残骸や銀河団の重元素組成に基づく、 宇宙の化学進化など様々な成果が得られた。

さらに「XMM」「Chandra」などのX線天文衛 星では、(秒角単位の各分解能を持つX線望遠鏡) + (X線 CCD と Grating 等の分散型高分解能分光素子) という組み合わせになってきている。これにより、離 角が秒角程度の重力レンズによるクローバーリーフ の発見、Jet の加速機構の解明のX線天文学において 重要な発見が為されている。

1.2 ガラスリボンとは

ガラスリボン (Glass-ribbon) とは、厚さ 4–50μm の極薄ガラスであり、図1のようにリボン形状になっ ている。ガラスは本来、耐熱性、ガスバリア性、電 気絶縁性、平滑性、光透過性、化学安定性といった 優れた特徴を持っている一方で、硬くて脆いため加 工が困難である。そこで、ガラスリボンは薄く形成 することで柔軟性や加工のしやすさを実現した。

また、電子・光通信デバイスやディスプレイをは

じめ、幅広い分野への応用が期待されている。



図 1: ガラスリボンの外観写真

1.3 ガラスリボンの特長

ガラスリボンは、ガラス表面は無研磨にもかかわ ウ: らず非常に平滑である特徴を持つ。さらには、しな 射型 やかであり湾曲によって簡単に破損しない。ガラス カ リボンは研磨ガラスに比べて算術平均粗さが小さく 表面が滑らかであり、最小曲率半径が小さいため湾 と 曲に強い。また、ガラスリボンは延伸成形技術を応 用して製造されており、熱形成中に同時に両側面を 加工することで、滑らかさや曲げや捻りに対する強 3 さを実現している。

2 実験方法

2.1 スパッタリング法

スパッタリング現象は 1842 年にグローブ (W.R.Grove)によって発見された。固体ターゲット の表面に高エネルギー粒子を衝突させることで運動 エネルギーを得てターゲット表面付近の原子・分子 間で衝突が生じる。この衝突が再び表面まで達する。 このエネルギーが原子・分子の結合エネルギーより も大きい場合に表面からターゲットが飛び出す。こ の現象をスパッタリング現象と呼ぶ。また、スパッ タリング法はこの現象を用いて薄膜を形成する。 スパッタリング法では、真空中に不活性ガスを導入 し、ターゲットをマイナス電極としてグロー放射す ることで不活性原子をイオン化する。これが高速で ターゲットに衝突し、ターゲットを構成する粒子が 激しく弾き出されることでコーティング対象の物質 に付着しながら堆積していくことで薄膜を形成する。

宇宙科学研究所のスパッタ装置を使用し、ガラス リボンの表面に反射鏡面となるタングステンを成膜 した。スパッタ装置は、サンプルを回転台に取り付 けて回転させながらスパッタを行うものである。長 さ 1m 程度のリボンを均一にスパッタさせるために、 円柱型の土台を製作してガラスを巻き付け、ステー ジに設置した。その後、真空を引いてスパッタを行 う。

また、本実験で使用したガラスリボンにはサンプ ル A(幅 15.0mm,厚み 45µm)、サンプル B(幅 30.0mm,厚み 15µm)の二種類のサイズを用いた。

2.2 反射率測定

X 線反射装置を使用して検出器に当たる光子のカ ウント数を計測し、鏡面の反射率を求める。また、反 射率は反射後の光子のカウント数をダイレクト光の カウント数で割ることで求められる。

tを 0.1° ずつ動かしていき、各カウント数から t と反射率の関係を調べる。

3 実験結果

スパッタリング法を用いてガラスリボンの表面に タングステンを成膜し、実際に X 線を反射した際の 性能を評価するために X 線の入射角と反射率の関係 を調べた。

3.1 タングステンの成膜

宇宙科学研究所のスパッタ装置を使用し、ガラス リボンの表面に反射鏡面となるタングステンを成膜 した。スパッタ装置は、サンプルを回転台に取り付 けて回転させながらスパッタを行うものである。長 さ1m程度のリボンを均一にスパッタさせるために、 円柱型の土台を製作してガラスを巻き付け、ステー ジに設置した。その後、真空を引いてスパッタを行 う。

また、本実験で使用したガラスリボンにはサンプ ル A(幅 15.0mm , 厚み 45µm)、サンプル B(幅 30.0mm, 厚み 15µm)の二種類のサイズを用いた。ス 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

パッタ前とスパッタ後の様子を図2、図3に示す。図 2、図3の上部に巻いてあるものがサンプルAであ り、下部に巻いてあるものがサンプルBである。図 3を見ると、ガラス表面にタングステンが成膜し、可 視光で観測される限りでは、反射鏡面になっている ことが確認できる。







図 3: スパッタ後



図 6: 各入射角における 図 7: 各入射角における 反射率 (表面粗さ 2nm) 反射率 (表面粗さ 3nm)



図 8: 各入射角における 図 9: 各入射角における 反射率 (表面粗さ 4nm) 反射率 (表面粗さ 5nm)

3.2 反射率測定結果

図4は、ガラスリボンを用いた反射鏡の反射率の 測定結果をプロットしたものであり、図5-図9は反 射率を粗さ1nm-5nmのモデルと比較した結果であ る。データにはThe Center For X-ray Opticsのデー タベースを用いた。また、モデルの曲線は反射鏡の 角度の誤差を考慮して横軸 t を補正している。これ より、表面粗さは2nm-4nmの間である可能性が高 いと結論づけた。また、入射角が小さい時に反射率 が極めて小さくなっているのは、X 線ビームに幅が あり、X 線が全て反射鏡に当たっていないことが原 因である。



図 4: 各入射角における 図 5: 各入射角における 反射率 反射率 (表面粗さ 1nm)

4 結論・考察

ガラスリボンにスパッタリング法を用いてのタ ングステンの成膜を行い、可視光の範囲での反射鏡 面の作成に成功した。製作した反射鏡を用いて反射 率測定を行った結果 X 線の反射に成功し、X 線反射 鏡面が作成できていると確認できた。反射率測定の 結果から、表面粗さはおおよそ 2nm-4nm であると 確認でき、X 線反射鏡としては十分な性能だといえ る。ただ、焦点距離を短くするには表面粗さ 2nm に 近づける必要がある。厚み 15µm のガラスリボンは 取り扱いが難しく測定を行うことができなかったた め、厚みを厚くして再度測定を行う必要がある。ま た、反射率のモデルに完全に一致しているとは言え ず、測定方法の改善が必要である。主な原因として は、基盤に設置する際に X 線反射鏡に歪みが出来て しまったことが考えられる。

5 今後の展望

本実験で使用したガラスリボンとは厚さが異なる サイズのガラスリボンを用いての測定を行うことで より反射鏡に適するサイズを検討する。測定方法に おいて、ミラーを歪みなく基盤に対して水平に設置 する方法の検討・実施することで正確な測定を行う。 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

また、X 線望遠鏡の完成に向けて筐体の製作を行い、 観測装置の耐久性を検討する予定である。

Reference

- 中島 外博, 2013, ガラスリボンの技術と特徴
- 石田 学, 2003, 高角度分解能多重薄板型X線望遠鏡の開発
- 波岡 武,1999, X 線結像光学
- 井上 裕彦,2005, 高精度アライメントによる X 線望遠鏡 の高解像度化の研究
- 清田 力,2021, 広視野 X線集光系テストモデルの開発

-index へ戻る

観測a35

展開可能な軸外し望遠鏡の支持構造設計

河合 優樹

展開可能な軸外し望遠鏡の支持構造設計

河合 優樹 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

我々は、自由曲面鏡を用いた軸外し望遠鏡の開発を行っている。超広視野であることを生かした宇宙望遠鏡 への応用を考えているが、軸外し光学系は鏡の軸が一致している通常の光学系と比べて断面積が大きい。こ れは、同じ打ち上げ能力の下で有効口径が小さくなることを意味する。この問題を解決するため、今回の研 究では展開機構をつけた支持構造を開発した。この構造を用いれば、3枚ある鏡のうち1枚を残り2枚の方 に折り畳んでコンパクトに打ち上げ、宇宙空間で展開することが可能となる。

望遠鏡の支持構造を設計する際、本来の光学性能を発揮するために鏡を極めて高い精度で位置決めした うえで、それを維持することが要求される。高精度な位置決定を実現するために 10µm 単位で鏡位置を調整 可能な機構を開発した。レーザートラッカーやオートコリメーション法を使った計測と合わせて、位置合わ せを行う。また、その鏡同士の位置関係を維持するため、トラス構造を採用し、比較的軽量ながら変形しに くい支持構造を実現した。さらに、展開した際に格納前と全く同じ位置に戻るように、ベアリングとキネマ ティックサポートを用いた位置再現性の高い機構を開発した。

しかし、実際に鏡の位置合わせを行うにあたって、鏡にかかる応力や調整機構の分解能について懸念も 存在する。必要に応じて改良を加えていきたい。

1 Introduction

1.1 背景

望遠鏡が得る情報量は視野×分解能×集光力で決 まる。集光力は望遠鏡の口径を大きくすることで確 保できる。しかし、球面鏡や放物面鏡、双曲面鏡な どを用いた光学系では広視野にわたり収差を補正し きることはできない。つまり、広視野と高分解能は 従来技術では両立できない。

ここで、自由曲面鏡を用いることで自由度が上が り、高次の収差まで補正が可能となり広視野高分解 能を実現できる。この光学系は広視野の宇宙望遠鏡 やリモートセンシングに有用である。

1.2 光学系

今回のプロジェクトでは自由曲面を用いた軸外し 光学系を採用した (図 1)。口径は 500mm で有効焦点 距離は 3094mm、中心波長を 640nm として ϕ 4 度に おいて回折限界を達成する。また、軸外し望遠鏡な ので遮蔽によるスループットの低下が起こらない。

公差解析の結果、鏡1枚あたり許される設置誤差 はおおよそ図2の通りとなる。鏡中心の位置精度は 100µm、tip・tilt 成分は 5.4 秒角、回転成分は 36 秒 角まで許容される。



1.3 課題

図 3(1),(2) からも分かるように軸外しの望遠鏡は 体積が大きく、そのまま打ち上げる場合通常の望遠 鏡と比べてかさばってしまう。これは鏡を1枚折り 畳む機構をつけることで解決することができる。宇 宙で運用するためには電力供給、通信、姿勢制御な どを担うバス部をつける必要があるが、M3の後ろに バス部をつけて M1 を M3 の方に折り畳むことで図 3(3) のようなコンパクトな構造になる。

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校



図 3: 打ち上げ時の体積比較

1.4 研究の目標

本研究では以下を目標とする。

- 光学系の性能を引き出す安定した架台を製作する
- 架台に M1 を M3 の方に折り畳むことができる 展開機構を付ける
- 鏡の位置調整機構を設計する
- 鏡の高精度な位置決め手法を確立する

2 支持構造

図4の架台を製作した。高い安定性が必要となる ため、軽くて強いトラス構造を採用した。太陽工業 株式会社と協力して製作し、寸法は約2450mm × 約1500mmで総重量は210kg程度である。載せる鏡 が36kg(M1)+11kg(M2)+60kg(M3)の計108kgなの で、比較的軽量といえる。この架台はM1部分を約 71°回転させることができる。

設計の際は部材ができるだけ少なくなるように手 動で最適化を行った。トラス構造で鏡を支持する場 合に絶対必要となる構造だけを積み上げていくこと で無駄な構造を排除した。また、このとき光線束と 干渉しないよう注意した。

2.1 展開機構

展開機構は回転機構と位置合わせ機構からなる。図 5の回転機構により、軸とベアリングを使ってなめら かに M1 を回転させることができる。回転軸は M1 および M3 の 2 対のグローブの中心を通る。



図 4: トラス構造を用いた架台

格納と展開を繰り返しても鏡を正しい位置に保つ ためには、正しい回転角で M1 を止める位置合わせ 機構も必要である。再現性を高めるためには、M1 と M3 を点で接触させることが有効である。そのため M1 側を平面、M3 側を球面の一部とすることで、平 面と球面が一点で接触するようにした (図 6)。また、 展開時に M1 が M3 から簡単に離れないように中に 磁石を入れた。約 10kgw の力で引き合う。



2.2 鏡支持·位置調整機構

2.2.1 支持脚

鏡の支持には図7の支持脚を用いた。研削時に用 いる支持脚をそのまま転用した。支持脚には、極力 鏡に応力を与えずにしっかり保持することが求めら れる。図7から分かるように、この支持脚は2方向 に柔らかいため、矢印の方向にある程度柔軟性があ る。支持脚のフレクチャが変形することで、鏡に無 理な力がかかるのを抑制している。また、後述の組 み立ての際に役立つため、支持脚の下に三角板を配 置している。支持脚は三角板に対して位置決めピン で位置決めするが、位置決めピンの数や固定方法を 工夫しないと鏡が変形することが分かった。過拘束 を避けることで変形を回避することができる。



図 7: 鏡の支持脚

2.2.2 鏡と垂直な調整

支持脚と三角板の間にシムを入れて調整する (図 8)。固定ネジを緩めて押しねじを回すことでブロッ クを浮かせ、横から U 字シムを入れることで安全に シムを入れることができる。支持脚と三角板は位置 決めピンによって横ずれしないようになっているた め、高さだけを調整できる。

シムは 10µm、50µm、300µm のものを用意してい る。最も薄いシムを使った場合、10µm 刻みでの調整 が可能になるため、理想値からの最大誤差は 5µm に なる。このとき最も小さい M2 でも理論上は要求精 度の半分の分解能で傾きを調整可能。また、三角板 下の高さ調整シムを使えば± 30mm 以上調整できる ため、トラス構造に歪みがあっても対応できる。

2.2.3 鏡と平行な調整

市販の1軸ステージを利用する (図 9)。三角板の裏 には V 溝が切ってあり、ステージに取り付けた半球 と合わせてキネマティックサポートになっている。こ れによって三角板は各ステージの位置による変形を 引き起こさない。ステージを動かすと三角板が回転 し、同時に半球が V 溝内を移動する。つまりステー ジを動かすと鏡の角度と位置が変化する。この原理 を用いて調整を行う。

ー軸ステージに付属するマイクロメータの最小読 取は 10µm なので、鏡位置も 10µm のオーダーで調

み立ての際に役立つため、支持脚の下に三角板を配 整できる。ステージは最大で± 6.5mm 調整可能で 置している。支持脚は三角板に対して位置決めピン ある。

> キネマティックサポートをしているため、理論上は ステージの移動が三角板を通じて支持脚や鏡の位置 を変化させるはずだが、半球または V 溝が凹んでし まい理想的な応答をしない可能性がある。実際にス テージを動かした場合の三角板や鏡の変位を実際に 計測しておくべきであると考える。

また、理論上はこの機構で位置合わせを行えば十 分な光学性能を発揮できるはずだが、もう少し細か い調整が可能になればより確実性が上がる。そのた め、現在アクチュエータを使って M2 をより高精度 に制御することも考えている。



3 組み立て

レーザートラッカーとオートコリメーション法で 計測、前章で説明した調整機構を使って調整する。

今回は FARO というレーザートラッカーを使用す る。レーザートラッカーは、本体から出たレーザー を SMR(spherically mounted retroreflector) という リフレクターで反射して本体に戻し、SMR の中心座 標を正確に求める装置である。本体と SMR が 1m ほ ど離れている場合は約 25µm の精度で計測が可能で ある。

オートコリメーション法では光学系の焦点面に点 光源を置き、光学系を出た光を平面鏡で反射させる。 その光を再び焦点面に結像させることで、高精度な アラインメントを可能にする。

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校



図 10: レーザートラッカー

組み立て手順

- 1. トラス組み立て (図 11)
- 2. 研削盤上でヤトイに SMR 台を設置、SMR と鏡 面の相対位置を測定(図12(1):研削盤は高精度 な計測が可能。SMR の座標と鏡の中心座標、姿 勢の関係を調べておく)
- 3. 支持機構に鏡を設置、三角板に SMR 台を設置 (図 12(2): 後の操作で使うため三角板を設置)
- 4. FARO で鏡と三角板の相対位置を測定 (図 12(3): これで鏡を外しても三角板上の SMR で計測可 能になる)
- 困難なため)
- 6. 三角板 SMR の座標を見ながら、ステージとシ ムを使って鏡位置と姿勢の調整を行う (図 12(4))
- 7. 鏡を戻して計測、正しく位置決めできるまで繰 り返す (図 12(5))
- 8. FARO による計測をオートコリメーションに変 えてさらに追い込む (図 12(6))

Conclusion 4

本研究ではトラス構造を用いた軸外し望遠鏡の架 台、鏡の位置合わせを行う機構を設計、製作した。架 台にはベアリングを使った回転機構と球、平面を使っ た位置合わせ機構によって安定した M1 展開機構を 組み込み、コンパクトな打ち上げを可能にした。シ



図 11: トラス組み立て



図 12: 組み立て手順

ムと1軸ステージを使った位置調整機構により光学 性能を引き出すために必要な位置合わせを行う。理 論上は十分高精度に鏡を設置できるが、鏡の変形や 調整分解能など実用性に不安が残るため検証する必 要がある。今後は、3DCAD を用いた評価を行うほ か、鏡の研磨が終わり次第、問題点を解決しながら 実際の位置合わせ作業を行う予定である。また、ア 5. 支持脚から上を外す (図 12(4): 鏡が重く調整が クチュエータを用いた M2 の調整機構も開発したい。

-index へ戻る

観測a36

引きずり三点法による大口径鏡の計測誤差の調査

坂本 和樹

3点法における近似誤差の調査

坂本 和樹 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

大口径鏡の形状計測手法として、従来より干渉計を用いた手法が活用されているが、口径に比例して装置が 大型化するほか、被験面以外に参照面を必要とするという問題を抱えている。これに対し、我々の研究室で は、距離センサーを3つ使用する引きずり三点法という新たな形状計測手法を提案し、検証している。引き ずり三点法では、10 mm 間隔でセンサー3本を並べた全体で長さ20 mm のプローブを構成し、自由曲面の 測定や装置の小型化を達成している。被験面の形状を計測するにあたっては、プローブの長さにわたって被 験面の曲率が変化しないと仮定した近似を用い、被験面の設計形状からセンサーの出力の適正値を算出し、 実際のセンサー出力との比較を行っている。今回の研究では、この近似が計測結果に与える影響について検 討を行った。

シミュレーション上で、現行の手法での適正値と理想的な条件の下でセンサーが出力する値の比較を行っ た結果、軸対称の放物面鏡で光軸を通る計測経路では、近似誤差の量は口径とセンサー間隔の比率で決定さ れることがわかった。具体的には、F2の鏡であればセンサー間隔が口径の3%程度、F3ならば5%程度が 近似誤差量を許容値(30 nm)内に収める最大のセンサー間隔となった。また、その他の経路については、近 似誤差は光軸を通る経路よりも小さくなることが確認され、1m 程度以上の口径があれば、現行のセンサー 間隔でも問題なく計測できていることがわかった。今後、センサーの位置ずれれなどによる計測結果への影 響なども調査し、引きずり三点法から発展して可変形鏡などにも対応できる非接触型の三点法の開発に取り 組む。

Introduction 1

可視光望遠鏡はその発明以来、高コントラストや 高分解能を求めて大口径化が進んできた。また、近年 では広視野化のために自由曲面を採用する例もあり、 これらの鏡の形状計測は、鏡の性能を決定する重要 な要素となっている。従来、鏡の形状計測には、干 渉計を用いた手法が活用されてきたが、鏡のサイズ が大きくなるにつれて装置も大型化するほか、被験 面の他に参照面が必要となるという問題がある。こ の他にも、距離センサーを3つ並べたプローブが被 験面の上で直線的に走査する直線三点法という手法 があるが、こちらは平面に近い鏡の形状計測には適 しているが、望遠鏡に用いる湾曲した鏡の形状計測 はできない。

これらの問題に対し、我々の研究室では、直線三 点法を発展させた引きずり三点法という新たな形状 計測手法を開発した。この手法では、距離センサー を3つ並べたプローブに足を取り付け、プローブを 被験面に沿って引きずりながら走査することで形状 計測を行うことで、自由曲面の測定と装置の小型化と定義される。

を達成している。

ところで、現在実用化されている引きずり三点法 で被験面の形状誤差を計測するにあたっては、セン サーからの Sag と呼ばれる出力を設計形状から算出 した理想値と比較することで評価しているが、理想 値の計算において、プローブの長さにわたって被験 面の曲率が変化しないと仮定した近似を用いている。 今回の研究では、この近似が計測結果に与える影響 について検討を行った。

2 Methods

引きずり3点法では、図1のようにセンサーを3 つ並べたプローブを被験面に沿って引きずりながら 走査することで、被験面の形状を計測する。このプ ローブの出力は Sag と呼ばれ、センサー S_i からの出 力を \hat{S}_i として、

$$Sag = \tilde{S}_1 - \frac{1}{2}(\tilde{S}_2 + \tilde{S}_3)$$
(1)



図 1: 引きずり三点法の概要

形状誤差を算出するにあたっては、被験面の設計 形状から本来出力されるべき Sag の値を算出し、実 際のセンサー出力との差分をとったのち、プローブ が走査した経路に沿って2回逐次計算を行うことで 算出される。そこで、近似誤差の計算では、近似を 行わない計算(幾何計算)と近似計算で算出された Sag の差分を用いて計算を行った。

また、プローブが走査する経路は無数に設定できる ため、代表として光軸を通る直線の経路について 2 回逐次計算を行い (ステップ 1)、その他の経路につ いては、逐次を行う前の Sag に現れる誤差で検証し た (ステップ 2)。

2.1 ステップ1:光軸を通る直線経路

近似計算では、図2のように中心のセンサ S₁ が測 定する点において、被験面上の測定経路に接する近 似円を計算し、センサ S₂, S₃ はその近似円に対して 距離を測定している。なお、この近似円の半径 R(x)



図 2: 近似計算の方法

は、被験面を測定経路で切ってできる曲線が f(x) で 与えられる時、以下の数式で表される。

$$R(x) = \frac{\left(1 + f'^2\right)^{1.5}}{f''} \tag{2}$$

この近似は、「プローブの長さにわたって被験面の曲 率が変化しない」と仮定した近似であるため、被験 面の曲率がプローブの長さよりも短い空間スケール で変化する場合、近似誤差が生じる。したがって、以 下の3つの変数を設定した。

- 口径
- F値
- センサ間隔

シミュレーションで近似計算と幾何計算それぞれの Sag を計算したのち、その差分を2回逐次計算して 近似誤差を算出、その大きさを評価する。評価基準 は、可視光望遠鏡を想定し、鏡の許容形状誤差が波 長の1/20であることから、さらにその半分の15 nm とした。今回は軸対称の放物面について検証した。

2.2 ステップ2:その他の経路

被験面上をプローブが走査する経路は無数に設定 できるため、その全てについて評価することは難し い。そのため、ステップ2では、走査する経路に沿っ た2回逐次計算を行わず、Sag 自体の近似誤差の被 験面上での分布を計算する。この計算にあたっては、 近似計算で用いる測定点での近似円の半径(曲率半 径)の計算に、プローブの傾きを考慮したローリン グ補正を行った。図3は、ローリング補正の1例を 球面鏡を用いて表した図である。x=Const の平面上 にセンサーが並んだプローブを考えた時、引きずり 3点法ではプローブの足が鏡面に接触するため、プ 測定点の ローブは紙面に垂直な軸を中心に回転(ロール)す る。よって、近似に用いる曲率半径もこのロールに 合わせて、被験面を切断する面を変える必要がある。 図3での二つの矢印は、短いものが補正を行ってい ない場合に式2で計算される曲率半径で、長いもの が補正することで得られる曲率半径である。このよ うな手法を用いて、口径 1000 mm、F2、センサ間隔 10 mm の条件で計算を行った。

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校



図 3: ローリング補正

3 Results

3.1 ステップ1

口径 1000 mm、F2、センサ間隔 10 mm を基準に、 変数を一つ変えて比較を行った。図中赤線はその幅 が 15 nm であり、この範囲に収まるものが許容され る。なお、近似誤差のうち、ピントズレの効果をも たらす円成分については除いた。(図 4~図 6)



図 4: 口径を変えたもの

口径が小さいほど近似誤差が大きい



図 5: F 値を変えたもの

F 値が小さいほど近似誤差が大きい



図 6: センサ間隔を変えたもの

センサ間隔が大きいほど近似誤差が大きい

3.2 ステップ2

口径 1000 mm、F2、センサ間隔 10 mm の条件で 計算を行った。(図 7)



図 7: Sag の近似誤差マップ

4 Discussion

4.1 ステップ1

結果から、

- 口径が大きいほど
- F 値が大きいほど
- センサ間隔が小さいほど

近似誤差が小さくなることがわかった。特に、共に F2で、口径 500 mm、センサ間隔 10 mm の組み合わ せと、口径 1000 mm、センサ間隔 20 mm の組み合 わせをスケールを調整して再度比較する。この二つ



図 8: スケールを調整したもの

を比較すると、口径とセンサー間隔を同率に拡大し た時、近似誤差も同率に拡大することがわかる。よっ て、近似誤差は

- □径
- F 値
- 口径とセンサ間隔の比

に依存することがわかった。また、基準として用いた口径1000 mm、F2、センサ間隔10 mmの条件で、近似誤差は許容値内に収まった。

4.2 ステップ2

ステップ2の結果から、直線経路では、光軸を通る 経路で最も近似誤差の影響を受けることがわかった。

5 Conclusion

本研究では、引きずり三点法における近似誤差の 影響について検討を行った。ステップ1では、近似 誤差は口径、F値、口径とセンサー間隔の比率で決 定されることがわかり、ステップ2では、光軸を通 る経路で最も近似誤差の影響を受けることがわかっ た。基準として用いた口径1000 mm、F2、センサ間 隔10 mm の条件で、近似誤差は許容値内に収まるこ とがわかった。よって、引きずり三点法は、現行の センサー間隔でも問題なく計測できていることがわ かった。

今後、センサーの位置ずれなどによる計測結果へ の影響なども調査し、引きずり三点法から発展して 可変形鏡などにも対応できる非接触型の三点法の開 発に取り組む。 -index へ戻る

観測a37

TAO望遠鏡用近赤外線2色同時多天体分光撮像装置 SWIMSの開発

藤井 扇里
TAO望遠鏡用近赤外線広視野多天体分光カメラSWIMSの開発

藤井 扇里 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

TAO 望遠鏡 (口径 6.5m) は東京大学理学系研究科付属天文学教育研究センターがチリのチャナントール山 (標高 5640m) に建設中の望遠鏡である。この望遠鏡は、世界一標高が高く乾燥した環境に建設され、大気中 の水蒸気量が極めて少ないため、大気中の水蒸気による吸収によって既存の地上望遠鏡での観測が難しい赤 外線波長域の観測が可能である。近赤外線波長 (0.9-2.5 μm) を連続的に、さらに中間赤外線波長を約 40 μm まで観測できる。SWIMS(Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) は TAO 望 遠鏡の第 1 期観測装置の一つであり、一度の露光で近赤外線領域の 0.9-1.4 μm と 1.4-2.5 μm の二つの波長 域を同時に観測することができる。さらに上記の波長域での広い視野 (φ9.6') の撮像観測もしくは多天体分 光観測、面分光観測が可能である。SWIMS は 2018 年からハワイにあるすばる望遠鏡で機能評価試験観測を 行ったのち、2022 年にかけて共同利用観測に供された。その後、日本に輸送されて TAO 望遠鏡に設置する ための改修とアップグレードを行なっており、2026 年の TAO 望遠鏡への設置と運用開始を目指している。 本講演では、SWIMS の概要と改修計画を紹介するとともに今後の予定について報告する。

1 TAO プロジェクト

赤外線波長は地球大気による吸収が多いため、地 上での観測が難しい。これに対して、現在東京大学 理学系研究科付属天文学教育研究センターがチリの チャナントール山 (標高 5640m) に建設中の TAO 望 遠鏡は広い波長域で近~中間赤外線の観測を可能と する。この望遠鏡が建設される場所は、世界一標高 が高く乾燥した環境にあり、大気中の水蒸気量が極 めて少ない。そのため、図1のように近赤外線波長 (0.9-2.5 μm)を連続的に、さらに中間赤外線波長 (~ 38 μm) まで観測することができる。高感度で広視野 な近赤外線観測は、銀河の形成進化や宇宙論観測、希 少天体捜査について効果的であり、他の地上望遠鏡 では観測できない中間赤外線観測によって、ダスト の直接観測や、惑星進化、ダストの起源の調査が可 能になる。

2 装置仕様

SWIMS(Simultaneous Wide-field Infrared Multiobject Spectrograph) は TAO 望遠鏡の第 1 期観測 装置である。観測波長は 0.9-2.5 μ m であり、ダイク ロイックミラーを使って波長を 0.9-1.4 μ m と 1.4-2.5 μ m に分割することで、同時に 2 色を観測することが



図 1: (上)TAO サイトにおける大気透過率モデル、 (下)VLT 望遠鏡が設置されているパラナル山での大 気透過率モデル。[1] からの引用

できる。この装置の観測モードは、広視野撮像 (φ9.6') と最大 30 天体の多天体分光 (R~1000)、広視野面分 光 (FoV~18.4" × 13.7") であり、いずれのモードで も、一度の露光で全波長範囲を同時に観測することが 可能である。観測波長帯は図 2 のようになっている。

SWIMS は図 3 のような構造を持ち、上部の MOSU(Multi Object Spectroscopy Unit) と下部の メインデュワーに分けられる。



図 2: SWIM のバンド帯。



図 3: SWIMS の構造。

2.1 MOSU

MOSU は多天体分光を行うための装置であり、図 4 のようにマスクデュワー、焦点面デュワー、マス クキャッチャー、ゲートバルブからなる [2]。マスク デュワー内にはカルーセルがあり、この中に約 20 枚 のスリットマスクと IFU(integral field spectroscopy unit)を保持している。スリットマスクはスリット幅 0.5″、スリット長 15″ のスリットを最大 30 個切るこ とができる。つまり、1度に最大 30 天体を分光するこ とができる。IFU は面分光を可能にする光学ユニット である [3]。観測モードごとにスリットマスクと IFU は選択され、マスクキャッチャーを使って焦点面デュ ワーに運ばれることで、多天体分光もしくは面分光 が行われる。



図 4: MOSU の構造。[4] からの引用

具体的なマスク設置過程は以下のようになってい る。

1. カルーセルを回転させ、選択したスリットマスク をカルーセル入口に移動

2. キャッチャーをカルーセル内のマスクの前まで移動

3. キャッチャーでマスクを掴む

4. 焦点面まで移動

5. キャッチャーを離して焦点面にマスクを設置し、マ グネットで固定

6. 迷光防止羽根を閉じる

IFU を使う場合にも同様の手順で焦点面に設置される。

2.2 メインデュワー

MOSU を通った光はメインデュワーに入り内部光 学系により検出器面上に結像する。メインデュワー 内の光学系の光路図を図5に示す。メインデュワー 入った光はまずコリメーターユニットを通る。次にダ イクロイックミラーを通り、2色 (blue:0.9-1.4 µm、 red:1.4-2.5 µm) に分割される。これによって2色同 時での観測が可能になる。次に blue arm と red arm それぞれにあるカメラユニットを通り、検出器に到 達する。検出器は HAWAII-2RG(H2RG) 焦点面アレ イを使用している [5]。

3 装置改修

SWIMS は TAO 望遠鏡設置の観測装置として開発 されたが、設計開始当時はまだ TAO 望遠鏡の目処が



図 5: メインデュワーの光学系。

立っていなかった。そこで、光学系はすばる望遠鏡に 適合するように設計してすばる望遠鏡で試験観測を 行い、初期成果を出すという戦略が取られた。実際 に、2018 年からすばる望遠鏡で機能評価試験観測を 進め、2020 年から 2 年間 PI 型持ち込み装置としてす ばる望遠鏡で観測を行い、装置の性能を確認するとと もに、問題点の洗い出しを行なった。現在、SWIMS は日本へ送り返され、TAO 望遠鏡への設置に向け、 各種改修を行っている。

3.1 SWIMS の改修点

SWIMS の改修点は以下のようにまとめられる。

- (1) コリメーター交換
- (2) スリットマスクホルダーの再製作
- (3)MOSU のナスミス焦点対応
- (4) 検出器増設
- (5)IFU 改修
- (6) エシェルグリズムの導入

(1)-(3) は TAO 望遠鏡に装置を設置する前に必ず対 処が必要なものである。まず、すばる望遠鏡と TAO 望遠鏡の焦点面曲率の違いから、(1) コリメーターの 交換が必要で、光学設計は完了している。同様の理由 で、(2) スリットマスクホルダーの形状も変更する必 要がある。こちらも設計は完了している。(3)MOSU のナスミス焦点対応については 3.2 で説明する。(4) 検出器の増設は、すばるでは各アームに 2 個ずつだっ た検出器を、4 つに増やすことを目指している。これ によって、図 6 のように広い視野を実現できる。す でに赤用の検出器が 2 個調達されており、残りは青 用の検出器 2 個である。(5)IFU の改修は、すばる望 遠鏡での観測の際見られたけられの改善や、結像性 能の改善などを目標としている。そのために、光学 系の再設計や、非球面鏡を積極的に採用した概念設 計を行っている。さらに、(6) エシェルグリズムを導 入することも検討されている。エシェルグリズムに より、波長分散の高い高次の回折光を利用して、波 長分解能が R~5000 のスペクトルを得られるように なる。これについては概念設計及びその制作のため の技術開発中である。



図 6: 検出器が 4 つの時の TAO 望遠鏡取り付け時の 焦点面 (左)、検出器が 2 つの時のすばる望遠鏡取り 付け時の焦点面 (右)。

3.2 MOSU の改修点

SWIMS を設置する焦点面は、すばる望遠鏡の時 はカセグレン焦点、TAO 望遠鏡の時はナスミス焦点 である。カセグレン焦点の場合、図7のように望遠 鏡焦点面が重力方向と平行になるので、マスクを設 置する際に焦点面に向かって落下し、そのままマグ ネットで固着するため問題はない。しかし、ナスミ ス焦点の場合は、望遠鏡焦点面が重力方向と平行に なるため、マスク設置時に重力方向、すなわち焦点 面と平行に落下し、マスクを焦点面に設置できなく なってしまう。

これに対応するための MOSU の改修案としては以 下のものが考えられている。

・迷光防止羽根の改修

・サポートパーツ (プランジャー、マグネット)とス

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校



図 7: SWIMS をすばる望遠鏡のカセグレン焦点に設 置した時 (左)、TAO 望遠鏡のナスミス焦点に設置し た時 (右)。

トッパーの追加

迷光防止羽根は元々MOSUに設置されており、改造 が簡単である。この羽根を閉じる順序を変え、現在は マスクキャッチャーが放す後に閉じている羽根を、放 す前に閉じてマスクを焦点面に向かって押せるように する。また、迷光防止羽根でマスクを焦点面に押して 設置する際、マスクが焦点面からズレた時や、キャッ チャーを離した後のマスクの支えとして、サポート パーツとストッパーを設置する。サポートパーツの 内、プランジャーは焦点面に設置しマスクの位置を 修正するために用いる。マグネットはすでに付いて おり、マスクの4隅と対応する焦点面4箇所にある。 これを使ってマスクの位置修正と固定を行う。ストッ パーは羽根に付いており、羽根を閉じると同時にマ スクを支えられるように設計する。



図 8: マスク落下防止のための改修点。

この改修によってマスク設置時の過程は次の手順 に変更される。

- 1. キャッチャーを使ってマスクを焦点面に運ぶ
- 2. 迷光防止羽根をマスクに引っ掛け、焦点面に向かっ て押す

3. キャッチャーを離すと同時に、ストッパーと迷光防 止羽根でマスクを支える

4. プランジャーやストッパーで位置のずれを調整し

ながら、焦点面のマグネットで固定する この改修案を含んだ装置を現在製造中である。製造 完了後、これを用いて試験を行う予定である。

4 今後の予定

SWIMS の改修は 2025 年の冬までに完了する予定 である。その後 TAO に輸送し、2026 年の運用開始 を目指している。

Reference

[1] 東京大学アタカマ天文台 (TAO) 計画, https://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/

[2]Takahashi, H, et al, Proc. SPIE, 9147, 91476N (2014)

[3]Kushibiki, K., et al, JATIS, 10, 015004 (2024)

[4]Konishi, M., et al, Proc. SPIE, 8446, 84467P (2012)

[5]Terao, Y., et al, Proc. SPIE, 9915, 99151W (2016)

-index へ戻る

観測a38

次世代赤外線天文観測装置に用いる非球面鏡の鏡面精 度測定

石川 あゆみ

次世代赤外線天文観測装置に用いる非球面鏡の鏡面精度測定

石川 あゆみ (広島大学大学院 先進理工系科学研究科)

Abstract

星や惑星の形成と進化を解き明かす鍵を握る原子・分子輝線は赤外線領域に多く存在する。赤外線は地球大 気に吸収されやすいため、宇宙空間での観測が有効である。また、赤外線観測は熱放射の影響を受けるため、 装置を極低温に効率よく冷却する必要があり、軽量・コンパクトが欠かせない。この実現には非球面鏡が大 きな役割を果たすが、非球面鏡の表面形状を保証 (測定) することは容易ではなく、極低温下ではなおさら難 しくなる。本研究は、次世代赤外線宇宙望遠鏡 GREX-PLUS や PRIMA の観測装置に搭載される非球面鏡 を絶対温度 50K の低温環境下で測定することを最終目標とする研究の一部である。そこで本研究では、ま ずは常温下において、形状が既知である非球面鏡を用いて、鏡面測定法の確立と測定精度の定量的な評価を 目的とする。その達成のために、要求精度の設定と光学シミュレーション、公差解析を基にテストプランの 立案を行った。今回は放物面鏡を測定のターゲットとし、CGH(Computer Generated Hologram)とレー ザー干渉計とを組み合わせた。CGH は、不等間隔に溝が刻まれた回折格子であり任意の波面を生成するこ とができる光学素子である。イテレーションの結果として、要求精度を達成するために必要な測定手法、各 光学素子と調整・アラインメント精度への要求を導出し、要求を満たす設計解を導いた。

1 Introduction

赤外線天文観測衛星の光学系(図1は次世代赤外線 ミッション候補 PRIMA での例)は、望遠鏡本体を構 成する主鏡や副鏡を始め、観測装置内部にも存在す る。天体からの光は、様々な種類の鏡や回折格子、プ リズムを経て最終的に検出器で集光する。一つ一つ の光学素子はその形状や表面の凹凸、光の入射方向 などに応じた収差を発生させるが、一方で、収差を 補正するような使い方も可能である。一般的に、観 測装置や光学機器の中の光学系は、複数のレンズや 鏡を組み合わせることで様々な収差を補正している。



図 1: PRIMA の光学デザイン

鏡の形状は大きく球面と非球面に分けられる。非 球面には放物面や楕円面といった軸上非球面と、軸 外し放物面や軸外し楕円面といった軸外し非球面、回 転対称軸を持たない自由曲面などがある。特に自由 曲面鏡は表面形状の自由度が高く、光学性能の向上 に寄与する。要求を満たす柔軟な設計により、これ までは収差補正に複数の鏡が必要だった箇所を一枚 の自由曲面鏡で補うことができるため、観測装置の 軽量化・コンパクト化が可能となる。しかし、形状 の複雑さから自由曲面鏡の製造や鏡面精度測定は難 易度が高く、赤外線宇宙望遠鏡に搭載することを想 定した極低温下での鏡面測定はなおさら困難である。

本研究は、次世代赤外線宇宙望遠鏡 GREX-PLUS と PRIMA に搭載予定の自由曲面鏡を 50K の低温環 境下で形状測定することを最終目的とする研究の一 部である。上述の通り自由曲面鏡は常温においても 測定が難しく、低温環境下で自由曲面鏡を測定する ことは更に困難である。そこで本研究では、まずは 常温環境下において、形状が既知である非球面鏡(軸 外し放物面鏡)を測定することで測定精度の定量的 な評価と、測定方法の確立を目的とする。 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

2 Methods

2.1 目標精度の設定

本研究では、鏡一枚あたりの感度がどの程度変化 するか計算を行い、その結果をもとに目標精度を決 定する。光の波長を λ とし、波面誤差から感度を導 出する。

宇宙からの赤外線の信号は微弱であり、主要なノ イズの要因は周りの天体からの明るい光である。した がって、赤外線観測では一般的に背景光限界 (Background limited) と考えることができる。波面誤差の 自乗平均平方根を σ とすると、波長 λ における Strehl ratio は以下のように書ける。

Strehl ratio =
$$e^{-\left(\frac{2\pi\sigma}{\lambda}\right)^2}$$
 (1)

感度は Strehl ratio の自乗で表され、鏡の枚数に比 例して悪化する。

2.2 テストプランの作成

設定した目標精度を達成するために、測定に必要 な機材やセットアップ、測定・解析手順を詳細に書 き出し、検討事項や必要事項を洗い出す必要がある。 この一連の作業をまとめたものをテストプランと呼 ぶ。各ステップの要求を満たせる場合は次のステッ プに進み、要求を満たせない場合は前のステップへ 戻り再検討をする。具体的なステップは次のとおり である。

- 1. 目標精度の設定
- 2. 機材の選定・セットアップの考案
- 3. シミュレーション・公差解析
- 4. 各機材への要求の導出
- 5. アラインメント・評価・解析プラン

2.3 測定方法

本研究では、高い測定精度が要求されることと 極低温下を見据えた予備測定であることから CGH (Computer-Generated Hologram) とフィゾー型干渉 計を組み合わせる方法を選択した。CGH は溝が不等 間隔に刻まれた回折格子であり、光を任意の波面に 変換することが可能である。図2のように、光源から の平行光は干渉計内部の TF(Transmission Flat)と 被験面でそれぞれ反射され、干渉する。二つの波面 の干渉による干渉縞は白黒の模様として現れ、この 縞の形や向きをもとにアラインメントを行う。



図 2: CGH と干渉計を組み合わせたセットアップ

2.4 シミュレーション

選定した光学素子やセットアップなどを光学設計 ソフトウェア Zemax に取り込み、シミュレーション を行う。光線が干渉計→ CGH →被検面→ CGH → 干渉計の経路をたどるようにそれぞれの素子を配置 する (図 3)。この Zemax モデルを用いてどの程度の 精度を許容できるか見積もり、各光学素子に対するア ラインメント精度への要求出しを行うエラーバジェッ トを作成する。目標精度が達成できないと判断した 場合は前のステップへ戻り再検討する。



図 3: 干渉計→ CGH →被検面→ CGH →干渉計とな るように配置したときの Zemax での Shaded Model

公差解析の結果をもとに、各光学素子の配置や調 整方法を考えアラインメントプランを作成する。ま た、立案したアラインメントプランに沿って測定を 行う上で得られる結果を想定し、解析方法を考える。

3 Results

次世代宇宙望遠鏡計画 GREX-PLUS の分光装置の 観測波長域 10-18 μ m をもとに、最も厳しい場合で波 長 $\lambda = 10^4$ nm で観測を行うことを想定して感度を計 算した。その結果、波面収差が $\lambda/4$ nm PV のとき、 感度の低下は 0.08% 程度であった。これは鏡 10 枚の 光学系で感度低下が 1% 以内であることに対応する。 また、波面収差を $\lambda/2$ nm PV として計算を行うと、 感度は 0.3% 程度と急激に悪化する。PRIMA の波面 誤差バジェットの割り当てからも適当と考えられる ことから、本研究の目標精度は 30 nm PMS とした。

シミュレーション及び公差解析のイテレーション の結果から、目標精度を達成する非球面鏡のアライ ンメントは難しく、特に光軸方向の調整が厳しいこ とが分かった。そのため、非球面鏡のアラインメン トに球面鏡を活用することを考案した。また、非球 面鏡のキャリブレーション測定を行う必要があると 判断した。常温下での本測定は、冷却下でのセット アップ(図4)をもとに決定した。



図 4: 考案した低温下での測定セットアップ

4 Discussion

4.1 誤差要因についての考察

アラインメントに起因する誤差以外にも、様々な 誤差が生じることが考えられる。例えば、CGHの製 作誤差や迷光による影響などが挙げられる。

CGH は回折光学素子であり正確な位置調整を必要とするため、製作誤差は被験面の測定結果に影響を与える。また、CGH には、今回使用したような透過型と反射型がある。CGH の製作誤差を測定とZemax モデルから定量化し誤差の性質を理解するこ

とが本研究の目的の一つである。透過型 CGH と反 射型 CGH が生じる誤差の比較は、今後の測定で実 施する予定である。そのために、 CGH の製作誤差 以外の誤差要因を十分正確に把握し抑えることが重 要となる。

迷光(Fresnel 反射)とは本来想定される光路以外 に発生する光のことで、光学実験において意図した 測定結果を得られない原因となりうる。本研究では、 CGH 基板の表面からの Fresnel 反射を抑えるために CGH を干渉計に対して傾ける対策を考えた。しかし それ以外にも迷光源は存在する。特に CGH の n 次光 の影響は今回 Zemax を用いたシミュレーションでは 考慮できていない不定要素である。CGH は回折素子 であるため、いわゆる n 次光が存在する。被験面の 測定には 1 次光を用いるが、それ以外の次数の光が 混入する可能性があり、これらは迷光源となりうる。

5 Conclusion

本研究では、常温環境下における非球面鏡の CGH を用いた形状測定方法と測定精度の定量的な評価方 法 について検討した。特に、将来極低温下の測定に 応用することを念頭に、市販の干渉計と CGH を組 み合わせた測定方法を採用した点や、アラインメン ト精度 0.01 mm、5 arcsec を達成するためにアライ メント用球面鏡と専用の CGH パターンを用いる方 法を導入した点において工夫をした。検討の結果、 要求設定から設計、アラインメント、測定、解析ま で検討を行い、課題の洗い出しと非球面鏡を許容精 度 30nm RMS で測定する手法を立案することがで きた。今後は、本研究で得たアライメントプランと 測定プランをもとに実際に非球面の評価実験を行い、 解析プランに基づいた測定精度の評価と、測定手法 へのフィードバック及び改善を実施する。

Reference

- Rodgers, J. Michael, et al. "Optical and optomechanical design of spectrometers for prima." UV/Optical/IR Space Telescopes and Instruments: Innovative Technologies and Concepts XI. Vol. 12676. SPIE, 2023.
- Inoue, Akio K., et al. "GREX-PLUS: galaxy reionization explorer and planetary universe spectrometer."

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

Space Telescopes and Instrumentation 2022: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. Vol. 12180. SPIE, 2022. -index へ戻る

観測b01

MeV γ線観測実験SMILE-3計画にむけた新型ガス飛 跡検出器及びトリガーシステムの開発

佐藤 太陽

MeV ガンマ線観測実験 SMILE-3 計画にむけた 新型ガス飛跡検出器及びトリガーシステムの開発

佐藤 太陽 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

ガンマ線の中でもエネルギーの低い 0.1 MeV – 100 MeV のエネルギー領域は、放射性同位体の崩壊による 核ガンマ線を検出できる唯一の波長域であり、元素合成の現場や拡散の様子を直接観測できるという点で重 要である。しかし、MeV ガンマ線と物質の相互作用はコンプトン散乱が主体であり、到来方向の決定が難し いほか宇宙線による雑音事象が大量に発生するため、観測が進んでいない。我々が開発している電子飛跡検 出型コンプトンカメラは、コンプトン散乱の反跳電子を検出するガス飛跡検出器と散乱ガンマ線を検出する シンチレータの組み合わせからなる検出器であり、1 事象ごとの到来方向の決定によって高い角度分解能を 実現できるほか、他粒子由来のバックグラウンドを強力に除去できるという強みがある。現在、次期気球実 験 SMILE-3 に搭載するトリガーユニットの開発を行っている。前実験 SMILE-2+では、データ収集レート 500 Hz で不感時間が 20% を超えていたが、トリガー方式を変更した新システムを採用することで、データ 収集レート 1 kHz で約 3% を達成することができ、数ミリ秒単位で変動する GRB のような天体の観測に対 応する (吉川 2017)。本発表では、SMILE-3 に搭載する ETCC システムの概要と、3 軸 μ-PIC に対応する 新型トリガーユニット開発の現状について述べる。

MeV 領域での核ガンマ線観測と 現状

恒星の進化の過程で放出される放射性同位体は、 その核種によって様々な寿命を持つ。⁵⁶Ni (崩壊エ ネルギー 0.158 MeV, 0.812 MeV) や ⁵⁶Co (崩壊エネ ルギー 0.847 MeV, 1.238 MeV) のような元素は、数 日から数ヶ月といった短時間で崩壊する。このよう な元素の崩壊に伴うガンマ線を観測することは、元 素の生成場所を直接特定することにつながる。一方 で、²⁶Al (崩壊エネルギー 1.809 MeV) や⁶⁰Fe (崩壊 エネルギー 1.173 MeV, 1.332 MeV) のように 10⁶ 年 以上という長い寿命を持つ原子核の崩壊の観測から は、放出された元素が銀河内でどのように拡散して いくのかを知る手掛かりを得ることができる。²⁶Al や⁶⁰Feの崩壊に伴うガンマ線エネルギーはそれぞれ 1.809 MeV、1.173 MeV、1.332 MeV と比較的高く、 これらの元素を観測するためには MeV 領域での観測 が必要である。

現在、MeV 領域で最も高い感度を達成した観測は 1991 年に打ち上げられた CGRO 衛星の COMPTEL 検出器 (V. Schönfelder et al. 1993) によるものであ る。図 1 は COMPTEL の 9 年間の観測による ²⁶Al 由来の 1.809 MeV の全天マップであるが、イメージ ングの性能が不十分であるため ²⁶Al の生成源の同定 に至っておらず、銀河系内の物質拡散について議論 できる状態にない。

MeV 領域は他の波長域と比べて特に観測技術の発 展が進んでいない領域である。MeV ガンマ線は波長 が pm 程度(エネルギー1 MeV で波長~1.2 pm)と 短いため、集光光学系を使ってのイメージングが困 難である。また、MeV ガンマ線と物質の相互作用は コンプトン散乱が主体であるため、エネルギーや到 来方向と行った情報を失わずに観測することが難し い。また、衛星や検出器自体の物質中の原子核が宇 宙線と相互作用を起こし大量のバックグラウンドを 作り出す。従って、MeV ガンマ線の観測にはこれら のバックグラウンドを効果的に除去するための工夫 が必要となる。

電子飛跡検出型コンプトンカメ ラ(ETCC)と SMILE 計画

このような現状を打破するため、現在我々は電子飛 跡型コンプトンカメラ(Electron-Tracking Compton



図 1: COMPTEL による ²⁶Al(1.809 MeV) の全天 マップ (S. Plüschke et al. 2001)

Camera: ETCC)を開発している。

2.1 検出原理と従来方式との比較



図 2: COMPTEL (左) (V. Schönfelder et al. 1993) と ETCC (右) (A. Takada, et al. 2021) のイメー ジ図

COMPTEL(V. Schönfelder et al. 1993)と ETCC(A. Takada, et al. 2021)の構造イメージ図 の比較を図2に示す。COMPTEL(図2左)は2段の 検出器で構成され、前段の液体シンチレータ内でコン プトン散乱を起こし散乱点と反跳電子のエネルギーを 測定し、後段の NaI (Tl)シンチレータで散乱ガンマ 線のエネルギー・散乱方向を測定している。COMP-TEL はガンマ線や他粒子由来のバックグラウンドを 低減するため次のような工夫を行っている (G. Weidenspointnerr et al. 1993)。2つの検出器は1.58mだ け離した配置となっており、前段と後段の検出器の ヒット時間の差(ToF: Time of Flight)を取ること で地球大気からのガンマ線バックグラウンドを減ら している。さらに、前段の液体シンチレータはガンマ 線と中性子で異なる蛍光減衰時間を持つため、中性 子由来の信号を排除することができる(PSD: Pulse Shape Discrimination)。しかしこの検出方式では反 跳電子の方向を測定していないため、コンプトン散 乱の散乱平面を特定することが出来ない。そのため、 入射ガンマ線の到来方向の制限はガンマ線の散乱方 向を中心とした円環状となり、他方向からの混雑が 多く発生し排除できないバックグラウンドとなる。

そこで我々は、コンプトン散乱事象において反跳電 子の方向も測定する事のできる電子飛跡検出型コンプ トンカメラ(ETCC)を開発している(図2右)。中心 の3次元ガス飛跡検出器(Time Projection Chamber : TPC)によって散乱位置と反跳電子のエネルギー・ 反跳方向を測定し、周囲を囲むシンチレータによっ て散乱ガンマ線の散乱方向とエネルギーを決定して いる。コンプトン散乱事象の再構成に必要な全ての 物理量が揃っているため、ガンマ線の到来方向を事 象ごとに一意に決定できるという方式であり、他方 向からの混雑を大きく減らすことができる。

さらに、ETCCでは他粒子由来のバックグラウン ドを削減するため手法を利用できる。散乱ガンマ線 と反跳電子がなす角 α は、反応位置の幾何学的な情 報からも、ガンマ線と電子のエネルギーから運動学 的にも求めることができる。この 2 つの角度が大き く離れているとコンプトン散乱運動学に反するとし、 バックグラウンドとして除外する。これを運動学テ ストを呼んでいる。また、荷電粒子がガス内を飛行す る際のエネルギー損失率は粒子によって異なる。こ れを利用して粒子を識別し、検出した粒子がガス中 で止まった電子であることを保証することができる。 これらの手法を合わせて利用することで、高い S/N 比での観測が可能となる。

2.2 SMILE 実験

SMILE 実験は ETCC の原理実証と科学観測を目 的とした気球実験で、最終的に衛星搭載による全天 観測を目指している。2018 年に ETCC を利用した 天体観測能力の実証のため SMILE-2+実験を実施し た (A. Takada, et al. 2021)。この実験でのかに星雲 の観測結果について、有意度 4σ でかに星雲からのガ ンマ線を検出し、MeV ガンマ線領域で初めて全単射 イメージングに成功した。 現在、ETCC を用いた本格的な科学観測を目的とし た次期気球実験 SMILE-3 の実施に向けた開発を進め ている。2027 年にオーストラリアで1日程度の気球 観測を行い、電子陽電子対消滅線の銀河面分布など の観測を予定している。SMILE-2+と比べ、有効面 積を約 5-10 倍、角度分解能を約 2-3 倍改善し、感度 を最大約 10 倍にすることを目指している。

3 SMILE-3 に向けた要素開発

3.1 トリガーユニットの改良点

現在 SMILE-3 に搭載するトリガーユニットの開発 を行っている。SMILE-2+からの大きな変更点とし て、トリガーシステムの変更と TPC・シンチレータ の読み出しチャンネル数の増加がある。

MeV ガンマ線で明るく光る天体の中には、GRB のようにミリ秒単位で激しく変動する突発天体があ る。このような突発天体を効率よく検出するため、数 kHz 以上のデータ取得レートを達成する必要がある。 高データ取得レートを達成するうえで課題となるの はデータ読み出しによる不感時間の削減である。従 来のシステムでは、まずシンチレータのヒットでト リガーを発生させ、約 10 µs の間 TPC にヒットがあ るか確認を行う。データがある場合は TPC・シンチ レータともにデータを CPU へ送信し、データがない 場合はシンチレータのデータを削除する。トリガー を発生させてから TPC のヒット確認やデータの送信 を行っている間は新しいデータ取得が行えないため 不感時間となるが、TPC にヒットが発生しなかった 場合は不感時間は約10 µs、ヒットが発生した場合は 10 µs 程度のヒット確認時間に加え約 100 µs のデータ 送信時間が発生し不感時間となる。SMILE-2+では、 シンチレータの計数率は TPC の計数率より 2 桁程 度高く、大半は TPC にデータが無いイベントとなっ ている。そのため、現行 ETCC では (シンチレータ の HitRate) × 10 µs で与えられる、TPC にデータが 存在しない場合の不感時間の寄与が優位となり、高 データ取得レート達成のボトルネックとなっている。 SMILE-2+の運用ではデータ取得レート 500 Hz で不 感時間が 20%超、5 kHz 付近で 70%となりミリ秒以 下で急激な変化を示す突発現象の観測に適さない。

その対策として、シンチレータの Hit 後、TPC の ドの動作に成功した。今後は、NIM モジュールを使っ Hit 信号を確認し同時計数が場合のみトリガーを発 たシステムを FPGA に置き換え 3.1 節で述べたよう

生させ、各検出器のデータを読み出す方式への変更 を検討している(図 3)。この方式を採用する場合、 時間的にデータ取得した後からトリガーをかけデー タを読み出す必要があるため、シンチレータに関し て波形情報を保持できるよう回路を変更する必要が ある。新トリガー方式を用いるほか通信の高速化を 行うことで、データ収集レート 1kHz で約3% の不 感時間を達成できる (吉川 2017)。



図 3: TPC トリガー概念図 (吉川 2017)

読み出しチャンネル数の増加について、SMILE-2+ 実験では 30×30cm 角の 2 軸読み出し μ -PIC (Micro Pixel Chamber) を 0.8 mm ピッチで読み出し TPC を構成していた。SMILE-3 実験では 15×15cm 角の μ -PIC を 4 つ並べ 0.4 mm ピッチで読み出す予定で あり、読み出しチャンネルが 4 倍に増える。また、将 来 3 軸読み出し μ -PIC を搭載し飛跡の決定精度を向 上させる改良を予定しており、この場合読み出しチャ ンネル数は 3 倍となる。また、散乱ガンマ線を検出 するシンチレータを PSA (Pixel Scintillator Array) から MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) へ変更 するため、それらの変更に対応する必要がある。

3.2 トリガーユニット開発の現状

現在、上記の改良点に対応したトリガーボードの フライトモデルの設計及び製造を進めている段階で ある。

また、並行してトリガーシステムに実装する新ト リガー方式の実機テストに向けた実験も進めている。 現在は汎用の NIM モジュールを使ってトリガーロ ジックを構築し、TPC 単体でデータ取得を行うモー ドの動作に成功した。今後は、NIM モジュールを使っ たシステムを FPGA に置き換え 3.1 節で述べたよう なトリガー方式の実装を行い、TPC 以外の検出器と 組み合わせた動作テストを行う予定である。TPC に よって得られた電子飛跡の例を図4に示す。



図 4: TPC で取得された飛跡例

4 まとめ

MeV 領域のガンマ線は元素の銀河内拡散の様子と 手掛かりとなるなど重要な波長域であるが、検出方 式やバックグラウンドの問題から未だ観測が進んで いない。我々が開発している電子飛跡検出型コンプ トンカメラは MeV ガンマ線を高感度で測定可能で あり、現在科学観測を目的とした SMILE-3 実験に向 け準備を行っている。より高い時間分解能を実現す るため、新しいトリガー方式を採用したトリガーユ ニットの開発を進めている。TPC 単体での動作に成 功し、今後は新トリガー方式の実装を進めるほか各 検出器と組み合わせ動作試験を行う予定である。

Reference

- 高田淳史, 谷森達, RADIOISOTOPES, vol68, pp865-875, 2019
- 吉川慶,修士論文 (京都大学), 2017
- Atsushi Takada, et al. Astrophys. J., 2021
- S. Plüschke et al. ESA SP, Vol. 459, p. 55, 2001
- V. Schönfelder et al. Astrophys. J., 86:657-692, June 1993
- G. Weidenspointner et al. Astronomy & Astrophysics 368, 347–368, 2001

-index へ戻る

観測b02

X線天文衛星搭載用SOIピクセル検出器のX線に対す る放射線耐性の評価

藤田 紗弓

X線天文衛星搭載用 SOI ピクセル検出器の X線に対する放射線耐性の 評価

藤田紗弓 (東京理科大学大学院 創域理工学研究科)

Abstract

我々は、次世代の X 線天文衛星に搭載する X 線半導体検出器「XRPIX」の開発を行っている。XRPIX は Silicon-On-Insulator(SOI) 技術を用いて、センサー層 (Si)・絶縁層 (SiO₂)・CMOS 回路層を一体としたモ ノリシックな構造を持つことが特徴で、200µm を超える厚い空乏層と高速の CMOS 回路層を同時に実現可 能である。しかし、XRPIX のような衛星に搭載する半導体検出器は、宇宙空間を飛び交う高エネルギー荷 電粒子からなる宇宙線や天体が放射する X 線が入射することにより、放射線損傷を引き起こし、分光性能が 経時的に劣化する。特に絶縁層内に正の電荷を蓄積させシリコンと酸化膜の界面に界面準位を発生させる、 Total Ionizing Dose(TID) 効果の影響が大きい。先行研究より、TID 効果による暗電流増加は、センサー 層・絶縁層界面における空乏化することが原因であると確認されている。したがって、暗電流増加の抑制の ためには界面付近の空乏化を防ぐこと、つまり、界面付近の正孔濃度を高くすることが必要である。そこで、 TID 効果抑制の改良案としてセンサー層にドープした不純物濃度を上げることが挙げられる。我々は TCAD デバイスシミュレーションを用いて、この改良案の有効性を確かめた。今後、改良案がデザインされた素子 に X 線を照射する実験を行い、期待した性能が得られているのか検証を行う予定だ。本講演ではその詳細に ついて報告する。

1 Introduction

我々が存在する銀河中心には超大質量ブラックホー ル (SMBH) が存在し、SMBHと銀河は共に進化して いることが示唆されている。したがって、SMBHを 観測しその進化過程を知ることは、宇宙の形成史の 解明に繋がる。SMBH の進化過程の解明には、ガス や塵に埋もれた成長過程にある BH の観測が有効に なるが、観測を可能にするためには広帯域かつ高感 度な X 線天文衛星が必要である。広帯域かつ高感度 な X 線観測を実現するため、2030 年代の打ち上げを 目指す次世代 X 線天文衛星 JEDI の計画が推進され ている。JEDI 衛星は FORCE 衛星のミッションを引 き継いでおり、0.5keV-79keV という広帯域の X 線 観測を可能にするハイブリッド型 X 線検出器と、15 秒角を上回る光角分解能を持つスーパーミラーを組 み合わせて撮像を行う。XRPIX はハイブリッド検出 器の中でも、 20keV の X 線観測を行う Si 検出器で ある。





図 1: 厚いガスや塵に埋もれた SMBH

図 2: 次世代 X 線天文衛星 FORCE の外観 (現在はミッションを引き継いだ JEDI 衛星)

2 宇宙 X 線観測用 SOI ピクセル検 出器 XRPIX

X線SOIピクセル検出器のXRPIXは、Silicon On Insulator(SOI)技術を用いて、X線を検出するセン サー層、検出した信号を読み出す回路層を一体化し たモノリシック型の検出器である。XRPIXは高比抵 抗Siのセンサー層により数百µmの厚い空乏層と、 各ピクセルに搭載したトリガー機能により10µsを超 える高時間分解能を実現している。



図 3: XRPIX の断面の模式図

3 XRPIX の放射線損傷

XRPIX 開発において放射線損傷という課題があ る。XRPIX のような衛星搭載の半導体検出器は、宇 宙空間を飛び交う高エネルギー荷電粒子からなる宇宙 線や、天体が放射する高輝度の X 線を浴びることで 放射線損傷を受け、経時的に性能劣化を引き起こす。 特に「TID 効果」の影響が大きく、BOX 層に移動度 の低い正孔が蓄積する「蓄積正電荷」と、シリコンと 酸化膜の界面に「界面準位」を発生させる。これま で TID 効果の影響を抑制するために、XRPIX のピ クセル構造の改良が重ねられてきた。最新の Pinned



図 4: TID 効果

Depleted Diode(PDD)構造ではピクセル構造の改良 が行われ、センサー層と BOX 層界面付近に P 型と N型の不純物をドープすることで、TID 効果の影響 を抑制し劇的に放射線耐性が改善された。しかし、 PDD 構造においても放射線損傷の影響を引き続き受けている。TID 効果による暗電流増加は蓄積正電荷ではなく界面準位の増加が寄与していることがわかっている。また TCAD シミュレーションにより界面付近の正孔濃度分布を確認すると、放射線損傷後に界面が空乏化する。以上のことから、放射線損傷を起こすと、空乏化した界面から界面準位由来の暗電流が増加すると考えられる。



図 5: TCAD を用いた 0rad,40krad での正孔濃度シ ミュレーション

4 暗電流増加に抑制のための改良 案

PDD 構造では界面付近が空乏化するため、暗電流 増加の抑制に有効ではない。空乏化を防ぐためには、 界面付近のキャリア濃度を高くする必要がある。よっ て、ドープしているアクセプタ濃度 (BPW1) をあげ ることで空乏化を防ぐ改良案が挙げられる。



図 6: 界面空乏化の様子と、XRPIX8.5 の断面図にお ける BPW1

そこでシミュレーションにより BPW1 の濃度を上 げた際の、放射線前後の界面付近の正孔濃度分布を 比較した。結果より界面付近の空乏化が防げている ことから、BPW1 の高濃度化は暗電流増加の抑制に 有効であると考えられる。



図 7: TCAD を用いた BPW1 濃度変更後の 0rad,40krad での正孔濃度シミュレーション

5 今後の展望

BPW1の濃度を上げることで、耐圧・センスノー ド容量の増加・pstopと基盤間のリーク電流の3つの 懸念点が挙げられる。1つ目の耐圧の問題とは、PN 接合にかかる電界が大きくなり、アバランシェ降伏 を起こすことで素子の破壊につながることである。



図 8: 高濃度化による懸念点(耐圧)

2つ目の問題は、BPW とセンスノード間の空乏層 が縮まることで、センスノード容量が大きくなると、 ゲインおよびノイズの劣化を起こすことである。



図 9: 高濃度化による懸念点(センスノード容量の 増加)

3つ目は pstop から Si 基盤に正孔が流れ出すことで パンチスルーの危険性が生じる。 それぞれシミュレーションで評価することで BPW1

高濃度化の安全性を確かめたい。また、今後デザイ



図 10: 高濃度化による懸念点(リーク電流)

ンされた素子と従来の素子に同様の放射線照射実験 を行い、新しい素子が性能劣化を抑制できているか 評価する予定である。

Reference

北島正隼 2022, 東京理科大学 修士論文

鑓田敬吾 2019, 東京理科大学 修士論文

K. Hagino et al. 2020, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A.978, p.164435 -index へ戻る

観測b03

ガラスリボンを用いたX線反射鏡の開発

狩野 佑成

ガラスリボンを用いた X 線集光系の開発

狩野 佑成 (青山学院大学大学院 理工学研究科)

概要

X 線の観測を行うことは様々な天体現象を解析する上で有効な手段であり、X 線望遠鏡を用いた観測が行われている。一方で、宇宙空間に打ち上げることから X 線望遠鏡の軽量化や小型化が課題となっており、これらの解決によって小型衛星への搭載等が可能になると考える。

本研究では、X 線望遠鏡のためのガラスリボンを用いた X 線集光系の開発を行っている。ガラスリボンと はリボン状で極薄なガラスの名称で、小型化と軽量化に向けて利用に至った。現段階では、ガラスリボンに 反射鏡面を生成、その粗さと形状を求めることで実用化について確かめた。また、Wolter-I 型に配置して 2 回反射させる光学系を設計、ハウジング制作においても検討を進めている。

1 研究背景

宇宙から飛来する多くのX線は非常に微弱である ため、X線望遠鏡に高効率な集光を可能にするX線 集光系を搭載することが求められる。一方、衛星軌 道に打ち上げるために小型かつ軽量であること、打 ち上げ時の衝撃と振動に耐えることも求められるた め、「多重薄板型」のX線集光系を用いることが一 つの答えとなった。しかし、小型衛星等への搭載を 検討するためには更なる小型化と軽量化が必要であ り、ガラスリボンの特徴を活かす本研究が発足した。

2 手法

2.1 斜入射 X 線望遠鏡

検出感度を高めるためにはスリットカメラの有効 面積を広げて受光量を増やす必要があり、2回の全 反射で焦点面に集光/結像させることで可能になる。 そのために必要となるものがX線集光系であり、筐 体と反射鏡から成る。特に、厚さの薄い反射鏡を同 心円状に多重に積層したものを「多重薄板型」と呼 ぶ (図1)。

X 線の反射率はそのエネルギーと入射角や反射鏡 面の素材と粗さに依存しているため、確実な全反射 をさせるために適した反射鏡を開発することが重要 となる。



図 1: X 線集光系のイメージ図

2.2 X線の反射率と反射鏡面の粗さ

反射面の粗さ σ(RMS:二乗平均平方根)による反 射率低下への寄与を考慮するため、スカラー平面波が 粗さを持った媒質に入射した場合の散乱場を考える。

媒質の表面はミクロとし、局所的な高さhが平均 面 < h >= 0 を中心にして

$$P(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \frac{h^2}{2\sigma^2} \tag{1}$$

のガウス分布をしているとする。この表面に、波長 λ の平面波 $\exp(i(2\pi s/\lambda - \omega t))$ が入射角 σ で入射し た場合を考える。s は光路に沿った長さであり、2本 のビームが平行に入射して h だけ高低差がある面素 にそれぞれ当たった場合、(図2)の様になる。

2本のビームの光路差は、2*h* cos ø(正反射方向から 見たとき)である。よって、この時の正反射光の強度



図 2: 散乱モデルのイメージ図

R は次式で得られる。

$$R_0 \left| \int_{-\infty}^{\infty} P(h) \exp\left[i \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} (s + 2h\cos\phi) - \omega t \right\} \right] dh \right|^2$$
(2)

ここで、øの代わりに媒質面からビームまでの射入 射角 θ を用いて、

$$= R_0 \exp\left\{-\left(\frac{4\pi\sigma\cos\phi}{\lambda}\right)^2\right\}$$
(3)

この指数項を Debye-Waller(DW)factor と呼び、反 射率計算の際に物質中での屈折を考慮することなく、 理想的な表面/界面によって決まるファクターをかけ ることで実際に得られた反射率を再現する。

しかし、この DW モデルでは射入射の領域で粗さ としており、図の上部が A、下部が B である。 の影響を過剰に見積もってしまい、実数値と合わな い可能性があると考えられる。そこで、物質内部での 屈折を考慮して (3.4) 式の $\sin^2 \theta \epsilon \sin \theta \sqrt{n^2 - \cos^2 \theta}$ と置き換えると、

$$R = R_0 \exp\left\{-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2 \sin\theta\sqrt{n^2 - \cos^2\theta}\right\} \quad (4)$$

と表せる。この指数項を Nevot-Croce(NC)factor と 呼び、NC モデルでは臨界角以下での入射角が微小 な領域においても実数値の精密な再現が可能である。

ガラスリボン 2.3

本研究では、ガラスリボンと呼ばれるリボン状で 極薄なガラスを用いた反射鏡を開発した。

特徴とその恩恵として、表面が非常に滑らかであ ることから高い反射率を維持すること、形状が柔軟 で加工がしやすいことから円錐形に巻くことでつな ぎ目なく同心円状に配置することの2つが可能だと した(表1)。

| 表 | 1: | ガラ | スリ | ボン | の仕様 |
|---|----|----|----|----|-----|
|---|----|----|----|----|-----|

| | А | В | | |
|----------------|----------|----------|--|--|
| 厚さ (mm) | 0.015 | 0.045 | | |
| 幅 (mm) | 35 | 15 | | |
| 密度 (g/m^3) | 2.5(ガラス) | 2.5(ガラス) | | |



図 3: ガラスリボンのイメージ図

結果 3

3.1 スパッタリング

スパッタリング法を用いて、ガラスリボンに反射 鏡面を生成した (図4)。タングステンをターゲット



図 4: スパッタ後のガラスリボン

可視光の限りでは反射鏡面になっていると判断出 来る。以降の実験で、この反射鏡面が反射鏡として 実用可能かどうか確かめた (Aのみ)。

反射率測定 3.2

ガラスリボンの反射鏡面の反射率を測定、各粗さ における反射率の理論曲線と比較することで粗さを 考える。本研究では、2種類のガラスリボンを利用 推定した。以下の3つのグラフは、理論曲線と比較 的一致したものを抜粋している。



図 5: 2nm と比較したグラフ



図 6: 3nm と比較したグラフ



図 7: 4nm と比較したグラフ

以上の3つのグラフより、反射鏡面の粗さが 2~ 4nm 程であると判断できる。

3.3 形状測定

ガラスリボンの反射鏡面の形状を、非接触3次元 測定を用いて確認した (図8)。 ガラスリボンに反射鏡面を生成しても、極端な凹凸 は出来ないと判断出来る。

4 結論

スパッタしたガラスリボンの性能を調べ、粗さが 4nm より小さいことから反射鏡として扱えると判断



図 8: 3 D 表面図

出来る。反射率測定、形状測定についてはどうして も誤差が出てしまうため、統計的なデータを取るた めにも測定を重ねたい。

5 今後の展望

今後は筐体のモデル設計に着手、筐体を製作後に 反射鏡をセットして性能を確かめたいと考える。特 に、口径 (内径) のサイズを検討することが難しく、 開発可能なサイズであるか、集光効率は良いか等に ついて深く議論を行う必要がある。また、ガラスリ ボンの特徴ゆえに一点に力を加えると割れてしまう ため、人間の手で扱う難しさもある。反射鏡を如何 にして筐体内部に設置するか、また如何にして固定 するか等についても試行錯誤していきたい。

6 参考文献

Reference

山下広順, 波岡武, 「X線結像光学」, 培風館, 1999

-index へ戻る

観測b04

蛍光X線による月面の元素マッピングを行うX線カメ ラの開発

上林 暉

蛍光X線による月面の元素マッピングを行うX線カメラの開発

上林 暉 (京都大学大学院 理学研究科)

Abstract

月惑星の元素組成とその分布は、天体の起源や進化の解明及び宇宙資源の凝集箇所を知るうえで重要な情報 である。元素分布を調べる方法として、太陽を一次光源として放射される月面の元素由来の蛍光 X 線撮像 があり、月面の地質、地形情報との比較が可能な高解像度のマッピング探査が期待できる。しかし、将来の 着陸探査や資源採掘に必要な 1 km の解像度に対して、従来の X 線 CCD カメラ搭載の月周回衛星の解像度 は 20 km に留まる。このため、元素の凝集箇所を的確に提示することができない。これは周回軌道上の衛星 の高速飛行で生じる被写体のプレが原因であり、その根本は X 線 CCD の低い時間分解能にある。この状況 を打破するために、我々は独自の「X 線 SOI 撮像素子 (XRPIX)」と、それを用いた「X線 SOI カメラ」を 開発する。XRPIX は従来の CCD 素子と異なり、X 線の入射のタイミング信号を出力する機能を持つので、 CCD を用いた検出器よりも 5 桁優れた時間分解能 (10 μs) を実現する。これにより、秒速 1.6 km で周回す る高度 100 km の軌道上においても、被写体のプレを抑えることができるため、1 km の解像度を達成する ことができる。また、X 線 SOI は 1–20 keV 帯域で優れた分光性能を持つため、Mg, Si, Ca, Fe といった月 面の主要元素由来の蛍光 X 線を同定するのに有用である。さらに、高い放射線耐性を持つので、月惑星探査 における搭載機器として最適である。X 線 SOI 素子自身が高機能回路を内蔵するので、全体システムをコン パクトにすることも可能である。本講演では、XRPIX を用いた、蛍光 X 線による月惑星の元素マッピング を行う X 線カメラについて発表する。

1 研究背景

1.1 X線蛍光を用いた月表面の撮像

月惑星を対象とした探査において、天体表層物質 の元素組成を取得することはとても重要である。惑 星の元素組成はその惑星が過去に経験した物質進化 の歴史を強く物語っており、惑星の起源や進化を紐 解く上で必要不可欠である。例えば、惑星での難揮 発性元素(Al, Ca, Th U)と揮発性元素(H, C, N, K)の量比は、その天体全体での揮発性物質の散逸 度を示し、熱変成を知る指標となる。

軌道上から惑星の元素組成を知る手段として、蛍光 X線分光がある。蛍光 X線は元素特有のエネルギー を持っている。そのため、そのエネルギーの X線イ メージを作ることで、元素のマップを作ることが可 能である。特に太陽 X線を一次光源として、惑星か ら放出される月面元素由来の蛍光 X線撮像は有力な 手段の一つであり、月面の地質、地形情報との比較 が可能なマッピング探査が期待できる。

1.2 月表面の蛍光 X 線撮像の現状



図 1: Apollo15,16 による Al/Si の観測 (上) と Mg/Si の観測 (下)(Heiken et al. 1991) より

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

2007年に打ち上げられた、月軌道衛星「SELENE (Selenological and Engineering Explorer)」は遠隔 蛍光 X 線分析装置 (SELENE/XRS)を搭載してい る。SELENE/XRS は 16 枚の1インチ四方 X 線検出 用 CCD を用いており、探査機の軌道高度 100 km か ら、月表面の元素分析を 20 km の解像度で行える性 能をしている。この解像度は、月面の推定主要元素か ら放出される蛍光 X 線が 100 cps 程度以上のカウン トを太陽活動が静穏時にも検出できることと、CCD の時間分解能によって決定されている。

着陸探査を行うローバーでの移動範囲が1 km であ ることを考えると、現在実現可能な解像度では、将 来の着陸探査や宇宙資源採掘に対し、的確な元素の 濃集箇所を提示することができない。将来の着陸探 査や宇宙資源採掘のためには、高解像度の月面の撮 像観測が必要であり、優れた時間分解能による撮像 観測が重要なのである。



図 2: マッピングの概略図

2 XRPIX について

XRPIX(X-Ray SOI Pixel Sensor) は、X 線天文学 用 SOI ピクセル検出器であり、その最大の特徴は、 読み出し方式にある。XRPIX の読み出し方式は「フ レーム読み出し」と「イベント駆動読み出し」の二 種類がある。「フレーム読み出し」は、従来の CCD の読み出し方式と同様で、入射イベントの有無に関 わらず、露光・読み出し・リセットのサイクルを繰 り返し行い、特定の領域を読み出す方式である。そ れに対し、「イベント駆動読み出し」は、X 線が入射 したタイミングで、トリガー出力したピクセルのみ 読み出しを行う。この「イベント駆動読み出し」は XRPIX 独自の読み出し方式であり、この読み出し方 式により、XRPIX は < 10µs という優れた時間分解 能を実現する。これは CCD を用いた検出器よりも 5 桁優れた時間分解能である。



図 3: XRPIX と CCD の読み出し方式の違い

月惑星を構成する物質の主要元素は様々だが、月表面 の元素分析を考えた時に、特にマグネシウム (Mg)、 アルミニウム (Al)、ケイ素 (Si) の酸化物で地球地殻 の8割、始原的なコンドライトという隕石でも7割以 上を占めるので、その三元素を識別できることは重要 である。マグネシウム (Mg)、アルミニウム (Al)、ケ イ素 (Si) の波長領域は 1-2 keV にあるので、月表面 の元素分析では、1-2 keV における高いエネルギー分 解能が要求される。XRPIX は、小型素子で 1.5 keV に対し FWHM で 204±2 eV というエネルギー分解 能を達成しており、月表面の元素分析で撮像が期待 できる性能を持っている。また XRPIX は、自身が 高機能回路を内蔵しているので、全体システムをコ ンパクトにすることができる。さらに、高い放射性 耐性を持つので、月惑星探査における搭載機器とし て最適である。

3 コーデッドマスク法について

3.1 コーデッドマスク法とは

宇宙物理における撮像系には、様々なものが存在 するが、その一つがコーデッドマスク法である。図 4 に概略図を示す。これは、検出器に入ってくる光を まずマスクを通して撮影 (encode)し、マスクによる 効果を後から逆解きしてやることで、元の像を再構 成 (decode)する撮像手法である。コーデッドマスク 法は、光を曲げることなく、かつある程度の視野を 確保することができる。また、ミラーやレンズといっ た撮像系より、焦点距離の観点からはるかにコンパ クトに作成することができる。



図 4: コーデッドマスク法の概念図 (渡邊泰平 2022) より

コーデッドマスク法の重要な性質の一つに、線形性 がある。図4でもわかるように、各検出器のピクセ ルに集光される光量はその検出器から見える範囲の 光量の足し合せになる。この性質は画像再構成の際 に重要である。また、再構成を行えるだけのイベン ト数が必要となってくる。

3.2 マスクパターンの作成

コーデッドマスク法を利用するにあたって、その マスクパターンは撮像性能に関わるので非常に重要 である。マスクパターンを作成する際に考えなけれ ばならないこととして、自己相関関数がある。式1は 自己相関関数を表している。自己相関関数とは、マ スクのパターンを A としたときに、その位相を *i* だ けずらしたものが元のパターン A とどれだけ似てい るかを表す度合いである。

$$c(i) = (A * A)_i = \sum_{i=0}^n A_i A_{i+j}$$
(1)

当然、最も似ているのは位相をずらしていないとき (i = 0)であるから、c(i)はi = 0にピークを持つ。一 方、位相をずらしても基本的にはある程度似たパター ンが存在するので、c(i)は $i \neq 0$ でも自然数の値をと る。マスクパターンを考えたとき、理想的なのは自己 相関関数が単一のピークを持ち、かつその他の位相 では低く平らであるマスクパターンである。このよう なマスクパターン A を URA(Uniformly Redundant Array)という。URA はその要素数 n によって様々 な種類がある。

• Quadratic residue sets : n が素数

• Twin prime sets : n = p(p+2) p, p+2 は素数

• Pseudo-noise sets : $n = 2^{m-1}$ m > 1 , $m \in N$

例えば、Twin prime sets でn = 35 = (5*7)にあたる URA は式2のようになる。

$$a_i = [1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0]$$
(2)

こうして得た URA を用いて、 $a_i = 1$ なら透明に、 $a_i = 0$ なら不透明にすることで、図 5 のようなマス クパターン (基本パターン)を作ることができる。先 述の通り、URA から作成されたマスクパターンはそ の自己相関関数が単一のピークを持ち、かつその他 の位相では低く平らとなっている。そのため、図 5 の基本パターンの位相をずらしたパターンは元のパ ターンに対して直交することになる。



図 5: 7*5 のコーデッドマスク

ここで、基本パターンから図6の右のようにマス クを作り、この中から基本パターンのサイズを切り 取ることを考えると、切り取られたパターンは基本 パターンの位相をずらしたパターンになり、どの2 つも同じにならず直交する。故にこのマスクを通し て観測を行うと、光がきた方向と影が1対1対応し、 光源の方向を知ることができる。



図 6: コーデッドマスクの作成方法

4 軌道上での検討

実際、観測するとき、どれほどのサイズでどれほ ど時間がかかるかを考える。図7は撮像モジュール にXRPIX、光学モジュールにコーデッドマスクを用 いたX線カメラである。表1の月面のマッピングに 必要とされる性能から、表2のようにマスクの要素 数、パターン、サイズを決定した。実際に作成した マスクパターンが図8である。



図 8: 作成したマスクパ

図 7: X 線カメラの概念図 ターン

| 表 1: 要求される | X 線カメラの性能 |
|------------|-----------|
|------------|-----------|

| f | 自分解能 | 0.573 $^{\circ}$ | |
|---|-------|---------------------|--|
| F | 時間分解能 | $< 0.6~\mu {\rm s}$ | |
| ł | 見野 | 30° | |

| 表 2: | マスク | に必要な性能 |
|----------|-----|--------|
| · 1 ~ 2. | | |

| マスクピクセルピッチ | <3.0 mm |
|------------|--|
| 素子面積 | $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ |
| マスク層面積 | $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ |

以上の X 線カメラで全球のマッピング撮像を行う とき、どれほどの時間がかかるかを先行研究 (Ogawa et al. 2008)を参考に、概算してみる。先行研究は、 月周回衛星かぐやに搭載された月面のマッピングを 行う検出器、XRS で月の元素マッピングにかかる時 間をシミュレーションしており、フレアのランクご とにどれだけの蛍光 X 線が出るかを計算している。 かぐやの XRS は有効面積が 100 cm² で視野が 12 [°] × 12[°] であり、今回設計した X 線カメラの有効面 積は 100 cm² で視野が 30[°] × 30[°] である。また今回、 素子の量子効率は 100 %、太陽フレアは C1 クラス のものが常時起こると仮定し、撮像に必要なカウン ト数は、マスクピクセル一つに 100 カウントの光子 数を稼ぐためのカウント数とした。元素ごとの、実 際に撮像にかかる時間が表 3 に示してある。

表 3: 撮像にかかる時間

| 元素 | Si | Al | Mg |
|-----------------------|------|------|------|
| カメラへの入射光子数 (counts/s) | 400 | 400 | 150 |
| 視野内必要観測時間 (hour) | 0.28 | 0.28 | 0.74 |
| 全球必要観測時間 (year) | 0.4 | 0.4 | 1.1 |

5 まとめ

月の元素マッピングを行う X 線カメラについて、 求められる性能から、サイズ等の設計を行い、概算 ではあるが計測にかかる時間を見積もった。全球の 計測に必要な時間は Al、Si で 0.4 年と一見観測がで きそうに見えるが、コーデッドマスク法は原理的に 線形性を持っており、コントラストの低いものの撮像 に対し、必要統計量が増えることが考えられる。ま た、高速で移動しながらのコーデッドマスクによる 撮像で、画像の再構成は容易ではない。そのため今 後、シミュレーション等による検討が必要であると 考えている。

Reference

Heiken et al. 1991. Lunar source book 渡邊泰平 2022 東京大学大学院修士論文 Ogawa et al. 2008. EPS ——index へ戻る

観測b05

超広帯域クアッドリッジアンテナの性能評価

向井 一眞

超広帯域クアットリッジアンテナの開発

向井 一眞 (大阪公立大学大学院 理学研究科)

Abstract

次世代大型電波観測装置の開発計画において、一つの観測装置に比帯域 100%以上という極めて広い適用可 能帯域幅を要求する事例が急増している。他方、ALMA に代表される従来観測機器においては、矩形導波管 フロントエンドの採用が一般的であった為、その比帯域幅は原理的に 66%以下に制限されてきた。この両者 のギャップを克服するため、近年は比帯域 100%超が期待出来るクアッドリッジアンテナ (QRA) の開発が活 発化している。VLBI における主要輝線は 22, 43, 86 GHz といったさらに高周波帯に存在するため、QRA の高周波化は次世代 VLBI 広帯域同時観測にとって非常に重要である。そこで我々は 6 - 23 GHz 帯での VLBI 同時観測を目的として QRA の開発を進めている (2023 年秋季年会 抱 江他, 2023 年秋季年会 山崎 他, 2020 年秋季年会 長谷川他)。この QRA は、クアットリッジフィードホーンと QRA 同軸変換から構成 されている。すでに、電磁界解析ソフトを用いた QRA の設計を行っており、反射損失が - 20 dB 以上の 低損失な設計が得られている。その後、上記の設計で試作した QRA を VNA を用いて測定した結果、反射 損失が - 15 dB ほどと悪くなっているのを確認した。本講演では、6 - 23 GHz における QRA の測定結 果とシミュレーション結果を比較し、結果が一致しなかった原因について考察する。

1 研究背景

近年、電波天文観測装置において同時にたくさん の輝線を観測するために、広帯域化が勧められてい る。しかし、矩形方形導波管のサイズの条件上、周波 数帯域はオクターブなものまでしか同時観測をする ことができない。ここで、導波管の形を変えること で比帯域限界を超えるコンポーネントを開発するこ とを試みた。現段階の研究では、4つのリッジがつい たホーン QRA(Quadruple Ridged Antenna) を設計 することで、VLBI 観測局の広帯域化への取り組みを 加速させ、ブラックホール等の観測的研究を大きく 促進することができる。本講演では、6-23 GHz, 比帯 域 120% 程度を1台で集光可能な超広帯域フィード として Quadruple Ridged Antenna (QRA) に着目 し、ホーンアンテナ型と80Ωの同軸導波管変換を採 用した QRA を使うことで、1:4 のインピーダンス帯 域幅を実現することができ、それ に続く QRA 導波 路と呼ばれる同軸変換によって、導波管コンポーネ ントから同軸ケーブルへと変換ができ、大規模電波 干渉計群 (Square Killometer Array) を初め、QRA の採用が考えられる将来開発計画に対しても、特性 向上などの観点で貢献できると考える。また、以下 に今回のクアッドリッジアンテナが活躍するサイエ ンスを記載する。星の終末の超新星爆発によってで

できる中性子星が現在までに約 3000 天体ほど見つ かっている。その発見されている中性子星のほとん どは自転に伴う周期的な X 線や電波のパルスが見ら れている。しかし、近年、強い放射を示し自転の急減 速を示す中性子星が複数見つかり、中性子星が極限 的に強い磁場を帯びているとする「マグネター」仮 説が定説となった。このマグネターだが、観測的特 徴は、X 線で定常的に光りながら電波では光らない ことであった。ところが最近、10 年かそれ以上の間 隔で1度、アウトバーストと呼ばれる X 線増光が発 生し、数ヶ月間だけ電波放射も示すものが見つかっ た。



図 1: アウトバースト時のマグネターの電磁放射スペ クトル

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

上図は、アウトバースト時のマグネターの電波放射 スペクトルの図で横軸が周波数、縦軸が平均電波強度 となっている。先行研究では、6GHz までと 100GHz 以上の帯域で観測が行われているが、6-100GHz では 観測が行われていない。そこで 6GHz 以上でより広 い同時観測を目標とし、6-18GHz 比帯域にして 100% の幅に設定されたが、受信機に使われている導波管 の比帯域は 66%が限界なので、比帯域 100%を網羅 する観測用の装置を新たに開発する必要性があった。 そこで、我々は QRA に着目し、開発を行った。

2 QRAの構造

QRA は QRA-同軸変換とクアットリッジフィー ドホーンで構成されている。

QRA の構造の前に通常の矩形導波管について説明 する。

2.1 導波管

Horn によって導かれた電波は導波管といった円形 や矩形、方形の断面を持つ金属製の中空官の構造を したものによって伝播される。自由空間から導波管 に電磁波が入ると導波管モードに変換される。矩形 導波管内部では、電波の進行方向に対して垂直な方 向にのみ電解がたつ TE モード、電波の進行方向に 対して垂直な方向にのみ磁場がたつ TM モードが存 在するが、矩形導波管においては、TE10モードで伝 送される。



図 2: 導波管の伝送モード

2.2 QRA-同軸変換

QRA-同軸変換とは、図のように、リッジを4つ搭載している形をしており、自由空間からやって来る

電波は、リッジ導波管を通じて、水平偏波と垂直偏 波に分かれ、最終的には同軸ケーブルへと伝送され る仕組みとなっている。同軸–リッジ変換部分では、 電磁界モードである QRA モードから TEM モードに 変換する必要性があり、磁界の向きを考慮して、同 軸は電波の進行方向に対して垂直に刺さる構造をし ている。



図 3: QRA-同軸変換の詳細

2.3 クアットリッジ導波管

今回使用する Quadruple Ridge 導波管 (Quadruple Ridged Waveguide: 以下 QRW) は、通常の円形導波 管内部に 4 つのリッジと呼ばれる薄い板状のものを 挿入し、広帯域化を図ったものである。今回の研究背 景における広帯域化は比帯域が 100%超えることを 目標としており、通常の導波管の比帯域は 66%でそ の目標を達成することができないため、比帯域 100% 以上を確保できる QRW に着眼した。



図 4: クアットリッジ導波管

2.4 クアットリッジフィードホーン (QRFH)

今回作るモデルとしては、一体型構造で製作する ことができないので、feed 部分、リッジ部分 (2 種類) の計 3 種類のモデルを組み立てることにより、QRA を作り上げることにした。



図 5: 製造されたクアットリッジフィードホーン

2.5 QRFH の電界

電波が入ってくる入り口では①のように円形導波 管の電界(TE11モードと呼ばれる基本モード)が立 つ。続いてその先に進むとクアッドリッジ構造に入っ ていく。②では少しリッジが入っている構造で、円 形導波管の基本モードから対面にあるリッジ間で電 界が立つようになる。そして根元の方まで伝播が進 むと、③のように、よりリッジの対面間距離が小さ くなり、電界はリッジ間距離がより近い場所で電界 が立つようになる。この伝搬の仕方は平行平板線路 のようになっており、平行平板線路にはカットオフ 周波数がないため、円形導波管のカットオフ周波数 が低周波側に下がり、広帯域化できる仕組みになっ ている。



図 6: QRFH の電界分布

3 QRA-同軸変換の性能評価

同様の QRA-同軸変換 2 個 (オレンジ) を円形リッ ジ導波管 (黄色) を介して直結した状態で実施した。 また挿入損失、反射損失、交差偏波 (X-pol(R1-F2, R2-F1))の関係を示す。(ただし、同軸がキャビティ 側に配置されている方を Rear(以後 R と表記)、同 軸がクアッドリッジ導波管側に配置されている方を Front(以後 F と表記)と決めている。)今回の測定 は、Rear 側の経路が S のような形、Front 側の経 路がコのような形になるような測定をしている。青 がシミュレーション、赤が実測である。



図 7: QRA-同軸変換のポート定義



図 8: QRA-同軸変換の測定結果 (挿入損失)



図 9: QRA-同軸変換の測定結果 (反射損失)



図 10: QRA-同軸変換の測定結果 (交差偏波)

4 性能評価

ここでは、本搭載用の2.92mm 同軸出力の QRA-同 軸変換を用いた測定データ紹介する。試作用のリッジ 幅 1.5mm の QRFH と本搭載用のリッジ幅 1.4mm の QRFH 使用した。QRA の実測は、QRA-同軸変換と QRF を接続して Front port と Rear port に VNA の ケーブルを繋げて反射損失の測定を行った。(ただし、 同軸がキャビティ側に配置されている方を Rear(以後 R と表記)、同軸がクアッドリッジ導波管側に配置さ れている方を Front(以後 F と表記)と決めている。)



図 11: QRA のポート定義

 $(\boxtimes 13, \boxtimes 15)$



図 13: 実測の様子-本搭載モデル



図 14: 試作モデルの性能結果

図 15: 本搭載モデルの性能結果

5 まとめ

2.92mm-同軸変換を用いた測定では、シミュレー ションと大きく異なる値が得られた。この原因はお そらく 2.92mm コネクタから芯線に至る過程で損失 があるのではいかと考えている。また、1.0mm を用 いた測定でも低周波側ではシミュレーションよりも 悪くなっているため、QRFH の切削誤差等もあるの ではないかと考えている。今後は、製作所からいた だいた同軸変換のデータを基に再度シミュレーショ ンを行い具体的な原因を明らかにする。

4.1 試作モデル

QRA-同軸変換リッジ幅 1.4mm, 2.92mm 同軸出力, QRFH リッジ幅 1.5mm (図 12, 図 14)



図 12: 実測の様子-試作モデル

4.2 本搭載モデル

QRA 同軸変換リッジ幅 1.4mm, 2.92mm 同軸出力, QRFH リッジ幅 1.4mm -index へ戻る

観測b06

VERA 水沢 20 m 電波望遠鏡に搭載する 6 - 18 GHz 帯広帯域受信機の開発

野原 祥吾

VERA 水沢 20 m 電波望遠鏡に搭載する 6-18 GHz 広帯域受信機の開発

野原 祥吾 (山口大学大学院 創成科学研究科)

Abstract

中性子星やブラックホールのようなコンパクト天体をはじめとする高エネルギー突発現象について、観測 的理解を深めるためには、粒子加速に伴う非熱的放射を反映するセンチ波帯を広範にまたがり、同時に観測 を行うことが重要である。一方、近年、メガ・コンステレーション計画によって約1万機の通信衛星が打ち 上げられ、センチ波帯の強い送受信が行われるようになっているとともに、地上でもセンチ波帯の利用は高 まっている。そのため、地上でのセンチ波帯の観測は、広帯域装置の開発の難しさに加えて、これらの人工 電波干渉 (RFI)の影響を避ける必要がある。このような状況から、電波観測システムの広帯域化が進んでい るにも関わらず、センチ波帯においては数 GHz を超えるような広い帯域を同時に観測するシステムの開発は 最近まで進んでこなかった。

本研究では、このような状況を打開するために、特定の帯域を急峻に遮断でき、かつ低損失な高温超伝導 フィルタの搭載および広帯域給電部・光学系を開発し、現在の国立天台水沢 VLBI 観測所 20 m 望遠鏡に搭 載されている C 帯 (6.3–7.0 GHz) 受信機を現在開発中の 6–18 GHz 帯広帯域受信機と換装する計画をして いる。まず、受信機の仕様を決定するために、搭載予定のスターリング冷凍機の性能評価試験と、高温超伝 導フィルタの通過特性や遮断帯域の温度依存性を調査した。現在、冷却受信部における予想雑音温度の定量 測定を行い、要求仕様を満たすことのできる受信機の詳細設計を進めている。

1 研究背景

1.1 科学的背景

宇宙にはさまざまな星が存在し、その中にほぼ中 性子のみでできている中性子星が存在する。一般的 な中性子星の特徴は、自転を伴う周期的な X 線や電 波のパルスと周囲に約 10¹² G と強力な磁場を帯びて いる点である。

近年、一般的な中性子星とは異なり自転の急減速 を示し、周囲に約10¹⁵ Gと極限的に強い磁場を伴う 中性子星、通称マグネターが発見されたさらにマグ ネターに一般的な中性子星とは異なる特徴があり、静 穏時は X 線では常に光っているにも関わらず電波で は光らないことである。しかし、アウトバーストとい う X 線増光現象後の数ヶ月間のみ電波が観測された。 図1はマグネターである XTE J1810–197 がアウト バーストした際の電波帯のスペクトルである (Eie et al. 2021)。図1より、10 GHz 以下 (図1赤枠)のスペ クトル指数が負であるのに対して、10–100 GHz(図1 青枠)のスペクトル指数は正であることから、異なる 放射機構の現象がマグネター近傍で起こっているこ とが示唆されている。



図 1: XTE J1810–197 がアウトバーストした際の電 波スペクトル (Eie et al. (2021) Fig5 一部抜粋)

1.2 VERA 水沢 20 m 電波望遠鏡

VLBI Exploration of Radio Astrometry (VERA) とは、超長基線電波干渉計 (VLBI) を用いて銀河系 の3次元立体地図を作るプロジェクトである。VERA 水沢 20m 電波望遠鏡は VERA プロジェクトで作ら れた4局の口径20mの電波望遠鏡のうちの1局で、 岩手県奥州市に位置する水沢 VLBI 観測所内にある。

VERA 電波望遠鏡の特徴の1つは、2ビーム観測 により2つの天体を同時に観測できる点である(干渉 計サマースクール 2005)。図2は2ビーム観測を可 能にするプラットフォームである。図2の黒いプラッ トフォームの足を伸び縮みさせることで受信機内に 焦点がくるようにステージを移動させる。様々な受 信機が図2上部のステージに固定されており、本受 信機もステージ上に搭載する予定である。



図 2: VERA 2 ビームプラットフォーム

1.3 人工電波干涉

人工電波干渉 (RFI: Radio Frequency Interference) とは、産業利用の電波を受信してしまう現象で ある。産業利用の電波は天体信号と比較してとても 強く、微弱な電波を受信する設計の電波天文学用の 受信機に入力されると以下の影響がある。

- 1. 天体信号が埋もれてしまう
- 2. 受信機内の増幅器が正常に動作しなくなる可能 性がある

近年、メガ・コンステレーション計画によって約1万 機の通信衛星が打ち上げられており、センチ波帯を 用いた強い送受信が行われるようになっている。

2 研究目的

本研究では 1.1 節の異なる非熱的放射を反映して いると考えられているセンチ波帯の 6–18 GHz を同 時に観測できる受信システムの開発を行っている。

本受信システムに搭載する受信機は3つの要求仕 様を満たす必要がある。

- 導波管の物理的制約を超える 6–18 GHz 帯の広 帯域を同時に取得
- 2. 広い帯域内に現れる非常に強い RFI を初段増幅 前に遮断可能な低損失なフィルタの挿入
- 3. 受信機を搭載するステージに大きさと重量制限

以上の要求仕様を満たすために、本受信機の開発 目標は以下の3つである。

1 つ目は、広帯域給電部である。従来センチ波帯 で使用されている導波管では物理的な制約により、 比帯域限界の 66 % を超えることはできない。そこ で、本受信機では広帯域給電部である Quad Ridge Antenna (QRA)を使用することで、6–18 GHz、比 帯域 100 % の達成を目指している。

2つ目は、高温超伝導フィルタの搭載である。1.3 節でもあるように、RFI を受信してしまうと観測が 行えない。そこで、本受信機では低損失かつ急峻に 特定の帯域を遮断できる高温超伝導フィルタ (HTSF: High Temperature Superconducivity Filter) を初段 増幅前に搭載しようと考えている。これにより、RFI の影響をなくすことができる。



図 3: スターリング冷凍機の Cryotel CT

3つ目は、スターリング冷凍機の使用である。1.2 節でもあるように、VERA 水沢 20m 電波望遠鏡上 部機器室内のステージ上に搭載する。ステージには 他の受信機も搭載されており、かつ、ステージが動 く関係上重量の制限がある。そこで、本受信機では



図 4: HTSF の温度と遮断帯域の関係

従来の受信機に搭載されている GM 冷凍機より小型 で軽量なスターリング冷凍機を用いて、HTSF 内の 素子がが超伝導状態になる温度まで冷却を行おうと 考えている。図3は搭載予定のスターリング冷凍機 の、Sunpower 社の Cryotel CT である。

以上の条件を満たす受信機の詳細仕様を決定する ために、試験用の HTSF の動作温度と周波数特性、 損失特性の調査、搭載予定のスターリング冷凍機の 性能評価、QRA を用いた受信機雑音温度の測定を 行った。

3 高温超伝導フィルタ試験

スターリング冷凍機を用いて試験用 HTSF を冷却 し、ネットワークアナライザ (keysight N9915D) で HTSF の温度ごとのSパラメータを測定した。

図4はHTSFの通過損失の温度と遮断帯域の関係 である。約70Kを境に帯域通過特性が低周波側に シフトしていることがわかる。これはHTSF内部に 使用している超伝導薄膜の力学インダクタンスが温 度により変化したのが原因だと考えられる。図5は HTSFの温度と58Kの通過損失で規格化した通過損 失の関係である。70Kまでは損失が-0.2dB以下で あるが、75K以上では損失が最大約-0.5dBと大き くなっていることがわかる。

以上の結果より、本受信機は受信機内を 70 K 以下 にすれば良いと考えられる。



図 5: HTSF の温度と損失の関係

4 冷凍機試験

図6はQRA、HTSF、LNAを取り付けた様子で ある。この状態で冷凍機を動作させ、銅板が何Kま で冷却できるかを調査した。温度センサーはQRA、 HTSFの下部の銅板、コールドヘッドに取り付けた。



図 6: 真空冷却試験の様子

それぞれの温度は、QRA が 292 K、HTSF 下部 銅板が 60.4 K、コールドヘッドが 61.0 K となった。 QRA がほぼ常温であるのにも関わらず、HTSF が 約 60 K まで冷却されているため、同軸コネクタに熱 勾配が生じていることがわかる。

5 受信機雑音温度測定

受信機雑音温度を測定するために、図7のような 信号経路を作成した。チョッパーホイール法を用いて


図 7: 受信機雑音温度測定時のブロックダイヤグラム

| <u> 衣 1: 系</u> ナの利得と維音温度の関係 | | | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------|-------|-----------|-------|----------|----------|
| Component | QRA | HTSF | LNA | Attenator | LNA | Amplifer | Isolator |
| Gain [dB] | -1.536 | -0.300 | 32 | -10 | 32 | 20 | -1 |
| Component Noise Temp [K] | 123.0 | 4.29 | 13.78 | 540 | 13.78 | 900 | 75.09 |
| Total Noise Temp [K] | 123.0 | 129.2 | 150.2 | 150.7 | 150.8 | 150.8 | 150.8 |

表 1. 素子の利得と雑音温度の関係

スペクトルを取得し、周波数ごとの受信機雑音温度 を計算した。

図 8 は試験用 HTSF の通過帯域である 10–12 GHz におけるスペクトルと受信機雑音温度の関係である。 HTSF の通過帯域において、受信機雑音温度は 130– 180K であることがわかる。10.5–11.5 GHz の受信機 雑音温度の平均は 150.8 K であることがわかった。



図 8: 10–12 GHz におけるスペクトルと受信機雑音 温度の関係

本試験結果から、QRA とコネクタの損失を推定 した。表 1 は素子の利得と雑音温度の関係である。 HTSF の損失を –0.300 dB と仮定し、コネクタの 損失を含めた QRA の損失を推定した。その結果、 QRA とコネクタの合計の損失は –1.536 dB と推定 できた。QRA は常温であるため、素子単体の雑音温 度が 123 K となった。

6 まとめと今後の展望

高温超伝導フィルタの温度と遮断周波数、損失の 関係より、本受信機は超伝導フィルタを70K以下に 冷却する必要があることがわかった。

スターリング冷凍機試験の結果、QRA は常温だが 同軸コネクタに熱勾配が生じ HTSF は約 60 K まで 冷却することができた。

受信機雑音温度測定の結果、150.8 K となった。こ れより、損失推定計算を行うと、QRA と同軸コネク タの合計損失が –1.536 dB と予想できた。冷凍機試 験より QRA は常温であるため、素子単体の雑音温 度が 123 K となった。

今後、スターリング冷凍機の冷却性能と雑音温度 の調整を行う必要がある。冷凍機試験の結果、スター リング冷凍機の性能は素子を搭載した状態でコール ドヘッドを約 60 K まで冷却できた。それに対して、 QRA はほぼ常温の状態である。また、受信機雑音 温度測定の結果、QRA の損失が大きいことがわかっ た。そのため、受信機雑音温度を小さくするために は QRA を冷却する必要がある。コールドヘッドを 約 70 K 以下にしながら QRA を冷却することで、温 度と雑音温度の調整を行う予定である。

Reference

Sujin Eie et al. 2021, PASJ 73, pp. 1563-1574 干渉計サマースクール 2005, 国立天文台 -index へ戻る

観測b07

すばる望遠鏡・高感度広帯域分光装置 NINJA の検出 器読み出し系の開発

田中 健翔

すばる望遠鏡・高感度広帯域分光装置 NINJA の検出器読み出し系の開発

田中健翔 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

すばる望遠鏡では、赤外線高解像度観測装置 ULTIMATE-Subaru 計画を推進しており、可変副鏡と4つの レーザーガイドスターによって実現する地表層補償光学 (GLAO) によって、近赤外線において、広視野領 域を高空間分解能(~0.2")で観測することを目指している。

ULTIMATE-Subaru 計画の最初のフェーズとして、高感度広帯域分光装置 NINJA が開発されている。NINJA は、可変副鏡を用いた補償光学モードである、レーザートモグラフィ補償光学 (LTAO) に最適化された観測 装置であり、すばる望遠鏡赤外ナスミス焦点に設置する。

LTAO は、すばる望遠鏡の回折限界近くまで星像を結像させる能力を持ち (~ 0.05"@λ = 1µm)、この集中 した光を分光することにより、NINJA の J バンドの分光限界等級 22mag (S/N=10, 2hr)を達成し、LTAO 無しで類似した分光性能を持つ VLT/X-shooter よりも約 1mag 深い観測を可能にする。この長所を生かし、 NINJA で遠方のキロノバを分光観測することで、中性子星合体における重元素合成のメカニズムの解明を 目指す。

NINJA に用いる高感度低ノイズの赤外線検出器 HAWAII-2RG(H2RG) は、専用の読み出し回路であるフ ロントエンド回路 SIDECAR とバックエンド回路 MACIE を介して、PC から制御ができる。本実験では まず、検出器の等価回路 (マルチプレクサ)と SIDECAR と MACIE を接続し、検出器読み出しシステムの セットアップを行った。その上で、GUI 上でマルチプレクサを駆動し、CDS モードで画像の取得に成功し たので報告する。赤外線読み出しシステム開発の今後の展望に関しても述べる。

1 NINJA 近赤外分光器

すばる望遠鏡で集光した光は、ダイクロイックミ ラーによって可視光分光器 (計画中) と近赤外分光器 (図 2) に分けられる。NINJA 近赤外分光器では、エ シェルグレーティングとクロスディスパーサにより、 一つの検出器上に次数毎にスペクトルを配置する (図 3) ことで、広帯域分光観測を可能にしている。また、 AO で得られるシャープな星像を、バックグラウン ド光を抑えて分光するため、NINJA 近赤外分光器の スリット幅は細く切られている。これらの特性によ り、点源において、現在の 8m 級望遠鏡の中で、最 高感度で近赤外線を一度に分光観測することが可能 になる。

波長範囲 $0.83 - 2.5 \mu m$ F比 13.9 $0.35"(R \sim 3300)$ $0.21"(R \sim 5500)$ スリット幅 $0.5"(R \sim 2310)$ $0.7"(R \sim 1650)$ スリット長 5" コリメータ焦点距離 597.7mm 瞳径 43.0mm 検出器 HAWAII-2RG(HgCdTe) ピクセルサイズ $18\mu m/pix$ ピクセル数 2048×2048 サンプリング 3.3pix(0.35" スリット) 検出器駆動温度 77K

表 1: NINJA 近赤外分光器諸元 [1]



図 1: NINJA 近赤外線分光器外観



図 2: NINJA 近赤外線分光器デザイン (上面図)[2]



図 3: 検出器上のスペクトル配置 [1]



図 4: NINJA 赤外線検出器読み出しシステム ブロッ クダイアグラム

2 NINJA 検出器読み出しシステ ム

2.1 ハードウェア

NINJA 赤外線検出器読み出しシステムの概念図 を、図4のブロックダイアグラムに示す。システム²²⁰

の中核をなす、H2RG、SIDECAR、MACIE につい て詳しく説明する。

2.1.1 H2RG

検出器には、HAWAII-2RG(H2RG)を用いる。 H2RG は、JWST の NIRCam 等に使用されている、 高感度低ノイズ、大面積の二次元赤外線検出器であ る。H2RG は、赤外線に感度を持つ HgCdTe から成 る層と、光子から変換された電荷を読み出す IC であ るマルチプレクサ(MUX)から構成される。装置由 来の赤外線が H2RG に入射することを防ぐため、冷 却された状態 (~ 77K) で、ラジエーションシールド の内部に設置される。



図 5: H2RG 外観 [3]

2.1.2 SIDECAR

SIDECAR は、フロントエンド回路に相当する ASIC であり、H2RG から読み出した信号を増幅し た後、A/D 変換を行い、MACIE へ送信する役割を 果たす。また、H2RG にバイアス出力とクロックパ ターンを与える。SIDECAR は H2RG からアナログ 信号を読み出すため、長いケーブルほど信号が劣化 しやすい。故に、SIDECAR は H2RG と短いケーブ ルで繋がれ、冷却下のラジエーションシールド内に 設置される。

2.1.3 MACIE

MACIE は検出器システムのバックエンド回路に相 当する読み出し駆動ボードであり、制御 PC と SIDE-CAR のインターフェース機能を持ち、読み出しパラ メータを SIDECAR に送信する。読み出しの際には、



図 6: SIDECAR

MACIEを介して制御 PC に画素情報が送信され、PC 上で FITS フォーマットに変換・出力される。



⊠ 7: MACIE

2.2 ソフトウェア

HAWAII 検出器の読み出しに特化したソフトウェ アとして、初めに MSAC (MACIE SIDECAR Acquisition Control) を用いる。MSAC を用いて、GUI 上で読み出しパラメータ (サンプリング方法、読み 出しチャンネル、バイアス値、ゲイン等) を設定し、 MACIE を介して検出器を駆動し、画像を取得する ことが可能である。最終的には、CUI による読み出 しシステムを構築し、検出器を駆動する。

3 駆動試験

今回は、H2RG の読み出し IC である MUX を用 いて、図 8 のようなセットアップを組んだ。そして、 制御 PC 上で MSAC を用いて画像を読み出す一連の 流れを、簡易クリーンブースの中で常温常圧下で実 施した。MACIE には直流電源を繋ぎ、USB3.0 で制 御 PC (Windows) を接続した。

MSACを用いて CDS (Correlated Double Sampling) モードに設定し、検出器システムを駆動することで、 図 9 の画像を取得することに成功した。CDS モード では、Ramp sampling により二回読み出され、二枚 の画像の差分が、最終画像として生成される。MUX に赤外線の感度はないが、MUX の素材であるシリコ ンは可視光の感度を持つ。ゆえに、読み出しパター ンと、可視背景光のパターンが合わさった画像が読 み出されたと予測される。



図 8: 駆動試験のセットアップ



図 9: CDS モードでの MUX の読み出し画像

4 今後の展望

今回は、MACIE による簡単な検出器の駆動方法 を確認した。今後の検出器開発プランは、以下の通 りである。

・冷却下で H2RG を用いた駆動実験及びノイズの評

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

価

・読み出しノイズを抑えるような、読み出しパラメー タ (サンプリング方法、ゲイン、読み出しチャンネル 数、バイアス値等) の最適化

・CUI による読み出しシステムの開発 本実験と同様、検出器を NINJA 組み込んだ上で今後 実施する性能評価や実験は、国立天文台三鷹の先端 技術センターで実施される。そして NINJA は、2025 年度中の試験観測、2026 年度中の科学観測開始を予 定している。

また、この H2RG を用いた検出器読み出し回路の研 究は、ULTIMATE Subaru の次のフェーズである広 視野赤外線装置 WFI や、現在チリに建設中である TAO 望遠鏡に設置される観測装置 SWIMS のアッ プグレードにも適用でき、今後の応用発展も期待さ れる。

5 参考文献

[1] Tokoku et al.2022 SPIE

- (https://doi.org/10.1117/12.2627749)
- [2] 2023 年度光赤天連シンポジウム ポスター 「す

ばる望遠鏡 広帯域分光装置 NINJA 開発報告」

[3] Teledyne 社

(https://www.teledyneimaging.com)

-index へ戻る

観測b08

O4a観測期間中の重力波候補イベントに対する KAGRAのアンテナパターンの評価

石川 諒弥

O4a 観測期間中の重力波候補イベントに対する KAGRA の アンテナパターンの評価

石川 諒弥 (青山学院大学大学院 理工学研究科)

Abstract

現在の重力波検出には、Michelson 干渉計を基本とした干渉計型重力波望遠鏡が主流である.重力波望遠鏡 は一部の方向を除いてほぼ全天に感度があり、1台でその到来方向を決定することは難しいため、複数台で 同時に信号を検出し、その信号の時間差から到来方向を推定する.しかし干渉計は重力波の入射方向に依っ て検出器応答 (アンテナパターン)が異なるため、各望遠鏡には重力波検出に優位な方向がある.本研究で は、O4a 観測期間の、KAGRA 観測運転中に報告された重力波候補イベントの到来方向の信頼領域と重力波 望遠鏡のアンテナパターンの関係をプロットするコードを開発した.観測期間中に報告された2イベントの 50 %,90 %信頼領域を比較すると、KAGRA の検出器応答が約 0.3(最大を1で規格化)の方向に位置し、こ れら2イベントが LIGO,Virgo に比べて比較的検出に不利な方向からのイベントであることを確認した.

1 Motivation

重力波とは、物体が加速度運動するとき等に生じる 時空の歪みが横波として光速で伝播する現象であり、 + モードと × モードの独立する 2 つの偏極がある.

重力波の観測は、Michelson 干渉計を基本とした干 渉計型重力波望遠鏡により行われ、重力波の伝搬によ り引き起こされる鏡の微小な変動を検出する.2017 年、3 台の重力波望遠鏡により中性子星連星合体か らの重力波が初めて検出された.このイベントは、電 磁波望遠鏡によるフォローアップ観測により、重力 波源の方向からγ線バーストやキロノバが観測され た[1].2023年5月から行われている長期観測では、 LIGO, Virgoに加え、KAGRAを含めた計4台の検 出器による観測が行われている.その前半にあたる O4a は、2023年5月から2024年1月まで行われ、 KAGRA は2023年6月21日までの約1ヶ月間観測 に参加していた.

重力波望遠鏡は一部の方向を除いてほぼ全天に対 して応答するが、入射する重力波に対する方向依存 性をもち、入射方向や独立するモードに依って検出 器応答 (アンテナパターン)が異なる.重力波望遠鏡 は、ほぼ全天に対して応答するが故に、1台の観測で 到来方向を決定することは難しい.そこで複数台の 検出器で信号を検出し、その信号の時間差から到来 方向を推定することで重力波源の方向決定精度が向 上する. 本研究では、O4a 観測期間に LIGO が報告した重 力波候補イベントに対する KAGRA の検出可能性 を議論するため、重力波候補イベントに対するアン テナパターンを評価した.パブリックアラートによ り公開されている推定された重力波到来方向 (スカ イマップ)の信頼領域と重力波望遠鏡のアンテナパ ターンを視覚化し、重力波候補イベントの到来方向 に対する KAGRA のアンテナパターンを評価した. KAGRA 観測期間中に報告された 2 イベントの推定 された 50 %,90 %信頼領域は KAGRA の検出器応 答が約 0.4(最大を1とする)の方向に位置し、これら 2 イベントが LIGO に比べて検出に不利な方向から のイベントであることを確認した.

2 Introduction

2.1 KAGRA

現在の重力波検出には、Michelson 干渉計の原理を 基本とした干渉計型重力波望遠鏡が主流である.時 空の歪みである重力波が入射すると、アームの光路 長が変化し、それを干渉光の変化として検出される. KAGRA は、日本の大型低温重力波望遠鏡である.岐 阜県飛騨市神岡町の地下に設置され、アームの長さが 3 kmの干渉計型重力波望遠鏡である (図1). KAGRA は地面振動雑音の低減のための地下建設や熱雑音の 低減のために鏡を冷却するという2つの特徴がある. 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校



図 1: 大型重力波望遠鏡 KAGRA のイメージ全体図 (東京大学宇宙線研究所の HP より引用). 岐阜県飛騨 市神岡町の地下に建設されており、アームの長さが 3km の Fabry-Perot Michelson 干渉計である.

2.2 アンテナパターン



図 2: 重力波望遠鏡のアンテナパターンの計算に用い る座標系. 重力波源からみて干渉計は ź' 方向にあり、 干渉計 BS を原点とし、2 本のアームが x 軸方向と y 軸方向となるようにとる.θ, φ は重力波源と干渉計と の角度、ψ は連星系の座標系と干渉計基準座標との 角度を表す.

図2に示すような座標系をとる.検出器応答の方 向依存性は+モードと×モードに対してそれぞれ次 のようになる.

$$F_{+}(\theta, \phi, \psi) = \frac{1}{2}(1 + \cos^{2}\theta)\cos 2\phi \cos 2\psi + \cos\theta \sin 2\phi \sin 2\psi,$$

$$F_{\times}(\theta,\phi,\psi) = -\frac{1}{2}(1+\cos^2\theta)\cos 2\phi\sin 2\psi + \cos\theta\sin 2\phi\cos 2\psi \qquad (2)$$

また、無偏極の重力波に対して、は、

$$F_N(\theta, \phi, \psi) = \sqrt{F_+^2(\theta, \phi, \psi) + F_\times^2(\theta, \phi, \psi)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{4}(1 + \cos^2\theta)^2 \cos^2 2\phi + \cos^2 \theta \sin^2 \phi}$$
(3)

のようになる. $\psi = 0$ のとき、それぞれの場合の検 出器応答の方向依存性を図3に示し、これがアンテ ナパターンである. 干渉計に対し天頂方向または天 底方向からの + モードの重力波に対して応答が最大 となる. また、干渉計平面上からの重力波には応答 が小さくなり、アーム軸から45度ずれた方向からの 重力波に対して応答が0となる. したがって、干渉 計は一部の方向を除いて、どの方向から到来する重 力波に対しても応答することがわかる.



図 3: ψ = 0 のときの重力波望遠鏡のアンテナパター ン. 左から + モード, × モード, 無偏極の重力波に対 する応答の大きさを表し、最大を 1 として規格化し ている. 干渉計の BS を原点とし、アームは *x* 方向, *y* 方向にとる.

2.3 複数台同時観測の意義

 複数台の検出器で同時に重力波観測をする利点を 3つ紹介する.一つ目は、重力波源の方向推定精度が 向上する点である.重力波は時空の歪みであり、干 渉計はほぼ全天に対して重力波に応答するが故に、1
 かでの観測では到来方向を正確に推定することがで きない.そのため、離れた場所にある複数の重力波 望遠鏡によって同じ重力波を捉えることにより、そ の到来時間差から重力波源の方向を推定できる.検
 出器が離れた場所に2台あると、検出信号の時間差 から、その時間差を可能にする天球面内のリング上 に限定される.さらに検出器が増えると、リングの
 交点となる方向に絞られ、方向推定精度が向上して いく. 干渉計の方向依存性を考慮すると4台の重力 波望遠鏡が必要になり、4台目となる KAGRA によ る同時検出が到来方向推定には重要となる.

二つ目は、重力波望遠鏡の応答の方向依存性を補 完できる点である.複数の重力波望遠鏡によって同 時に観測を行うことで互いに応答の小さい領域を補 い合うことが可能となり、複数台で全天をカバーす ることができる.

三つ目は、重力波信号の信頼性が向上する点であ る.重力波の振幅は微弱である為、ある一つの重力 波望遠鏡で重力波信号の候補イベントが検出しても、 偶然重力波信号とよく似たデータが得られたという 可能性は否定できない.そこで、複数の望遠鏡で同 様の信号がほぼ同時に観測されれば、重力波信号の 信頼性を高めることができる.

3 Methods

重力波が検出されると、時刻や到来方向などの情報がパブリックアラートとして GraceDB という web 上に即座に公開される.公開されるすべてのイベント の到来方向の情報は、HEAlPix 形式で取得すること ができる [2].取得したデータを Python の公開パッ ケージである healpy や ligo.skymapを用いることで、 skymap として出力することが可能である.本研究で は、パブリックアラートより取得した到来方向デー タから重力波到来方向としての信頼度が高い領域を 抽出し、その時刻の各検出器のアンテナパターンに 等高線として表示する Python コードを開発した.

4 Results

KAGRA 観測運転中に LIGO によって報告された 重力波候補イベントは、S230601bf, S230609uの2イ ベントに注目した. パブリックアラートより到来方向 データを取得し、50 %, 90 %信頼領域を等高線とし て各イベント時刻の KAGRA のアンテナパターンに 表示した. 50 %, 90 %信頼領域方向の検出器応答の 平均値を算出し、LIGO Livingston, LIGO Hanford, Virgo の場合と比較した結果を述べる.

4.1 アンテナパターンの評価

パブリックアラートより重力波候補イベントの推定 された到来方向データを取得し、50%,90%信頼領 域を等高線としてそのイベント時刻のKAGRAのア ンテナパターンに表示した.また、LIGO Livingston, LIGO Hanford, Virgo に対しても同様の評価を行い、 その結果を図4,図5に示す.重力波到来方向とし ての信頼度が高い領域である50%,90%信頼領域 を表す白の等高線が、イベント時刻のKAGRAの検 出器応答の大きい方向から外れていることがわかる. S230601bf, S230609uの2イベントの50%,90%信 頼領域は、KAGRAの検出器応答が小さい方向とほ ぼ一致していた.



図 4: S230601bf の 50 %, 90 %信頼領域と KAGRA のアンテナパターン. 白の等高線の内側が重力波到来 方向としての信頼度が高い領域である 50 %, 90 %信 頼領域を表す. カラーバーは式 (3) に対応し、最大を 1 として規格化している. 検出器応答が大きいほど、 黄色の方向ほど検出器応答が大きい.



図 5: S230609u の 50 %, 90 %信頼領域と KAGRA のアンテナパターン.

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

4.2 検出器応答の平均値評価

50 %, 90 %信頼領域内の各検出器の検出器応答の 平均値を算出し、LIGO Livingston, LIGO Hanford, Virgo と比較を行い、その結果を以下の表 1, 表 2 に 示す.検出器応答の大きさは最大を 1 として規格化 している.

S230601bf, S230609u の2イベントにおいて、3つ の検出器の中で LIGO の検出器応答が 0.75 以上な 一方で、KAGRA の検出器応答が 0.5 以下であった. これら2イベントは LIGO が検出に優位な方向で、 KAGRA には検出が不利な方向からのイベントであっ たことが分かった.これは、世界中の離れた場所に 重力波検出器を設置することで、重力波検出器の角 度依存性を補完し合っていることが確認できた.

表 1: S230601bf の 50 %, 90 %信頼領域内の検出器 応答の平均値

| 検出器 | 50 %信頼領域 | 90 %信頼領域 |
|-----------------|----------|----------|
| KAGRA | 0.351 | 0.344 |
| LIGO Livingston | 0.899 | 0.829 |
| LIGO Hanford | 0.901 | 0.831 |
| Virgo | 0.491 | 0.567 |

表 2: S230609u の 50 %, 90 %信頼領域内の検出器応 答の平均値

| 検出器 | 50 %信頼領域 | 90 %信頼領域 |
|-----------------|----------|----------|
| KAGRA | 0.412 | 0.440 |
| LIGO Livingston | 0.796 | 0.751 |
| LIGO Hanford | 0.945 | 0.814 |
| Virgo | 0.563 | 0.573 |

5 Conclusion

O4a 観測期間に LIGO が報告した 2 つのイベント について、各検出器のアンテナパターンの評価を行っ た.パブリックアラートとして公開されたデータを もとに、推定された到来方向の 50 %,90 %信頼領域 と各イベント時刻の KAGRA, LIGO, Virgo のアン テナパターンの関係を視覚化するコードを開発した. イベントの到来方向と各検出器のアンテナパターン のプロットと平均値評価により、研究対象とした 2 イベントが KAGRA の検出に不向きな方向でのイベ ントであることが確認できた.また、離れた場所で の複数台観測により、検出器が持つ角度依存性を補 完し合っていることが確認できた.

Reference

- [1] B. P. Abbott 2017, PRL 119
- [2] Gorski, K. M., Hivon, E., Banday, A. J., Wandelt, B. D., Hansen, F. K. Reinecke, M. & Bartelmann, M. et al. 2005, The Astrophysical Journal Letters, 622, 759.
- [3] Javier M. Antelis, & Claudia Moreno 2016, arXiv:1610.03567

-index へ戻る

観測b09

宇宙機搭載用pnCCDの軟X線性能評価

西 佑記

宇宙機搭載用 pnCCD の軟 X 線性能評価

西 佑記 (関西学院大学大学院 理工学研究科)

Abstract

我々は、HiZ-GUNDAM 衛星搭載の X 線検出器の開発を行っている。HiZ-GUNDAM ミッションはガンマ 線バーストの観測を行うことで、初期宇宙の探索を目的とする計画である。 ガンマ線バーストとは、重力波 や初期宇宙に関する重要な手掛かりとなる宇宙最大規模の爆発現象である。この計画では、0.4~4keV 帯域 の X 線に対し、50 %以上の検出効率が要求されており、候補検出器として pnCCD が挙げられた。本研究 では、小型の pnCCD 素子を搭載した地上実験用の X 線カメラを用いて、軟 X 線分光性能の評価実験を行 なった。実験条件は、X 線発生装置の管電圧を設定可能最低電圧の 10keV とし、二次ターゲットにはポリイ ミド箔に小片のテフロン、アルミニウムおよびチタンを合わせたものを用いた。また、暗電流を抑えるため に pnCCD の温度を-20 ℃、フレームレートを 100Hz とした。X 線発生装置からの一次 X 線を二次ターゲッ トに照射し、発生した複数の蛍光 X 線を検出し、結果、C-K α (0.28 keV) から Ti-K α (4.5 keV) の範囲 で複数の輝線を弁別することができた。

1 研究背景

我々は、HiZ-GUNDAM ミッション衛星搭載の X 線検出器の開発を行っている。ミッションにおいて 要求される性能を満たす X 線検出器として pnCCD が候補に挙げられた。本研究では小型の pnCCD を 搭載した地上実験用の X 線カメラ (CXC)を用いて 軟 X 線分光性能評価を行なった。

2 HiZ-GUNDAM ミッション

本研究の性能評価実験の目的は HiZ-GUNDAM ミ ッションの衛星への素子搭載を目指すことである。こ のミッションでは宇宙最大の爆発であるガンマ線バー ストを利用して、暗黒時代に迫るような初期宇宙を 探査する事を目的としている。また、衛星と地上に ある天文台との時間的連携を強化することによって 追観測への時間を短縮し、観測天体の情報をいち早 く、詳細な観測を行えるようにすることも目的とし ている。



図 1: HiZ-GUNDAM 衛星のイメージ図

3 HiZ-GUNDAM ミッションで の要求

HiZ-GUNDAM ミッションでは 1.2 sr の視野を 24 台の X 線ピクセル検出器で観測を行う。検出器 1 台あたりの視野は、1.2 sr/24 台=0.05 sr $\approx 5.9 \times 10^5 \, \mathrm{arcmin}^2$ で、6 cm 角の X 線ピクセル検出器で観 測できれば良い。また、2 arcmin の位置分解能が要求 されているので、ピクセルサイズは次のようになる。

$$\begin{split} 4 \operatorname{arcmin}^2 \times \frac{6 \operatorname{cm} \times 6 \operatorname{cm}}{5.9 \times 10^5 \operatorname{arcmin}^2} &\simeq 2.4 \times 10^{-4} \operatorname{cm}^2 \\ &\simeq 160 \mu \mathrm{m} \times 160 \mu \mathrm{m} \end{split}$$

HiZ-GUNDAM では 0.4 ~ 4 keV の X 線を効率よ く検出するため、そのエネルギー帯域での検出効率 50% 以上の性能が求められる。また、SGRB は継続 時間が 1 秒以下であり、時間変動も激しいため、検 出器には 0.1 秒よりも速い時間分解能が求められる。 これらの要求を満たす検出器として、裏面照射型で 読み出し速度が速い pnCCD が候補に上がった。本 研究では、要求サイズよりも小型の pnCCD を搭載 した PNDtector 社製 Color X-ray Camera(CXC) を 用いた軟 X 線に対する基礎性能評価を行った。要求 を以下にまとめる。

表 1: HiZ-GUNDAM での要求

| 要求対象 | 要求值 |
|---------|--------------------------------|
| 受光面積 | $\geq 6 \times 6 \ {\rm cm}^2$ |
| ピクセルサイズ | $\leq 160 \ \mu {\rm m}$ |
| 観測帯域 | 0.4 - 4 keV |
| 読み出し速度 | $\leq 0.1 \text{ sec}$ |
| 検出効率 | $\geq 50\%$ |

4 pnCCD

CCD(Charge Couple Device) は小型の半導体検出 器をピクセルとして多数格子状に並べたものである。 他の X 線検出器と比較して、CCD は位置分解能とエ ネルギー分解能に優れており、過去にも様々な天文 衛星に搭載され、多くの実績を上げてきた。CCDの あるピクセルに入射した X 線は、空乏層内で光電吸 収を引き起こし、X線のエネルギーに比例した電子 正孔対を作り、電荷が溜まる。溜められた電荷は一 定の順序で転送して読み取ることで入射 X 線のエネ ルギーと入射位置を知ることができる。また、通常 の CCD は全画素の信号電荷を縦転送と横転送を行 い、1つの読み出し口で読み出す。一方、pnCCD は 受光面の各列毎に読み出し口があるため、信号電荷 を高速に読み出すことができる。まず、Image Area で露光を行い、電荷を蓄積する。その後、信号電荷は 放射線遮蔽されたフレームストア領域(図2の左図) に 50µs 以内に転送されたのち、左右に 2 つずつある 読み出し ASIC(CAMEX) に向かって電荷を転送す る。読み出し口に到達した信号電荷は、JFET(接合 型電界効果トランジスタ)によって信号の増幅が行わ れ、ワイヤーボンディングを伝って CAMEX に送ら れる。そして、CAMEX では追加の信号増幅、フィ ルタリングおよび多重化が行われ信号が出力される。



図 2: pnCCD の概観の概略図 (左) と回路系 (右) の 図 ((Ordavo 2011) から引用)。

5 実験

本研究では、ミッション要求である 0.4 ~ 4 keV 帯域における軟 X 線の性能評価を行うため、X 線発 生装置と 2 次ターゲットを用いたデータ取得実験を 行なった。実験に用いた X 線発生装置は、陽極側に タングステンのターゲットを埋め込んでおり、一次 X 線を二次ターゲットに照射することで発生した二 次 X 線を検出することができる。ここでは二次ター ゲットとしてポリイミド箔 (C₂₂H₁₀N₂O₅) に小片の テフロン (C₂F₄)、アルミニウム、およびチタンをあ わせたものを用いた (図 3)。





また、データの取得条件は表2のとおり。

| 衣 2: 取得采件 | |
|----------------|------------|
| フレームモード | Full Frame |
| フレームレート | 15 Hz |
| ゲイン | gainMax |
| 取得フレーム枚数 | 20,000 |
| バックグラウンドフレーム枚数 | 500 |
| X 線発生装置の管電圧 | 10kV |
| X 線発生装置の管電流 | 0.15mA |
| 素子の駆動温度 | -20°C |

表 2: 取得条件

6 解析結果

6.1 X線スペクトルの作成

取得データからスペクトルを作成し、解析を行う ことで情報を読み取る。この際、CXC には読み出し 列毎に異なるゲインを持つので、エネルギー分解能 向上のため、ゲイン補正を行った後、スペクトルを 作成した。また、今回は統計量の観点から Al-Kα と Ti-Kαの2点のみを用いてゲイン補正を行っている。 得られた X 線スペクトルの全体 (図 4) と低エネル ギー側 (図 5) を以下に示した。この図より複数の輝 線があることが確認できる。



図 4: 2 次 X 線スペクトル



図 5: 2 次 X 線スペクトル (低エネルギー側)

6.2 理論値との比較とエネルギー分解能

得られた輝線に対しガウス関数をフィッティングす ることにより、ピークのエネルギーを求めることが できる。また、各輝線のエネルギー分解能 (FWHM) は各輝線の標準偏差 σ を用いて、

 $FWHM = 2\sqrt{2\ln 2} \times \sigma$

で求めることができる。表3にピークエネルギーと エネルギー分解能をまとめた表を示した。

| 表 | 3. | 輝線 | の特性 | |
|----|----|----|------------|--|
| 1. | | | • <i>-</i> | |

| 輝線 | エネルギー/eV | ピーク/eV | $\rm FWHM/eV$ |
|---------------|----------|-----------------|---------------|
| $C-K\alpha$ | 280 | 277.0 ± 1.5 | 79.7 ± 5.4 |
| $O-K\alpha$ | 520 | 535.7 ± 2.3 | 36.1 ± 7.6 |
| $F-K\alpha$ | 680 | 693.5 ± 0.4 | 68.4 ± 4.3 |
| Al-K α | 1500 | 1500 ± 0.0 | 79.9 ± 0.7 |
| $Ti-K\alpha$ | 4500 | 4500 ± 0.0 | 120.1 ± 0.0 |
| $Fe-K\alpha$ | 6400 | 6377 ± 0.1 | 140.8 ± 0.3 |

6.3 エネルギーの再現性

ゲイン補正には Ti-K αと Al-K αの2 点を用いて 行ったので、エネルギーの再現性を確かめるために、 0.28-6.4keV 帯域における理論値との相関とズレを確 認した (図 6)。上図が理論値との比較、下図が理論値 とのズレを表す。低エネルギー側の3つの輝線に関し て、2%以内のズレで再現できていることがわかった。



図 6: エネルギー再現性

6.4 FWHM のエネルギー依存性

FWHM は下式に示すように \sqrt{E} に依存している。

$$\mathrm{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2W} \sqrt{\frac{F}{W}E + \Delta N_{\mathrm{noise}}^2}$$

^イ W: シリコンの平均電離エネルギー, F: ファノ因子, [、] _、 ΔN_{noise}: 統計的揺らぎ以外のノイズ

そこで、表3で示したエネルギー分解能と \sqrt{E} との依存性を確かめた (図7)。下図より C-K α 、O-K α が大きく外れた値を持つことがわかる。 これは非



図 7: エネルギー分解能のエネルギー依存性

X 線イベントである連続成分が大きく、統計量の少 ない C-K α、Ο-K αの輝線に対して影響されたと考 えられる。

7 今後の展望

・HiZ-GUNDAM での要求観測帯域である範囲を 満たす 0.28-6.4keV の X 線を検出できた。また、こ の帯域において低エネルギー側で 2%以内のズレでエ ネルギーを再現できたことがわかった。

・低エネルギー側のエネルギー分解能は大きくズ レた値を示した。これは、連続成分が大きく、統計 量の少ない低エネルギー側の輝線が大きく影響され たことが考えられる。

・今後統計量を増やした実験を行い、再度解析を 行う必要がある。

8 参考文献

Reference

- I.Ordavo, A new pnCCD-based color X-ray camera for fast spatial and energy-resolved measurementsP-NSensor GmbH 2011
- 藤井健, 修士論文「HiZ-GUNDAM ミッション用 CMOS イメージセンサーの X 線分光性能評価」(関西学院大学 2022)
- 吉田明弘,修士論文「HiZ-GUNDUM ミッション搭載用 pnCCD 素子の基礎性能評価」(関西学院大学 2023)

-index へ戻る

観測b10

熱真空試験と振動試験による Lobster Eye 光学系の結 像性能評価

長髙 一心

熱真空試験と振動試験による Lobster Eye 光学系の結像性能評価

長高 一心 (金沢大学大学院 自然科学研究科)

Abstract

2030 年題打ち上げ目標である HiZ-GUNDAM 衛星は宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バーストを観測し、 残光に照らされた初期宇宙を探査することを目的とする。当衛星では広視野 X 線モニターでガンマ線バース トの発見、方向決定を行い可視光・近赤外望遠鏡で追観測を行う。広視野 X 線モニターは複数枚の Lobster Eye Optics (LEO) が球面状に配置された広視野光学系と CMOS イメージセンサによって構成される。LEO は焦点距離に十字の像を作る X 線集光光学系であり、得られた十字の像の座標を用いて入射 X 線の方向を 決定するため、結像性能は X 線の方向決定において重要である。LEO は SiO2 製で、微細な穴が多数配列 された脆性素材のため、ロケットの打ち上げ振動による LEO が破損の有無や、結像性能がどのように変化 するのかを調べる必要がある。また軌道上の検出器温度は光学系部分で-100℃まで冷却されるため、地上 での室温と軌道上の-100℃の温度差で LEO とフレーム光学系に熱歪みが生じる。この熱歪みによって LEO が破損する可能性や、焦点距離や結像性能はどのように変化するかの温度特性を知る必要がある。本研究で はロケットの打ち上げを模擬した振動試験と宇宙空間を模擬した熱真空試験によって LEO の結像性能がど のように変化したのかを発表する。

1 Introduction

ガンマ線バーストとは短時間に 10^{52} erg から 10^{54} erg のエネルギーを放出する宇宙最大の爆発現象 の一つである。2030 年代打ち上げ目標である HiZ-GUNDAM 衛星 (図1)はガンマ線バーストを観測 し、残光に照らされた初期宇宙を探査することを目的 としている。当衛星では広視野 X 線モニターで X 線 の観測、方向決定を行い可視光・近赤外望遠鏡で追観 測する。広視野 X 線モニター (図2)は複数枚の Lobster Eye Optics (LEO)が球面状に配置された広視 野光学系と CMOS イメージセンサによって構成され る。LEO はマイクロポアと呼ばれる $20\mu m \times 20\mu m$ の穴が 10^6 個程度空いた焦点距離に十字の像を作る X 線集光光学系であり、得られた十字の像の座標を 用いて入射 X 線の方向を決定するため、結像性能は X 線の方向決定において重要である。

本研究では広視野 X 線モニターの試作版光学フ レームに固着された1枚のフランス・Photonis 社製 のLEO に対してとロケットの打ち上げ振動を模擬し た振動試験と宇宙空間を模擬した熱真空試験を行っ た。

LEO は主成分が SiO₂ でマイクロポアが多数配列された球面状の脆弱素材であるため、振動試験による 衝撃や地上での室温(20℃)と衛星軌道上での光 学系温度(-100℃)の温度差に起因する LEO や 光学フレームの熱歪みによって LEO が破損するかど うかや昇温した際に元の形状に戻っているかを調査 した。

また熱真空試験での冷却・昇温過程でLEOの焦点 距離や結像性能はどのように変化するかを述べている。



図 1: HiZ-GUNDUM 衛星の概要

2024 年度 第54回 天文・天体物理若手夏の学校



図 2: 広視野 X 線モニターの概要

2 Methods

本試験の流れを説明する。始めに KEYENCE VR スキャナーを用いて LEO の形状を測定した後に熱 伝導接着剤(Wacker A B の混合物)を使用し て LEO を BBM フレームに固着した。次に熱真空 試験を行った。最後に振動試験を行い、その後再度 KEYENCE VR スキャナーを用いて LEO の形状を 測定した。

2.1 熱真空試験

熱真空試験のセットアップを図3に示す。熱真空 試験では真空度を10⁻³PaとしLEOの端が室温(約 20℃)から-60℃になるまでを21時間かけて冷却し た。-60℃の状態を8時間保った後に18時間かけて 昇温し室温まで戻した。

LEO の温度が冷却時、20 ℃、-5 ℃、-30 ℃、-60 ℃、 昇温時-60 ℃、-20 ℃、20 ℃になった際に X 線照射 による結像性能確認と焦点距離測定を行った (図4)

2.1.1 焦点距離解析

(1)CMOS イメージセンサーを 5mm 間隔で移動さ せながら X 線を照射して EventMap を作る。

(2) 得られた EventMap の X 軸、Y 軸射影を取りダ ブルガウシアンでフィッティングする。

(3) 細いほうのガウシアンのσから FWHM を求め て、CMOS-LEO 間の距離ごとにプロットし二次関



図 3: 熱真空試験セットアップ X線ビームライン とつながっており X線照射測定ができる。



図 4: 熱真空試験の温度ログ

数でフィッティングする。その後 FWHM が最小の値 を取る CMOS-LEO 間の距離を求めて、Best focus とする。



図 5: 左 : EventMap のフィッティングの様子、右 : Best focus を求める様子。

2.2 振動試験

振動試験のセットアップを図6に示す。振動試験 では、

(1) モーダルサーベイ 供試体の剛性(固有振動数) を把握するために実施する試験。

(2) 正弦波振動試験 ロケット打ち上げ時の振動環境 に対して耐性を有していることを確認する試験。

(3) ランダム振動試験 ロケット打ち上げ時に、ノー ズフェアリング内で発生する音響を起源とする機械 振動を模擬する試験。

の3つの試験を行った。振動条件を表1に示す。



図 6: 振動試験セットアップ LEO+BBM フレー ム+取り付け用治具をトルク管理してねじ止め。 Z 軸方向に加振した。

モーダルサーベイ

| | 周波数範囲 (Hz) | 加速度密度 (G ² /Hz) | 実効値 (Grms) | 時間 (秒) |
|------|---------------|-------------------------------|---------------------|-----------|
| 3軸共通 | 20-2000 | 0.000127 (革新 cube の時) | 0.5 (革新 cube の時) | 60 |
| | | | | |

正弦波振動

| | 周波数範囲 (Hz) | 加速度レベル (G) | 掃引速度 (oct/分) | 往復数 |
|----|---------------|---------------|-----------------|-----|
| Z軸 | 22-43 | 3.75 | 2 | 1 |
| | 43-57 | 3.75 | 0.1 | 1 |

ランダム振動

| | 周波数 | 加速度 PSD [(m/s2)2/Hz] | 実効値 (Grms) | 試験時間 (秒) | |
|----|-------------|----------------------|---------------|-------------|--|
| | 30-300 Hz | +10.35 [dB/oct] | | | |
| Z軸 | 300-400 Hz | 589 | 39.4 | 30 | |
| | 400-2000 Hz | -16.2 [dB/oct] | | | |

3 Results

表2で示す冷却前の室温時(18 \mathbb{C})の Best focus (251.47 \pm 0.58 mm)を基準焦点距離とし、温度を変 化させた際 FWHM のふるまいを図6に示す。室温か ら-60 \mathbb{C} まで冷却した際の結像性能の変化は3 arcmin ほどであった。

焦点距離の温度依存性を図8に示す。図8から温 度が低くなるほど焦点距離は短くなっているが、冷 却時と昇温時でふるまいが異なっている。振動試験 の結果は試験前後でLEOの破損や外観の変化は無 く、目立った共振は見られなかった。LEOの形状測 定の結果を図9に示す。得られたデータに対して球 面でフィッティングを行い曲率半径を求めると、試験 前は543.991±0.164 mm、試験後は541.296±0.193 mmとなった。図10に振動試験前後の基準焦点距 離での像を示した。像に歪みは見られず、FWHMも 変わらなかった。

表 2: 室温 (18 ℃) での Best focus 基準焦点距離 とする

| | CMOS-LEO 間距離 | [mm] |
|-----|-------------------|------|
| X 軸 | 249.74 ± 0.54 | |
| Y軸 | 253.07 ± 0.50 | |
| 平均 | 251.47 ± 0.58 | |



図 7: CMOS-LEO 間の距離を基準焦点距離の 251mm にしたときに測定した結像性能の温度依存性



図 8: 焦点距離の温度依存性 左:X 軸方向の焦点距 離 右:Y 軸方向の焦点距離 紫色の点は冷却時、緑 色の点は昇温時、矢印は測定の時系列を表している。



図 9: 左: KEYENCE VR スキャナーを使った形状測 定の様子。右:得られたデータに対して球面でフィッ ティングをしたもの。



図 10: 左:振動試験前の十字の像 右:振動試験後 の十字の像

4 Discussion

結像性能の温度特性が室温時と-60 ℃の時で3 arcmin 程変化したが許容範囲内である。熱真空試験の 際に冷却時と昇温時の LEO 温度特性が異なっていた ことについて、LEO の端と中心で熱の伝わり方に差 があり冷却時と昇温時で LEO の中心温度が異なって いた可能性がある。試験前後の LEO の形状測定の結 果から、LEO 全体の曲率半径が 2mm 程小さくなっ ていて不可逆変化が起こった可能性がある。焦点距 離 f と曲率半径 R には

$$f = \frac{R}{2} \tag{1}$$

という関係があり、焦点距離の変化は曲率半径の変 化に対して比例するため図8から昇温時は温度に対 して一次関数的ふるまいがみられ式(1)と整合し ている。冷却時にLEOが局所的に歪んだ可能性と光 学系以外のセットアップの熱収縮による影響があっ た可能性がある。これからの測定でセットアップを 工夫し誤差の原因を特定する予定である。

5 Conclusion

本研究ではロケットの打ち上げ振動を模擬した振 動試験と宇宙空間を模擬した熱真空試験により LEO の焦点距離や結像性能にどのような変化が起こるの かを調査した。振動試験による LEO の破損や、外観 の変化はなかった。熱真空試験では焦点距離や結像 性能の温度特性を得ることができたが、-60℃までし か冷却できなかったためセットアップの改良が必要 である。温度が低くなるほど焦点距離が短くなって いったが、冷却時と昇温時での温度変化の傾きが異 なっていた。LEO の端と中心で熱伝導生じ冷却時と 昇温時で、実際の温度と異なっていた可能性がある ため、今後同じような試験を行う際には LEO の温 度が平衡状態になるまで待ってから測定するのがよ い。形状測定での結果は LEO の曲率半径が試験前 では 543.991±0.164 mm、試験後は 541.296±0.193 mm であったため、試験前後で約2mm 曲率半径小 さくなった。今後より詳細な LEO の形状を測定する 方法として、LEO の一部を隠した状態で焦点距離測 定を行い、部分的な歪みなどが生じていないかを調 べる予定である。

Reference

佐藤 智也 修士論文 金沢大学 2024

——index へ戻る

観測b11

南極30cmサブミリ波望遠鏡用光学ポインティングシ ステムの開発

栄野比 里菜

南極 30 cm サブミリ波望遠鏡用光学ポインティングシステムの開発

栄野比 里菜 (筑波大学大学院 数理物質科学研究群)

Abstract

筑波大学を中心とする南極天文コンソーシアムでは地上で最も水蒸気量が少なく天文観測に適した南極ドームふじ基地に南極 30cm サブミリ波望遠鏡を設置する計画を進めている。南極 30 cm 望遠鏡は 500 GHz 帯に存在する、中性炭素原子 $[CI]({}^{3}P_{1} \rightarrow {}^{3}P_{0})$ と一酸化炭素 CO(J = 4 - 3) 輝線の同時観測による広域銀河 面観測を行い、星形成と密接に関係する高温高密度分子ガスや紫外線などで解離された希薄なガス(暗黒ガ ス)の分布を明らかにする。南極 30 cm 望遠鏡は今年度 2024 年 10 月からの南極への輸送に向けて現在、受 信機および光学系の性能評価、IF 系改修、新分光計、制御プログラムの開発等を進めている。

本講演では、南極 30 cm 望遠鏡のアンテナ駆動の指向誤差改善のためのポインティングシステムの概要や 開発状況および筑波宇宙センターおよび筑波大学で実施した近傍界ビームパターンの測定結果について報告 する。

1 Introduction

サブミリ波には低温の星間物質(分子雲・ダスト) の物理状態を反映する原子・分子輝線が豊富に存在 し、星形成の進化過程の解明の鍵を握る。しかしサブ ミリ波は大気中の水蒸気に吸収されやすく、地上から の観測は非常に困難である。そこで我々は地上で最も 乾燥した南極に望遠鏡を設置する計画を推進してい る。本望遠鏡は 2009 年にスイスの Jungfraujoch に て、2011年にチリの Prinacota にて試験観測を行っ ており、チリ観測では CO(J = 4-3) 輝線によるオ リオン分子雲の観測実績がある (Ishii et al 2014)。南 極観測に向け、461.04 GHz の CO(J = 4-3) および 492.16 GHz の $[CI]({}^{3}P_{1} \rightarrow {}^{3}P_{0})$ の同時観測用に受 信機の 2SB 化、IF 系改修、分光計の広帯域化、測定 機器のリモート制御やケーブルの低温対策が考慮さ れアップグレードされている。南極 30 cm 望遠鏡は 天の川銀河内の分子雲を観測対象とする。しかし主 成分の水素分子は数10K程度の低温の分子雲では電 磁波を放射しないため直接観測が困難である。その ため水素分子に次いで存在量の多い一酸化炭素 CO による観測を行う。CO では星形成期の高温高密度 の分子ガスをトレースし、[CI] は紫外線や宇宙線に より解離され CO では検出できない希薄なガス(暗 黒ガス)の分布を明らかにする。

望遠鏡設置予定の南極ドームふじ基地は昭和基地 か約 1000 km 離れた内陸部の標高 3810 m の高地に 位置し、サブミリ波の大気透過率が地上で最も高い。 図2は南極における大気透過率をソフトウェア am を用いてシミュレーションした結果である。am は大 気を複数の大気層の積算としてモデル化し、各層ご との大気温度、H₂ 混合比、O₃ 混合比から大気吸収 を考慮して、層間の輻射輸送を解くことで大気の光 学的厚みを計算する。500 GHz はつくばでは存在し ない大気の窓があり、ALMA 望遠鏡の観測サイトと 比較しても大気透過率が高く観測効率が最も良い。



図 1: 南極 30 cm サブミリ波望遠鏡 (2009 年)



図 2: 大気透過率

2 Instruments

2.1 ポインティング

観測時には赤道座標や銀河座標で与えられた天体の 座標を地表座標のアンテナの方位角(Azimuth:AZ) と仰角(Elevation: EL)に変換し、それぞれのモー ターに角度の指示値を送る。しかし望遠鏡設置時の 方角や水平面のずれ、組立時の機械誤差、受信機ホー ンや光学系のミスアライメント等により、実際にアン テナを向けても望遠鏡の視野に天体が入らない。そ のため事前に位置の分かった天体を観測することで 望遠鏡の指向誤差の補正を行う。この作業をポイン ティングという。しかし 500 GHz 帯には 30 cm 望遠 鏡のビームサイズ9分角において強度が強く、点光 源とみなせるポインティングに適した天体が限られ ている。そこで可視光と電波での2段階のポインティ ングを行う。光学望遠鏡は 30 cm 望遠鏡の電波軸と 平行になるよう EL 軸に設置されているが(図 3)、 同一の天体を光学望遠鏡で観測した時(光学軸)と 電波望遠鏡で観測した時(電波軸)のずれが生じる。 したがって両者の軸のずれを測定する必要がある。



図 3: 南極 30 cm 望遠鏡のポインティングシステム

2.2 光学ポインティング

南極 30 cm 望遠鏡の EL 軸に設置した光学望遠鏡 と CMOS カメラにより、夏季の白夜の南極で 3 等 級までの全天の星を撮影することで行う。(波長 640 nm 以下をカットする赤フィルターを使用することで 青空の背景値を抑え、日中の星の観測を実現してい る)。そして AZ と EL の関数で表される以下のモデ ル式 (1),(2) の係数 (*A*₁~*A*₁₂) を最小二乗法により

フィッティングを行い補正値 dAz, dEL を導出し、こ れらを考慮した指示値をモーターへ送ることで補正 する。ただしこれは CMOS カメラの指向性が補正さ れるだけであるので、実際の電波望遠鏡での観測に 重要な電波軸が天体の方向へ向くわけではない。そ のため電波ポインティングによる電波軸の位置決め が必要となる。

$$dAz = A_1 + A_2 \cos Az \tan El + A_3 \sin Az \tan El$$
$$+ A_4 \tan El + \frac{A_5}{\cos El} + A_5 \cos Az$$
$$+ A_9 \cos Az + A_{12} \cos Az \cos El$$
(1)

$$dEl = -A_2 \sin Az + A_3 \cos Az + A_6 + A_7 \cos El$$
$$+ A_{10} \cos Az + A_{11} \sin Az$$

2.3 電波ポインティング

光学ポインティングにより光学軸を合わせた後に 天体の方向に電波軸を合わせるために実施する。ポ インティング天体の候補としては、2011年のチリ観 測時にも観測した CO 強度が強いオリオン KL や月、 太陽を検討している。オリオン KL は 4.5'または9' 間隔で9点(または 13 点)観測が実施された。月お よび太陽は連続波によりクロススキャン観測を行い、 得られた輝度温度のエッジの両端の位置を用いて中 心座標を求める手法を検討している。電波ポインティ ングのモデル式は以下の式を用いる。

$$dAz = B_1 \sin(Az + El) + B_2 \cos(Az + El) + B_3 \quad (3)$$

$$dEl = B_1 \cos(Az + El) + B_2 \sin(Az + El) + B_4 \quad (4)$$

3 Methods

3.1 電波軸と光学軸のずれの測定方法

500 GHz の電波は前述のとおり大気透過率が0に 近いため、国内で天体を用いた観測は不可能である。 そのため電波送信機を疑似天体として電波軸・光学 軸のずれの測定を行う。実験室内での送信機を用い た測定では、信号源が近いため近傍界測定となり伝 2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

搬する電磁波は平面とならない。平面波としてみな せる遠方界条件は、周波数 500 GHz で口径 30 cm の 望遠鏡の場合、300 m 確保する必要があるが実験室 内でこの距離の確保は困難である。そのため主鏡に つくる電界分布(ビームパターン)は、実際に天体 を観測する場合の遠方界の結果とは異なり対称性が 崩れた形となる。これを考慮するため近傍界測定の シミュレーションを行い実測と比較した。

電波軸の測定は送信機をラスタースキャン観測す ることで、アンテナの各 AZ, EL ごとの電波強度を取 得し2次元の電波マップを得た。光学軸の測定では、 電波で送信機を観測中にカメラで送信機の写真を撮 影することで行った。したがって1回の測定により得 られるデータは送信機の電波強度マップとスキャン中 に撮影した送信機の写真の2つである。測定データ から得られる電波軸と光学軸のずれを Az_(RA - OPT), El_(RA - OPT)を以下の式で定式化する。

$$Az_{(\text{RA-OPT})} = Az_{(\text{radio})} - Az_{(\text{corr})} - Az_{(\text{simcorr})} - Az_{(\text{opt})}$$
(5)

 $El_{(\text{RA-OPT})} = El_{(\text{radio})} - El_{(\text{corr})} - El_{(\text{simcorr})} - El_{(\text{opt})}$ (6)

- Az_(radio), El_(radio):
 実測電波マップに2次元ガウシアンフィットをかけて求めた中心座標
- Az_(corr), El_(corr):
 光学望遠鏡とアンテナの設置位置による幾何補正
- Az_(simcorr), El_(simcorr):
 シミュレーション結果にガウシアンフィットをかけて求めた中心座標
- Az_(opt), El_(opt):
 スキャン中に撮影した写真中央に送信
 機が写るときのアンテナの座標

3.2 GRASP シミュレーション

近傍界のビームパターンのシミュレーションには物 理光学的手法を用いた電磁界解析ソフトの GRASP を使用した。入射波により反射鏡表面に誘起される



図 4: 電波・光学軸のずれの測定。左が JAXA 筑波 宇宙センター, 右が筑波大学

電流を二次波源とし、その電流が作る電波を反射波 として電磁界を計算していく手法を物理光学手法と いう。図面をもとに南極 30 cm 望遠鏡の主鏡、副鏡、 楕円鏡 2 枚、平面鏡 3 枚、受信機ホーンからなる光 学系をモデル化し、主鏡が作る電磁界分布(近傍界 ビームパターン)を求めた。



図 5: 南極 30 cm 望遠鏡の光学系

4 Result

4.1 ビームパターン

送信機と主鏡までの距離を 5 m, 8 m, 12.6 m, 16 m, 25 m としたときのシミュレーションと実測の結果 を以下に示す。それぞれ上図が実測、下図が GRASP によるシミュレーション結果である。









4.2 電波軸と光学軸のずれ

主鏡と送信機までの距離が 12,6 m のときに 1 回、 16 m のときに 2 回測定を行った。それぞれ表 1 の (a), (b), (c) に対応している。(7) は 3 回の平均値の 測定の平均値である。

表 1: 電波軸と光学軸のずれ

| (a)12.6 m, (| (b)16 m 1 🗉 | 1目, (c) | 16 m, 2 回目 |
|------------------------|-------------|---------|------------|
| [deg] | (a) | (b) | (c) |
| Az _(RA-OPT) | -1.804 | -1.486 | -1.513 |
| $El_{(RA-OPT)}$ | 0.04089 | 0.2143 | 0.1627 |

 $Az_{\rm radio-opt} = -1.601 \pm 0.177 [\rm deg]$

$$El_{\rm radio-opt} = 0.0890 \pm 0.139[\text{deg}]$$

5 Discussion

電波軸と光学軸のずれの測定の誤差が大きい原因 としては光学望遠鏡の固定が不十分であり、観測中 にカメラの位置がずれてしまったことが考えられる。 現在の固定方法では、南極での作業性を考慮し、ネ ジ止めを使用せずにクランプレバーで 30cm 望遠鏡 の EL 軸に押し付ける方法を採っている。ピント調 整のために望遠鏡の筒の長さを調整するたびに筒を 固定するネジがゆるみ、各測定の度に光学軸がずれ てしまっていた。そのため光学望遠鏡とカメラの位 置を一意に決められるような固定方法や設置の再現 性を考慮して再測定を行う必要がある。

また今回の測定では実測ビームがシミュレーショ ンよりも大きくなっている(図7,図7)。その原因と しては、シミュレーションでは電波源を点源とみな してビームを計算していたが、実際には送信機自体 に有限の大きさがあることによりビームが広がって いるためであると考えられる。

6 Conclusion

本研究では、筑波宇宙センターおよび筑波大学で電 波送信機を用いた近傍界測定を行い、電波観測と可視 光観測によるずれの角度を測定した。その結果近傍界 のビームパターンはシミュレーションを再現する結果 が得られ、軸のずれはAZ方向は-1.601±0.177[deg], EL 方向は 0.0890±0.139[deg] という結果を得た。

今後の課題としては、光学望遠鏡の再現性のある 固定方法を検討し軸のずれの再測定を行う。また新 しいアンテナ駆動系、制御システムでの光学ポイン ティングを行い、ポインティングのモデルフィットに より残差がどれだけ収束するか調べる。また国立極地 研究所の低温室にて南極環境下の-30°Cから-40°C でのアンテナ駆動試験を行い、アンテナの指向精度 を確認し、南極観測に向けた問題点の洗い出しをす る。さらに実際に南極での天体を用いたポインティ ング方法について検討を進める。

Reference

Ishii, S. et.al. 2014, Proc. of SPIE

(7)

(8)

——index へ戻る

観測b12

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画 「HiZ-GUNDAM」について

影山 璃音

ガンマ線バーストを用いた初期宇宙探査計画 「HiZ-GUNDAM」について

影山 璃音 (東京都市大学大学院 総合理工学研究科)

Abstract

HiZ-GUNDAM(High-z Gamma-ray bursts for Unraveling the Dark Ages Mission、ガンマ線バーストを 用いた初期宇宙探査計画)とは、2030年頃に打ち上げを目標とした、JAXAの公募型小型衛星計画5号機承 認を目指している計画である。この衛星の目的は、宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト(GRB)の 観測を通して宇宙の最初期にできた天体を探査することと、重力波観測と中性子星合体に伴う現象を観測す ることによるブラックホール誕生時の極限時空周辺での物理現象を理解することである。この計画の現在の 課題の1つとして、搭載する望遠鏡の冷却がある。赤外線観測では常温下では望遠鏡自体が熱放射で輝いて しまうこと等により感度が劣化してしまうため、望遠鏡の感度を確保するために望遠鏡の温度を 200K 以下、 近赤外線検出器は 120K 以下まで冷却する必要がある。このような温度要求を機械式冷凍機なしで実現する ための熱設計が課題となっている。私は望遠鏡の形状やミッション部における機器配置を熱的な観点から検 討し、最適な望遠鏡の形状を検討していく予定である。

1 Introduction

1.1 ガンマ線バーストについて

宇宙はビッグバンにより誕生し、初期宇宙の時代 には水素とヘリウムのみからなる初代星が生まれた。 初代星は大質量になり、強い紫外線を放射し、宇宙 に存在した中性水素を再びプラズマ化させた現象で ある宇宙の再電離の原因とされる候補の一つである と考えられている。宇宙の再電離過程の解明のため にも、初代星など初期宇宙における天体形成の観測 が必要である。初代星を含む大質量星は、その生涯 の最後にガンマ線バースト(GRB)と呼ばれる大爆発 を起こすものもあるため、GRB 観測を通して初期宇 宙における天体形成や再電離過程を探ることができ る。

近年、中性子星連星の合体時に鉄が中性子を捕獲 することで金やプラチナ、ウランなどの重元素が合 成されることがわかった。恒星内部の核融合でも中 性子捕獲によって鉄より重い元素の合成はゆっくり 進む (s(slow) 過程) が、中性子連星の合体により中性 子が豊富な領域でβ崩壊する前に次々とs過程より も速く中性子捕獲が進むため、r (rapid) 過程と呼ば れ、合成された元素はr 過程元素と呼称される。ま た、中性子星連星の合体後にr 過程元素が放射性崩 壊によって輝く放射現象をキロノバといい、この現 象を観測し、各元素の生成量などを明らかにする必 要がある。中性子星の連星合体の際に GRB が発生 する。

そこで GRB を検出し、すばる望遠鏡や次世代の 大型望遠鏡と連携して分光追観測することで宇宙最 電離や重元素合成、ブラックホール誕生時のエネル ギー変遷、初期宇宙の星形成の歴史などの解明を目的 とした小型衛星「HiZ-GUNDAM」の打ち上げが計 画されている。GRB は宇宙最大の爆発現象であり、 100 億光年以遠の爆発現象であっても検出可能であ るため、GRB 観測を通して初期宇宙の星形成や宇宙 環境の解明も目指している。GRB は発生場所が予想 できない上に、継続時間が秒単位であり、その後の 残光現象も数日間しか続かないため観測が難しい現 象である。

現在のGRB 観測は人工衛星がGRB を発見後、地 上小型望遠鏡で残光を観測し、地上中型望遠鏡で赤 方偏移を同定、高赤方偏移なGRB に対しては大型望 遠鏡で分光観測を行っている。しかし、この方法では 大型望遠鏡で突発的なGRB 観測を行うまでに時間が かかるためGRBの残光が減少し、分光スペクトルの 観測精度が低下してしまう。そこで、HiZ-GUNDAM では広視野 X 線モニターと近赤外線望遠鏡を搭載し た人工衛星を打ち上げてGRB を探査し、GRBの発 見から赤方偏移の決定までを1つの人工衛星で行う 予定である。そのため、現在の観測過程に存在する 地上での小型・中型望遠鏡による観測過程をカット し、残光が減少する前に大型望遠鏡による高赤方偏 移 GRB の分光観測を迅速に行うことが可能になる。

1.2 HiZ-GUNDAM 衛星について

HiZ-GUNDAM 衛星に搭載するミッション機器は 衛星中央のホーン状のバッフルが特徴的な可視光・赤 外線望遠鏡とその周りを囲む四角柱の広視野 X 線モ ニター (WFXM) である。(図 1) WFXM の焦点位 置には X 線光子を検出するためのイメージングセン サーを配置し、GRB などを探査し、その発生方向を 決定する。また、HiZ-GUNDAM は宇宙に望遠鏡を 打ち上げ、宇宙空間から GRB を観測することで地 上の望遠鏡と比べ、天候に左右されない24時間の観 測や大気の影響を受けやすい波長帯である近赤外線 波長帯の精度の良い観測が可能になる。可視光・赤 外線望遠鏡は口径 30cm の主鏡を持ち、地上の 2m 級 の中型望遠鏡に相当する 20 等級以上の感度を有す る。熱放射により望遠鏡自体が赤外線で輝いてしま うと、近赤外線波長帯における感度が劣化してしま うため、高い感度を達成するために 200K まで望遠 鏡を冷却しなければならない。また、同望遠鏡に搭 載予定の H1RG 検出器(近赤外線検出器)の暗電流 による観測精度の悪化を防ぐために近赤外線検出器 は 120K 以下に冷却する必要がある。上記のような 望遠鏡に対する熱的な要求に対し、機械式冷凍機を 使用せずに放射冷却のみで要求温度を達成しなけれ ばならない。その実現に向けて熱解析ソフトウェア Thermal Desktop を用いた解析により、この熱的要 求を満たす設計解が得られているので、本研究では その熱的な設計について解析する。



図 1: HiZ-GUNDAM 衛星の概略図

2 Methods

2.1 軌道

本研究では太陽と地球、人工衛星の位置関係が常 に同じ昼夜境界線上で地上から約 600km 上空の太陽 同期極軌道を採用しているため、観測範囲は地球に 対して垂直の方向において太陽方向に 30 度、反太 陽方向に 60 度である。姿勢は 2 種類あり、GRB 探 査姿勢と GRB 追観測姿勢の 2 種類の姿勢を用いた 軌道で解析した。(図2)解析軌道として北極上空か ら再び同地点に戻ってくるまでの一周を扱い、望遠 鏡や他機器の温度の上昇を抑えるために一周の間に 約8回の姿勢変更を挟む。そのため、GRB 観測姿勢 及び追観測姿勢は継続的に 572 秒間姿勢を維持し続 け、その後153秒かけて姿勢変更を行う設定とした。 さらに、太陽-地球間の距離が最も短くなり、太陽の 放射による入熱が最も多くなる冬至の時期に南極で GRB 探査姿勢から GRB 追観測姿勢に姿勢変更を行 うことを想定して解析を行う。



図 2: HiZ-GUNDAM の設定軌道と2種類の姿勢

2.2 機器配置

HiZ-GUNDAM に搭載する検出器の温度をマージ ン込みの 105K まで冷却するための複数の機器の配 置を図 3 に示す。近赤外線検出器で生じた熱をサー マルリンクを使用して近赤外線検出器専用ラジエタ に伝達させ、近赤外線検出器専用ラジエタによって 近赤外線検出器の発熱を効率的に排出する。さらに、 サンシールドを追加することで太陽光を遮断し、過 熱を防ぐことができる。



図 3: 機器配置

2.3 熱解析

本研究では熱解析ソフトウェア Thermal Desktop を用いて熱解析を行った。Thermal Desktop 内での 形態係数の算出や各面への熱入力の算出はモンテカ ルロ法を用いたレイ・トレースによって行った。レ イ・トレーシング法とは複数の物体が光を乱反射させ て、お互いを照らす効果を計算する方法である。こ の方法では反射や散乱といった物体に光が衝突した 場合の挙動も吸収率や放射率、反射率などの物体の 表面特性に従って、物体に光が衝突した場合の挙動 を計算し、ノード間の入熱や放熱の量を求める。し かし、レイ・トレース法で投影面に実際に入射され る光線の全てを再現するには膨大な計算が必要とな るため、モンテカルロ法を用いた。モンテカルロ法 では乱数を用いて数値計算を行い、レイ・トレース により光が入射する座標や反射・散乱といった挙動 をランダムに決定させてシミュレーションしている。

3 Results

本研究では HiZ-GUNDAM が一周期中に GRB を 一回発見すると考え、太陽の放射による望遠鏡や検 出器への入熱が最も多い場合を想定し、熱解析を行っ た。そのときの望遠鏡の最高温度を図4に示す。太 陽-地球間が最も短くなる冬至の時期に南極で GRB 探査姿勢から GRB 追観測姿勢へ姿勢変更を行った 3000s~4000s 付近で温度が上昇している。しかし、 一周期中で最も温度が高い場合においても、望遠鏡 の温度は162K以下となった。また、近赤外線検出 器に接続されているサーマルリンクを上下で10等分 し、ラジエタ側と検出器側における温度勾配を図5に 示す。ラジエタ側は太陽への近接と姿勢変更が重なる 場合を想定した地点で温度が上昇しているが、103K 以下となっている。検出器側は検出器による放熱で ラジエタ側よりも温度が高いが、105K以下となって いる。







図 5: サーマルリンクの温度勾配

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

4 Conclusion

本研究では熱解析ソフトウェアを用いて、望遠鏡 を200K以下、近赤外線検出器を120K以下にするた めの熱解析を行った。その結果、望遠鏡は162K以 下で近赤外線検出器は105K以下となり、目標とし ていた熱条件を達成した。

今後の課題として本研究での解析結果はラジエタ やサーマルリンクを支持する構造からの入熱を考慮 していないため、他の機器からの入熱も含めて解析 する予定である。また、望遠鏡に搭載する鏡の枚数 やミッション機器の配置、各機器の形状などはまだ 明確に定義されていないため、それらの設計を詳細 化する必要がある。そして、試験モデルを作成し、実 際に冷えることを確認する必要がある。

Reference

福井陽喜 2023, 東京都市大学大学院 総合理工学研究科 自 然科学専攻 修士論文

-index へ戻る

観測 c01

南極30 cm サブミリ波望遠鏡用 新 IF ボックスの設計 と製作

山崎 豪

南極 30 cm サブミリ波望遠鏡用新 IF ボックスの設計と製作

山崎豪(筑波大学大学院宇宙観測研究室)

Abstract

筑波大学宇宙観測研究室では一酸化炭素分子 CO(J=4-3) 輝線 (461 GHz) と中性炭素原子 [CI] (³P₁-³P₀) 輝線(492 GHz)の同時観測計画が進められている。観測対象となる CO(J=4–3) は星形成領域に付随した 高温・高密度の分子ガスのトレーサー、[CI](³P1-³P0)は紫外線や宇宙線によって CO 分子が解離している 希薄な分子ガスのトレーサーとして注目されている。これらの輝線はサブミリ波帯の中でも高周波帯に存在 しているため、大気吸収の影響を受けやすい。そのため、大気透過率が非常に高い南極に 30 cm 望遠鏡を設 置し、CO(J=4–3)と [CI](³P₁–³P₀)の観測を行う。また、この 2 輝線の同時観測を行うことにより観測 時間を短縮することができ、かつ2輝線のポインティング誤差を無くし、正確な強度比を得ることが出来る。 南極 30 cm 望遠鏡では USB と LSB を分離する 2SB 受信方式を採用している。受信機は初段の冷却受信機 と後段の IF ボックスからなり、冷却受信器では 500 GHz 帯の信号を 6–18 GHz の中間周波数(IF)に変換 し、IF 信号を USB、LSB の 2 系統に分離してシングルサイドバンド(SSB)として同時出力する。IF ボッ クスではこの信号を分光計の対応周波数帯域(0–2.5 GHz)に変換し、信号強度を約-8 dB まで増幅させる。 本研究では IF ボックスのブロック図をもとに、IF ボックス内に搭載するコンポーネントの配置設計を行 い、製作した。また、受信機系全体で行う前段階として IF ボックス単体での性能評価のため、出力の時間 変動の安定性の指標となるアラン分散を測定した。その結果、IF ボックス全体で約 80 秒の安定性を得るこ とができた。実際の観測においてもラスタースキャン観測が1スキャンに要する時間は約60秒であるため、 十分な安定性だといえる。

1 研究背景

分子雲中に最も多く存在しているのは水素分子 H₂ であるが、H₂分子は同種原子の2原子分子で電気的 な偏りが無いため、電気双極子モーメントが0であ る。そのため、双極子モーメントによる回転遷移の 放射が起きず、分子雲のような低温(~10 K)の水 素分子は電波領域で観測することができず、分子ガ スの観測には分子雲中で H₂ 分子の次に多く存在して いる一酸化炭素分子 CO が用いられる。CO は異種 分子の2原子分子であるため電気双極子モーメント を持ち、回転遷移による電磁波を放射する。特に CO (J=4-3)は分子雲中における星形成領域に付随した 高温・高密度のトレーサーである。中性炭素原子 CI は宇宙誕生初期から存在する元素の1つで、CO が 解離するような低密度領域のトレーサーであり、分 子雲形成といった星形成の初期段階を知ることがで きる。南極 30 cm 望遠鏡計画では 500 GHz 帯にあ る CO (J=4-3) 輝線 (461 GHz) と [CI] (${}^{3}P_{1}-{}^{3}P_{0}$) 輝線(492 GHz)の同時観測を目的としている。同 時観測により、観測時間の短縮、ポインティング誤差

が無くなり2輝線の正確な強度比が得られる、など といったメリットがある。しかし、CO(*J*=4-3)輝 線(461 GHz)と[CI](³*P*₁-³*P*₀)輝線(492 GHz) はサブミリ波であるため、大気中の水蒸気による吸 収の影響を受けやすく、地上での観測は困難である。 一方、南極にある観測基地(ドームふじ基地)は標 高が3810 m と高く、一年を通して晴天率が高い。ま た、乾燥しているため、大気中の水蒸気が少なく大 気透過率が高い(図 2)。そのため、サブミリ波の観 測に適した場所となっている。



図 1: 30 cm 望遠鏡



図 2: 南極の大気透過率

2 受信機系概要

およそ 100 GHz を越えた信号では、その帯域での 性能の良い低雑音アンプの製作が困難となっている。 そのため、南極 30 cm 望遠鏡ではヘテロダイン受信 方式を採用している。ヘテロダイン受信とは、天体 からの信号 (RF 信号) にミキサを用いて局部発信器 からの人工の信号 (LO 信号) 混ぜることで、低い周 波数帯の信号 (IF 信号) として取り出す方式である。 IF 信号の周波数は RF 信号、LO 信号の差分となる。 RF、LO、IF 信号の周波数をそれぞれ ν_{RF}、ν_{LO}、ν_{IF} と表すと、これらの関係は以下のようになる。

$$\nu_{\rm RF} = \nu_{\rm LO} \pm \nu_{\rm IF} \tag{1}$$

式1から*v*_{RF}は*v*_{LO}に対して2つの周波数帯(サ イドバンド)に感度を持っている。このうち周波数 が低い側をLSB(lower side band)、高い側をUSB (upper side band)と呼ぶ。この2つのサイドバンド のうち、一方をカットして片方のみを出力する方式を SSB(シングルサイドバンド)受信方式と呼ぶ。この 方法は輝線観測に適しており、見たい輝線がUSB、 LSB どちらか片方のみに存在している場合有用であ る。対して、2つのサイドバンドの両方を出力する方 式を DSB(ダブルサイドバンド)受信方式と呼ぶ。 この方法は広い周波数帯を観測することができ、連 続波観測に適している。本研究では CO と [CI]の同 時観測を行うため、2SB 受信とはUSB、LSB を分 離し、それぞれに対して SSB 受信を行う方法である。

受信機は前段の冷却受信機、後段の IF ボックスから なる。冷却受信機では天体からの RF 信号 (500 GHz 帯)を 6–18 GHz の中間周波数 (IF) 信号に変換し、 IF 信号を USB と LSB の二系統に分離、SSB として 出力する。IF ボックスではこの IF 信号を分光計の 対応周波数帯域 (0–2.5 GHz) に変換し、信号強度を 約-8 dBm/GHz まで増幅する。



図 3: 信号経路の概略図。天体からの RF 信号 (500 GHz 帯)を冷却受信機で 6–18 GHz 帯に変換、 USB,LSB の二系統に分離し SSB として出力、IF ボッ クスで 0–2.5 GHz 帯に変換する。

本研究ではこの IF ボックスの内部コンポーネント 配置を、ブロック図 (図 4)を基に決定し、製作した。 また、受信機系全体で行う性能評価の前段階として IF ボックス単体での安定性評価のため、アラン分散 の測定を行った。



図 4: IF ボックスのブロック図

3 IF ボックス設計

ブロック図を基に IF ボックスの配置設計を行い (図 5)、作製した (図 6)。IF ボックスは 314×424×72 mm のサイズであり、必要なコンポーネント (アンプ、バ ンドパスフィルタ、ミキサ、ローカルなど) が全て収 まっている。



図 5: 設計した IF ボックス配置の 3DCAD 図



図 6: 実際に作製した IF ボックス

この IF ボックスの安定性を評価するため、アラン 分散という指標を用いる。

分光計や連続波検出器のある時間 t での出力信号の 時系列データx(t) は雑音の大きさに応じてランダム にばらつく。N 個の測定結果 $[x_1, x_2...x_N]$ から τ 秒 間毎の平均をとった値のうち、n 番目の平均値 $y_n(\tau)$ は以下のように表される。

$$y_n(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x_{i+n\tau} \tag{2}$$

この平均値 $y(\tau)$ もランダムに変化する。アラン分散 は平均値 $y(\tau)$ 、 $y(\tau - 1)$ の差がどの程度散らばって いるかということを示し、以下のように定義される。 (*K* はデータを τ 秒毎に区切った時の平均値の個数)。

$$\sigma_A^2 \equiv \frac{1}{2K} \sum_{n=1}^{K} [y_n(\tau) - y_{n-1}(\tau)]^2$$
(3)

このとき、平均した時間 τ を横軸に、アラン分散 σ_A^2 を縦軸にとったグラフをアランプロットという。ア ランプロットは時間に対して τ^{-1} で減少している部 分までが安定、それ以外の部分では安定していない ことを示す。そのため、アランプロットから出力が 安定している時間を知ることができる。

本研究の測定セットアップは図7の通りである。ノイ ズソースで10 MHz-26.5 GHz の信号を出力し、IF ボックスで周波数のダウンコンバートや信号増幅を 行った出力信号を1秒間隔でスペクトルアナライザー で読み取り、そのデータからアラン分散を求めた。ま た、アンプの立ち上がり状況を知るために測定中の IF ボックス内の温度も同時に記録する。



図 7: アラン分散測定時のセットアップ

4 結果

測定した結果、IF ボックス内の温度と出力は以下 のようになった。



図 8: アラン分散測定時の温度



図 9: アラン分散測定時の出力

分までが安定、それ以外の部分では安定していない この出力の 200.400.600.800 分後から 2200 秒の ことを示す。そのため、アランプロットから出力が データを用いてそれぞれアラン分散の計算を行った。



図 10: 求められたアラン分散(アランプロット)

2024年度第54回天文・天体物理若手夏の学校

以上より、IF ボックス単体での安定性は約80秒 だと求められた。南極30望遠鏡の観測方法はラス タースキャンである。これは、天球上で観測点を連 続的に動かす観測方法であり、一本の直線(スキャ ン)を少しずつずらして2次元を掃く観測となって いる。そのため、1スキャンの間は観測が観測し続け ているためその時間は安定している必要がある。南 極30望遠鏡の観測では1スキャンの時間は約60秒 であるため、それを超える安定性が求められる。今 回の結果はこの時間をカバーしているため、十分な 安定性を得ることが出来た。

5 まとめと今後

南極 30 cm 望遠鏡に搭載する IF ボックス内のコ ンポーネントの配置を決定し、製作した。また、IF ボックス単体での安定性評価としてアラン分散を測 定し、実際に南極で行うラスタースキャン観測の 1 スキャン時間 60 秒を十分にカバーする約 80 秒の安 定性が得られた。

今後は二系統目の IF ボックスを製作し、同様に安 定性の測定を行う。さらに、冷却受信機、分光計も 含めた受信機系全体の性能評価を行う。

Reference

瀧口風太 2022, 筑波大学大学院 数理物質科学研究群 物理 学学位プログラム 修士論文

藤森柊人 2023, 筑波大学大学院 数理物質科学研究群 物理 学学位プログラム 修士論文

H. Yang 2010, The Astronomical Society of the Pacific
-index へ戻る

観測 c02

宇宙赤外線干渉計LIFEのためのナル干渉計を用いた 極低温可動鏡の駆動精度の計測

谷内 逸華

宇宙赤外線干渉計 LIFE のための ナル干渉計を用いた極低温可動鏡の駆動精度の計測

谷内 逸華 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

太陽系外惑星大気の特徴と、太陽系外の生命探査を目的とした宇宙ミッションである宇宙赤外線干渉計 Large Interferometer for Exoplanets (LIFE) に取り組んでいる。LIFE は地球に似た惑星を含む数百個の太陽系外 惑星の大気を検出し、その特徴を明らかにすることができると期待される。これまで、中間赤外線の波長帯 域で中心星とその周りの Habitable Zone を空間分解することができなかった。そこで、同波長帯で編隊飛 行型を採用することで、従来にない高い空間分解能を達成し、地球に似た太陽系外惑星の大気を観測し、特 徴付けることができるようになると期待される。

ナル干渉計は天体からの2光束に半波長の位相差を与えることで、光軸上の主星からの光を打ち消し、軸 外の惑星光を観測する。高コントラストの実現には、精密な光路調整が必要となる。そこで今回、サブナノ メートルのレベルで安定な鏡を導入し、本実験のゴールとして、光学系全体を極低温真空装置に入れ、要求 するナノメートル精度で可動鏡が駆動することをナル干渉計を用いて検証する。実験方針としては、まずマ イケルソン型干渉計を組み、ビームスプリッターと反射鏡を極低温真空環境下に置くことで、極低温真空環 境の擾乱を調査することから始める。極低温真空環境下で可動鏡が動作することが確認できた後、ナル干渉 計を極低温環境下で組み、ナル干渉光の強度から光路差を推定し、可動鏡の動作の精度や安定性を検証する。

1 研究背景

1.1 プロジェクト概要

宇宙赤外線干渉計(LIFE)は、何百もの太陽系外 惑星を直接検出し、大気の特徴を明らかにするため に最適化された、比類のない科学能力を持つ宇宙ミッ ションである。そのうちの数十個は、地球型惑星で あり、温帯惑星であり、我々が知っているような生命 が存在する可能性がある。編隊飛行型中間赤外線干 ナル渉計として、2-3.5 mの開口部を持つ4機の集光 子機と親機で構成され基線長 100-600 m を有する。 観測波長範囲はで 4-17.5 µm を要求し、3-20 µm を 目標とし、必要な分光分解能は35を要求し、50を目 標としている。ハビタブルな惑星の探査を含め、か なりの数の地球型惑星の大気の特徴を明らかにする ことは、おそらく系外惑星科学の主要な目標であり、 21 世紀の天体物理学における最も挑戦的な試みの一 つである。しかし、すべての主要な宇宙機関や地上 観測所の最重要課題であるにもかかわらず、現在世 界中で計画されているプロジェクトやミッションに おいて、この目標を達成する技術的能力を持つもの

はない。LIFE は、中間赤外線波長帯域で動作する宇 宙での編隊飛行型ナル干渉計を採用したミッション の科学的可能性と技術的課題を調査に取り組んでい る。LIFE は 2000 年代前半から中盤にかけての ESA の Darwin と NASA の TPF-I のコンセプトを基盤と している。我々の太陽系外惑星に対する理解の飛躍 的な進歩や、関連技術における著しい進歩によって、 人類の最も基本的な疑問の1つを調査する LIFE の ような将来ミッションの必要性や、ミッションの実 現可能性の認識を目指している。



図 1: LIFE のイメージ図 (Quanz et al. 2022)

1.2 目的

LIFE の技術的課題のひとつは、編隊飛行におけ る光路長制御である。惑星観測では、主星と惑星の 間の高いコントラストを克服する必要がある。光路 長をナノメートル精度で制御することで、惑星観測 に必要な高いコントラストを実現することができる。 最も暗い「ナル」の状態での干渉縞のコントラスト は10⁻⁵、可動鏡を1 nm ずらした状態でのコントラ ストは 10⁻⁴ 必要となる。光路長はナノメートル精度 で制御しなければならないが、スペースクラフトは ナノメートル精度で位置を制御することはできない。 そのためスペースクラフトの制御ではなく、光学系 中のミラーを制御することで光路長を調整する。極 低温真空環境下での計測は、圧力や熱膨張率などが 常温常圧環境下と異なるため困難である。そのため、 観測実現に向けて、観測環境で安定に調整を行うこ とができる光学系の確立を目指す。



図 2: 太陽と地球のスペクトル (Traub, Jucks, et al. 2002)

1.3 ナル干渉計

光学系にナル干渉計を導入する。ナル干渉計は、複 数の望遠鏡、望遠鏡開口部間の干渉に基づく装置技 術に与えられた名前で、太陽系外惑星を直接検出す ることを目的としている。原理は、明るい天体であ る主星の正確な位置に仮想的な「暗い点」を作るこ とで、主星の周りを回るより暗い天体である惑星を 捉えるというものである。

ナル干渉計の設計では、数メートルから数百メートルの基線で区切られた2つ以上の大型望遠鏡からの光束を結合し、再結合前にアクロマティック位相シ

フターと呼ばれる特別な装置を光束の一部に導入す ることが前提となる。この位相シフターにより、位相 が半波長シフトされる。これにより2つの光束を結 合するときに、光路差がゼロの光源である軸上光源 からの光が弱めあいの干渉、つまり「ナルする」よう に位相シフトを生じさせる。この軸上光源が主星で ある。近くの太陽系外惑星は光路差がゼロではない ため、その光は少なくとも部分的に透過する。加え て、太陽系外惑星の明るさは極めて小さいため、中 間赤外線観測を特徴づける強い熱背景放射を減らす 必要がある。つまり、望遠鏡は低温、100K以下でな ければならない。地球大気により中間赤外線の大部 分が吸収され、また熱背景放射の影響を考慮すると、 宇宙環境での観測が必須である。



図 3: ナル干渉計システム

2 計測方法

高精度で動作すると考えられているミラーマウン トを用い、マイケルソン干渉計を組む。

マイケルソン干渉計は、光束をビームスプリッター を用いて2光束に分割する。鏡を用いてビームスプ リッターに光束を返し、ビームスプリッターで検出 器に偏向させる。2光束を結合し干渉が生まれる。

本実験において、ビームスプリッターで分かれた2 光束のうち一方の光束の反射鏡マウントは固定、も う一方の光束の反射鏡マウントに可動のものを用い る。可動のミラーマウントを動作させることで得ら れる干渉縞の変化を見ることで、ミラーマウントの 動作を確認する。

2.1 計測目的

ミラーマウントの性能評価を行うためには、計測 環境が鍵となってくる。そこで、まず計測環境につ いて調べる。マイケルソン干渉計で、光学系を固定

した状態で得られた干渉縞の様子を観察する。ビー用いる。レーザーを放射し、レーザーの光路を見な 低温真空環境の擾乱を調査する。



図 4: マイケルソン干渉計システム

Cryo Tiip Tilt Piston Stage 2.2

今回、光路長調整のために Cryo Tip-Tilt Piston Stage(CTTPS)を一方のミラーステージに導入する。 CTTPS は、ナノメートル精度での制御を実現でき ると考えている。ミラーステージは、ピエゾの Cryo Linear Actuator(CLA)3台が駆動することで、光束を 光路長方向と角度方向への調整を行うことができる。

先行研究 (?) で、3台の CLA で構成されたステー ジの性能を評価している。ここでは、ステージが5 Kで5nm/Vの精度を持つことが示されている。

本実験において必要なナノメートル精度での調整 を行うために、この CLA で構成されたミラーマウン ト CTTPS を導入する。



図 5: CRYO TIP TILT PISTON STAGES の画像

2.3 計測の流れ

干渉縞を取得する方法を以下に示す。CTTPS の 光路長安定性および動作精度を測定するため、光学 定盤上にマイケルソン干渉計を組む。光源は 663 nm He-Ne レーザー、干渉縞の検出には CMOS カメラを

ムスプリッターと反射鏡を極低温真空下に置き、極 がら、カメラに2光束が入り、かつ干渉縞が得られ るように光学調整を行う。干渉縞の観察するために、 鏡の調整を行い縞の本数を減らす。カメラで干渉縞 データを取得する。

> 計測は、常温常圧環境下ではじめ、最終的に極低 温真空環境下で行う。極低温真空環境下での CTTPS の性能評価となるので、今回のクライオスタットを 用いる実験ではビームスプリッターと2枚の反射鏡 をクライオスタット内部に設置して行う。

表 1: 計測環境 (※ CR: クリーンルーム)

| | | | (| , , , |
|---|------|----|-----|----------|
| | 温度 | 圧力 | 場所 | クライオスタット |
| 1 | 常温 | 常圧 | 実験室 | 無し |
| 2 | 常温 | 常圧 | CR | 無し |
| 3 | 常温 | 常圧 | CR | 有り |
| 4 | 77 K | 真空 | 実験室 | 有り |
| 5 | 常温 | 常圧 | 実験室 | 有り |



図 6: クライオスタット内部の画像

結果 3

常温常圧環境下で、光学定盤上に光学系を設置し た。干渉縞にλ/4程度の揺らぎがあった。そのため、 光学定盤のコンプレッサーを稼働させ、光学系に覆 いをしたところ揺らぎが λ/10 程度になった。

クリーンルーム中で、常温常圧環境下で、光学定 盤上に光学系を設置した。クリーンルーム外で計測 を行なったときよりも小さな揺れが見られた。クラ イオスタットを使用し、光学系を組み直し、光束が 通ることが確認できた。

クライオスタットを 77 K 真空環境にした。真空 引きを行なっている間、温度を下げている間に干渉 編の本数が増加していることが確認できた。CTTPS が77 K 真空環境下で動作することが確認できた。ア クチュエータの動作量によって、アクチュエータの 動作の仕方に再現性が確認できた。

クライオスタットを常温常圧にした。77 K、真空 環境から常温常圧にしたときに CTTPS が動作する ことが確認できた。



図 7: 干渉縞の揺れの周波数解析結果

4 今後の展望

図7の5 Hz、38 Hz あたりにピークが見られるように、光学系に対して、さまざまな外的擾乱があり、 取得した干渉縞に揺れがのっている。干渉縞の揺れ の原因を解析し追求していくことが急務である。揺 れの原因の追求、改善を行い、最も揺れの少ない環 境の構築する。最も揺れの少ない環境での縞の揺れ と CTTPS の動作による縞の変化の切り分けを行う 必要がある。今後の目標としては、揺れの少ない環 境での CTTPS の性能評価を行うことである。この 目標を達成したのち、極低温真空環境下で可動鏡が 動作することが確認し、ナル干渉計を極低温環境下 で組み、ナル干渉光の強度から光路差を推定し、可 動鏡の動作の精度や安定性を検証していく。

Reference

LIFE HP, https://life-space-mission.com

- D. Angerhausen, The LIFE space mission: characterizing atmospheres of terrestrial exoplanets and searching for habitable worlds and biosignatures, ETH Latsis Symposium, (2022)
- Bogdanovic, Stefan, Diamond-based Fabry-Perot microcavities for quantum networks, Delft University of Technology, pp 38, (2021)
- S. P. Quanz, Large Interferometer For Exoplanets (LIFE): I. Improved exoplanet detection yield estimates for a large mid-infrared space-interferometer mission, Astrophysics, pp 3, (2021)

W. A. Traub, K. W. Jucks, A Possible Aeronomy of Extrasolar Terrestrial Planets, Astropysics, pp 5, (2002) -index へ戻る

観測 c03

宇宙可視光背景放射観測6U衛星VERTECSの開発 状況

中川 俊輔

宇宙可視光背景放射観測 6U 衛星 VERTECS の開発状況

中川 俊輔 (九州工業大学大学院 工学府)

Abstract

宇宙背景放射は、銀河系外から飛来する放射の積算であり、暗い天体を含む天体形成史の全貌を解明するために重 要な観測量である。これまでの観測ロケットおよび赤外線天文衛星などによる観測の結果、近赤外線の宇宙背景放射 は系外銀河の積算光に比べて数倍明るいことが確認されたが、その余剰成分の起源は未解明である。その起源の候補 として、宇宙初期の初代星や銀河ハロー浮遊星などが提案されており、これらの天体は可視光波長における輝度スペ クトルと空間ゆらぎが異なることが予想されているため、可視光における観測が余剰成分の起源解明のために重要と なる。あらゆる方向から飛来する宇宙背景放射の検出感度は、望遠鏡口径と視野角の積によって決定されるため、小 型でも広視野の望遠鏡によって観測可能である。そこで我々は、6U サイズの超小型天文衛星 VERTECS (Visible Extragalactic background RadiaTion Exploration by CubeSat) にて、可視光における宇宙背景放射の輝度スペ クトルを測定し、背景光の余剰成分の起源解明に挑む。本衛星は、3U サイズの可視光望遠鏡および高精度な姿勢制御 装置を含む 3U サイズのバスシステムから構成される。2022 年 12 月から開発を開始し、これまでにミッションおよ びシステム要求を明確化するとともに、それらの要求を満たす衛星のサブシステムの設計を完了した。2024 年 4 月に 設計審査を実施し、現在は 2025 年度の打ち上げに向けブレッドボードモデルおよび熟構造モデルを用いて機能・イ ンターフェース試験を実施している。本講演では、VERTECS 衛星の開発状況を報告する。

1 諸言

1.1 宇宙背景放射

これまで、ハッブル宇宙望遠鏡などを用いて個々 の銀河を点光源として観測し、銀河形成に関する多 くの研究が行われてきた。銀河由来の紫外線や星間 ダストが放射する可視光・赤外線を観測することで、 銀河形成が始まった約 130 億年前 (赤方偏移 z ~ 6) までの天体形成史を調べることが可能である。しか し、個々の銀河観測から得られるサンプルはより明 るい銀河に偏っているため、銀河形成以前の z > 7 の時代では、代表的な天体が見落とされる可能性が 高い。標準的な階層構造形成モデルによれば、銀河 は小さな天体から形成され、それが合体して大きな 天体へと成長したと考えられている。したがって、 これまで観測されている銀河はすでに集積が進んだ 銀河であり、多くの物質は集積されていないガスや 矮小天体として残されている。つまり、銀河形成を 明らかにするためには、暗い矮小天体や淡く広がっ た天体などの残されたピースを初期宇宙から現在に かけて偏りなく詳細に調査する必要がある。初期宇

宙の矮小天体は極めて暗いため、最新のジェームズ・ ウェッブ宇宙望遠鏡を持ってしても個々に検出する ことは難しい。一方、宇宙背景放射 (Extragalactic Background Light: EBL) は膨大な数の矮小天体か らの放射を視線方向に積分したものであり、偏りな く観測することが可能であると考えられている上、 初期宇宙の天体形成を解明するための重要な観測量 である (図 1)。



図1 宇宙背景放射の概念図

1.2 VERTECS の科学目的

VERTECS ミッションの目的は、宇宙背景放射の 可視光での測定を通じて、天体形成史の解明を行う ことである。近年の近赤外から中間赤外に及ぶ EBL の観測 (Sano et al. 2020) によると、近赤外波長に おいて銀河の積算光より数倍明るい余剰成分が存 在することがわかっている。この余剰成分は銀河ハ ロー浮遊星 (IHL) や初期宇宙の天体 (初代星) から の寄与によるものと考えられている。これらのモデ ル天体は、可視光帯で異なるスペクトルを示すこと が予想される (図 2)。しかし、専用の観測機器を用 いた可視光での EBL 輝度測定の例は現在存在しな い。したがって、余剰成分の原因解明のためには可 視光波長で EBL 輝度スペクトルを測定し、過剰成 分が IHL によるものか初代星によるものかを区別 するための制約を行う必要がある。EBL の検出感度 は望遠鏡口径と視野角の積に依存するため、広視野 であれば CubeSat サイズの小型望遠鏡で観測が可 能である。そこで我々は 6U サイズ (約 10×20×30 cm)の CubeSat VERTECS を開発し、可視光波長 (400-800 nm) での EBL 観測を目指す。本衛星は観 測ターゲットに最適化された 3U サイズの望遠鏡と ともに、九州工業大学で開発された CubeSat システ ムを基とし、高精度の姿勢制御ユニットおよび展開 式太陽電池パネルを組み合わせたバスシステムで構 成されている。



図 2 近年の EBL 観測状況と予想されている EBL モデル

2 サクセス・クライテリアとシステム要求

2.1 サクセス・クライテリア

VERTECS の科学目標達成のためには、IHL と初 代星のスペクトルモデルを区別できる精度で EBL の 表面輝度 *I*_{EBL} を測定する必要がある。これを達成 するためには観測された空の明るさから前景光であ る黄道光 (ZL)、銀河系内拡散光 (DGL)、および積算 された星の光 (ISL) と差し引く必要がある。

$$I_{\rm EBL} = I_{\rm BlankSky} - I_{\rm ZL} - I_{\rm DGL} - I_{\rm ISL} \qquad (1)$$

ここで、 I_{BlankSky} 、 I_{ZL} 、 I_{DGL} 、および I_{ISL} はそ れぞれ空の明るさ、ZL、DGL、および ISL の光の強 度を示している。表 1 に VERTECS のサクセス・ク ライテリアを示す。

表1 サクセス・クライテリア

| クライテリア | 条件 | |
|--------|---------------------------------|--|
| | 従来の前景放射モデルの小さな修 | |
| ミニマム | 正により、統計誤差 $1\sigma < \pm 2.5$ | |
| サクセス | [nW/m ² /sr] を満たすような | |
| | EBL 輝度測定。 | |
| | 新しい前景放射モデルの構築によ | |
| フル | り、統計誤差 $1\sigma < \pm 1.0$ | |
| サクセス | [nW/m ² /sr] を満たすような | |
| | EBL 輝度測定。 | |

2.2 システム要求

図3はVERTECSの標準運用と観測シーケンスを 概念的に示したものである。衛星は昼間には太陽に 展開式太陽電池パネルを向け電力を生成し、夜間に 60秒の積分時間で観測する計画である。また、 $3k \times 3k$ ピクセルの検出器が $6^{\circ} \times 6^{\circ}$ の視野をカバーする ように設計されており、4 波長帯域の測光を実施する ために、4 つに分割されたフィルターが検出器の前に 設置されている。1 軌道の間に、 3° ずつ姿勢を変え ながら、1 つの $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ の4 色画像が得られる。さら に、この1 連の流れを4 回繰り返すことにより、1 つ の $9^{\circ} \times 9^{\circ}$ の4 色画像が得られ、これが1 セットと 定義される。



図3 VERTECS の標準運用と観測シーケンスの概念図

 I_{EBL} を求めるための各要素 ($I_{\text{BlankSky}}, I_{\text{DGL}}, I_{\text{ZL}}$) I_{ESL})にはサクセス・クライテリアを満たすために観 測フィールドおよび観測セット数が定められている。 表2は、ミッション要求から求められる観測フィー ルドの数を示している (() の中の数字はミニマムサ クセスを示す)。また、1 観測フィールドあたりの観 測セットの数について、IBlankSky の測定では、再現 性を保つため、1 観測フィールドにつき異なる太陽 および地球離角にて 10 セット観測する。IDGL の測 定では、信号対雑音比を向上させるために 1~4の 観測セットを要する。IZL の測定には、異なる季節 または太陽離角で 5~12 セットの観測が必要であ る。これらの条件を考慮し、必要な観測軌道の総数 を求めると、914 観測セット×4 軌道/セット=3656 軌道と計算される。したがって、必要な観測頻度は 3656 軌道/365 日=10 軌道/日である。データ生成率 は 10 軌道/日× 19.9MB/フレーム× 4 フレーム/軌 道=795MB/日と計算される。

3 衛星システムの概要

衛星システムは、ミッションを実行するための要 件を満たすように設計されている。図4に衛星の構 成を示し、表3に主要な仕様を示す。VERTECSは、 九州工業大学で開発された CubeSat の主要な構造お よび衛星バスシステムを基に改訂が加えられている。 バスシステムには、初期運用中の障害を対してより 耐性を持つように設計されたオンボードコンピュー

| 表 2 | サクセス | ・ク | ライ | ・テ | IJ | 7 | '達成に必要 | とな | る観 |
|-----|------|----|----|----|----|---|--------|----|----|
| 測画像 | 象数 | | | | | | | | |

| 測定対象 | フィールド | セット | 合計 | |
|--------------------|---------|-------------|-------|--|
| | 数 | 数 | セット数 | |
| $I_{\rm BlankSky}$ | 10(3) | 10 | 100 | |
| $I_{ m ISL}$ | 10(0) | 1 | 10 | |
| $I_{ m DGL}$ | 100(10) | 1~4 | > 190 | |
| $I_{\rm ZL}$ | 74(7) | $5 \sim 12$ | > 534 | |
| Contingency | | | 80 | |
| 合計 | 194(20) | | 914 | |

タ(OBC)と、新しい通信手法および姿勢決定制御 システム (ADCS) の追加を可能にする新しいバック プレーンボードが含まれている。また、新規に採用 した X 帯送信機は高速ミッションデータダウンリン ク、S 帯送受信機はハウスキーピングデータのダウン リンクおよびコマンドのアップリンクに使用される。 Sバンド運用には九州工業大学および ISAS の地上局 を使用し、X バンドミッションデータダウンリンクに は国内および商業アンテナを組み合わせて使用する 計画である。さらに、ミッションを実現するために必 要な高精度の指向を達成するため、VERTECS には Blue Canyon Technology の XACT ADCS システ ムが含まれているほか、電力生成のために、展開可能 な太陽電池パドル (DSAP) が電力システムの一部と して設計されており、DSAP は DHV Technologies によって製造されている。



図 4 VERTECS のシステム構成

また、VERTECS ミッションの科学目標達成のた め、カメラペイロードおよび望遠鏡の開発を行ってい る。暗電流からのノイズを低減するため、センサー は観測中に 0°C 未満に保たれ、ここから取り出され

| 項目 | 仕様 |
|-------|--|
| サイズ | $6U (100 \times 226.3 \times 340.5 \text{ mm})$ |
| 重量 | 8 kg |
| | 4 バンド(400-800 nm)望遠鏡、 |
| ミッション | 有効開口径:35 mm |
| ペイロード | 視野: 4.2°×4.2°、 |
| | 3k×3k CMOS センサー IMX533 |
| 指向安定性 | $10 \operatorname{arcsec} / 60 \operatorname{s}$ |
| 通信 | S帯:送受信(32 kbps/1 kbps)、 |
| | X 帯:送信(5 Mbps) |
| 発電 | 30.3 W |
| 電力貯蔵 | 74.5 Wh |
| 軌道 | 高度 500-680 km、太陽同期軌道 |

表 3 VERTECS の仕様

た熱は衛星パネルに設置された放熱板によって宇宙 空間に放射される。カメラモジュールへのコマンド 送信およびデータ受信はギガビットイーサネット接 続を介して行われ、モジュールへの電力供給も同じ 表面実装コネクタを介して行われる。IMX533 セン サーの 3k×3k ピクセルのサイズを考慮すると、各フ レームは 16 ビットのデータを生成し、VERTECS に よってキャプチャされた各フレームは 17.23 MB の データを生成する。

4 現在の状況

VERTECS は設計審査を終え、現在エンジニアリ ングモデルの開発中である。観測時期をより詳細に 検討するため、前景放射の正確な差し引きのための モデル研究が VERTECS の観測模擬画像を用いて行 われている。ペイロードは EM 品を納入し、結像性 能を確認している。サブシステムに関して、姿勢制 御ユニットは衛星本体とのインターフェースを調整 しており、カメラコントロールボードは送受信機と のデータ処理手法を調整している。また、本衛星の 発電能力が九州工業大学のこれまでの CubeSat に比 べ非常に大きいため、電源基盤の仕様の拡張に取り 組んでいる。

5 結論

本論文では、6U CubeSat ミッション VERTECS の科学的目標および衛星本体について述べた。近赤 外線 EBL において観測された過剰成分の起源を解明 するために、VERTECS は可視波長での多色観測に 特化しており、銀河ハロー浮遊星および初期宇宙の 天体のスペクトルモデルを区別することを目指して いる。そのためには、前景放射(ZL、DGL、ISL)を 差し引いた後でも正確に測定する必要がある。これ らの成分は VERTECS の観測データに基づいて測定 されるため、前景放射の正確な差し引きのためのモ デル研究が VERTECS の観測模擬画像を用いて行わ れている。衛星システムに関しては、大量のデータ (約 800GB/日)を地上局に送信することと、高精度 な指向安定性(10 秒角/60 秒)が VERTECS にとっ て独自かつ挑戦的な要件となっている。

Acknowledgement

謝辞がある場合は記入してください。

Reference

- Sano, K. et al. 2020, ApJ 901, 112
- Sano, K. et al. 2024, Space Telescopes and Instrumentation 2024: Oprical, Infrared, and Millimeter Wave, SPIE, Conference Series 13092, 13092-34

-index へ戻る

観測 c04

多層共役補償光学(MCAO)の現状と今後の展望

高橋 光明

多層共役補償光学 (MCAO)の現状と今後の展望

高橋 光明 (東北大学大学院 理学研究科)

Abstract

地上で観測できる可視光線・赤外線領域では大気ゆらぎによって大気の密度が一様ではなくなってしまうた め、光路長や屈折率も一様ではなくなってしまう。その結果、無限遠にある天体からの光は平面波で到達せ ずに歪んでしまい、地上から観測する天体像は必ずぼやけてしまう。大気揺らぎによってぼやけた天体像を リアルタイムで補正して、回折限界の天体像を観測するために、地上からの光・赤外線観測では補償光学を 用いて歪んだ波面を平面波に戻して観測を行う。しかし、従来の補償光学はガイド星と波面センサーと可変 形鏡を1つずつ用いた基本的なシステムであるため補正の精度や補正できる視野の広さに制限があった。そ のため、観測目的に応じた様々なコンセプトの補償光学が考案されてきた。特に従来の補償光学の視野の広 さを改善することを目的として考えられたのが広視野補償光学 (Wide Field Adaptive Optics; WFAO) であ る。WFAO の中でも多層共役補償光学 (Multi Conjugate Adaptive Optics; MCAO) は複数のガイド星に 加えて、複数の高度の大気ゆらぎにそれぞれ対応した可変形鏡を用いることで従来の補償光学の視野の広さ を改善した補償光学である。本講演では補償光学の原理を紹介した後に、WFAO の中の1つである MCAO の原理と性能、現状と今後の展望について述べる。

1 補償光学

1.1 原理

補償光学 (Adaptive Optics; AO) の基本構成要素 は、波面センサー (Wavefront Sensor; WFS)、波面 制御計算機 (Realtime Compute; RTC)、可変形鏡 (Deformable Miroor; DM) の主に三つである。



星の光の波面の乱れを WFS で測定することで、ガ イド星の光が通ってきた経路の大気揺らぎの情報を 得ることができる。光・赤外線領域では光の位相に 感度のある検出器がないため、CCD や CMOS のよ うな光を強度で観測する検出器を WFS として採用 して波面を評価する必要がある。代表的な WFS と DM の組み合わせは、WFS にシャックハルトマン 波面センサー (Shack-Hartmann Wavefront Sensor; SHWFS)、DM にフェースプレート鏡を使用したも のである。



図 1: 補償光学の構成原理

図の"Control System"が波面制御計算機に対応する。

観測天体は無限遠にある点光源と考えてよく、平 面波として到達するはずの光は大気揺らぎによって 位相 (波面) が乱れてしまう。そのため、波面を補正 するための明るい参照光源 (ガイド星)の光の波面 を WFS で計測している。大気揺らぎによるガイド 図 2: シャックハルトマン波面センサーの構成原理 (a) マイクロレンズアレイ (Micro Lens Array; MLA) で光を小分割して、CCD の各サブアパーチャに光を スポットとして結像する

(b) 平面波で到達した場合、各スポットは各サブア パーチャの重心に結像される

(c) 歪んだ波面で到達した場合、各スポットは各サブ アパーチャの重心からずれた位置に結像される フェースプレート鏡は電圧を加えると伸び縮みす る圧電素子 (ピエゾ素子)を使った積層ピエゾ素子を アクチュエータに利用している。



図 3: フェースプレート鏡の構成図

WFS で波面の乱れを計測した後、RTC で行列演 算を通して、波面の乱れを電圧に変換してアクチュ エータへのコマンドを求める。求めたコマンド (電圧 値) に対応して各アクチュエータが独立に動作して、 乱れた波面の形状と同じ形に DM(フェースプレート 鏡) の表面を変形して、反射する際に平面波に戻して 波面の補正ができるのである。ただし、大気揺らぎ は数百 Hz-数 kHz のタイムスケールで変動するため、 波面の計測から補正するまでの一連の演算を同程度 以上のタイムスケールでリアルタイムに行う必要が ある。

1.2 ガイド星

補償光学はどのような天体を観測する場合でも使 用できるわけではない。波面を補正するためには、波 面を測定するための明るい参照光源 (ガイド星) が必 要である。観測天体の近くに明るい点光源があれば、 その恒星をガイド星 (自然ガイド星、Natural Guide Star; NGS) として用いることができる。しかし、NGS が観測天体の近くにある場合は限られているため、波 面測定に NGS を利用した補償光学を使用して観測で きる天体は限られている。そのためレーザーを用い て任意の方向に人工的に作られたガイド星 (レーザー ガイド星、Laser Guide Star; LGS) が使われている。 LGS は地上 90km 付近にあるナトリウム層にナトリ ウム D2 線 (波長 589nm) のレーザー光を照射して励 起発光させるナトリウムレーザーガイド星と波長の 短いパルスレーザーを用いて地上 20km 付近の大気 の後方散乱光を利用するレイリーガイド星がある。



図 4: GeMS(ジェミニ望遠鏡に搭載されている MCAO)で使用される5個のレイリーガイド星

1.3 LGS の問題点

任意の方向にガイド星を作ることができる LGS で あるが、LGS をガイド星として使用する場合に生じ る問題点がいくつかある。ここでは問題点を二つ紹 介する。

一つ目は、コーン効果 (円錐効果) である。コーン 効果はガイド星の高度によって生じる問題である。 LGS は有限の高度に位置する光源であり、球面波と して望遠鏡の主鏡に到達する。そのため、LGS の光 の経路が円錐形となり、観測天体の光の経路と重な らない領域が多くなってしまう。その結果、補正で きない大気揺らぎが増えてしまい補正精度の低下に 繋がる。

二つ目は、Tip-tiltの不確定性である。Tip-tiltの 不確定性は参照光源としてLGSは大気の全体の傾 きの成分(Tip-tilt成分)を測定できない問題である。 LGSは地上からレーザーを用いて大気中に光源を作 るため、地上から大気中にレーザー光が上がる際に 大気から受ける屈折の影響と大気中から地上にレー ザー光が下る際に大気から受ける屈折の影響が相殺 してしまうからである。そのため、LGSを用いる場 合でも大気のTip-tilt成分を測定するNGS(Tip-tilt NGS; TT-NGS)が必要になってくる。

2 MCAO

2.1 背景

従来の基本的な補償光学システムである単層共役補 償光学 (Singul Conjugate Adaptive Optics; SCAO) は、ガイド星と波面センサーと可変形鏡を1つずつ 用いた基本的なシステムである。そのため、補正の 精度や補正できる視野の広さに制限があった。



図 5: H バンドでの各補償光学の性能。縦軸はスト レール比 (単位:%)、横軸は視野の広さ (単位:秒角)。 青色の点は NGS、オレンジ色の点は LGS をベース でガイド星に使用している。

これらの問題点で特に視野の広さを改善すること を目的として考えられたのが広視野補償光学 (Wide Field Adaptive Optics; WFAO) である。WFAO の 中でも多層共役補償光学 (Multi Conjugate Adaptive Optics; MCAO) は複数の層の大気揺らぎを補正する ことによって、SCAO の視野の広さを改善した補償 光学システムである。

2.2 原理

MCAO の基本構成要素は複数の LGS と WFS、補 正する大気揺らぎの数に対応した DM である。



図 6: MCAO の構成原理

LGS を 2 つ用いて、それぞれの LGS の経路の光の 波面の乱れをそれぞれの WFS で測定している Layer1 と DM2・Layer2 と DM1 が光学的に共役に なっており、それぞれの高度に対応した大気揺らぎ を補正する

複数のLGSで複数の方向の大気揺らぎをそれぞれ のWFSで測定する。DMを補正したい高度の大気 ゆらぎにそれぞれ対応させて、大気揺らぎを高さご とに分けて補正することで、比較的広い視野で一様 な補正が可能になる。



図 7: MAD(ESO が制作した MCAO の実証機) にお ける (a)SCAO と (b)MCAO のストレール比の比較 ストレール比の等高線は%で表示されている 白い三角形は NGS の位置を表している

そのため、太陽系惑星、球状星団、星形成領域、惑 星状星雲のような空間的に分解され、広がった天体 に対しての補正が可能となる。



図 8: Clear(太陽 AO) における SCAO と MCAO の 太陽撮像の比較

3 まとめと今後の展望

補償光学は波面センサー・波面制御計算機・可変形 鏡の3つの機器とガイド星から主に構成されており、 光・赤外線領域の地上望遠鏡における主要システム の一つである。各補償光学の中でも MCAO は複数 のガイド星に加え、補正する高度の数に応じた可変 形鏡を用いて高層の大気揺らぎも補正するため、視 野が比較的広く、視野全体を一様に補正できる。ま た、現在開発中の3つの超大型望遠鏡プロジェクトの うち、E-ELTの MAORY (Multi-conjugate Adaptive Optics Relay) と TMT の NFIRAOS (Narrow Field InfraRed Adaptive Optics System) の2つの MCAO が第一期の補償光学装置として搭載される予定であ る。

Reference

- Francois Rigaut and Benoit Neichel 2018, Annual Review, Multiconjugate Adaptive Optics for Astronomy
- Steffen Mauch and Johann Reger 2017, Real Time Adaptive Optic System Using FPGAs

Eugene hecht 2017, OPTICS FIFTH EDITION

家正則・岩室史英・舞原俊憲・水本好彦・吉田道利 2017, 宇宙の観測 I-光・赤外天文学 —index へ戻る

観測 c05

LTAO波面センサー系の調整と問題の報告

一ノ瀬 将也

LTAO 波面センサー系の調整と課題の報告

一ノ瀬 将也 (東北大学大学院 理学研究科)

Abstract

地上から天体観測を行う場合、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。光の波面の乱れ を補正し、高い解像度を得るための技術を補償光学(AO)という。従来の AO システムは、単一のレーザー ガイド星(LGS)を用いて波面の乱れを補正するが、コーン効果により補償精度が低下するという問題があ る。この問題の解決策の一つが、レーザートモグラフィー補償光学(LTAO)である。LTAO は複数のレー ザーガイド星 (LGS)を用いることで、LGSAO の欠点であるコーン効果を解決することができる。さらに、 トモグラフィーを用いてターゲット天体が受ける大気ゆらぎを高さ方向に分解して推定することができる。 すなわち、従来の AO システムでは大気ゆらぎの「層」を推定することしかできなかったが、大気揺らぎの 3次元の構造を推定することが可能となる。

現在、すばる望遠鏡では ULTIMATE-START という LTAO の開発プロジェクトが進行中であり、東北大学 ではその波面センサー系の開発を行っている。LTAO の実装により可視光領域でも補償光学が適用可能とな ることが期待される。これにより、高分解能の面分光を用いた局所宇宙に存在する低質量銀河の中心にある 超大質量ブラックホールの探査が可能になる。

本講演では、東北大学が開発した LTAO 波面センサー系の調整過程と現在生じている課題を報告する。

1 Laser Tomography Adaptive Optics: LTAO

LTAO は複数のレーザーガイド星 (LGS) を用いる ことで、LGSAO の欠点であるコーン効果を解決す ることができる。さらに、トモグラフィーを用いて ターゲット天体が受ける大気ゆらぎを高さ方向に分 解して推定することができる。LTAO は可視光、近 赤外線全ての波長域で FWHM が 0.05"程度であり、 これはすばる望遠鏡の回折限界に近い値である。特 に可視光領域では、従来の補償光学から大きな性能 の向上が見られる。



図 1: LTAO の予想される結果 (Koki Terao et al. 2022)

Tomography-WFS は LTAO を実装するために欠 かせない装置である。Tomography-WFS には 4 つの 波面センサーが搭載されており、各波面センサーは LTAO で用いられる 4 つの LGS 一つ一つに対応し ている。Tomography-WFS には、高さが時間ととも に変化する LGS に焦点を合わせるための「焦点調 整光学系」、ターゲット天体の高度角変化に伴う視 野の回転を波面センサー上で止めるための「Image Rotator(ImR)」、LGS の離角を直径 10"から 40"で 変化させるための「Pyramid mirror(Pyr)」などの光 学系が含まれている。Tomography-WFS は、LTAO の性能評価を目的とする「Truth-WFS」とともに、 すばる望遠鏡ナスミス焦点(赤外線)にある AO 装 置「AO188」の後ろに設置される。



図 2: Tomography-WFS の構成図 (Masayuki Akiyama et al. 2020)

LTAO 波面センサー系の調整の ゴール

Tomography-WFS を正常に作動させるためには、 波面センサーに入る 4 つの LGS 光源の光軸を、それ ぞれに対応する波面センサーの光軸に一致させる必 要がある。

このゴールを達成するために、3つのマイルストー ンを設定した。各マイルストーンは複数の工程で達 成される。ところで調整ではシミュレーション光学系 を使用する。これには全体の光軸を決める光軸レー ザーをはじめ、NGS 模擬光源や LGS 模擬光源等が 含まれている。

マイルストーン1.

シミュレーション光源の光軸(光軸レーザー)と Tomography-WFS の焦点調整光学系の光軸および ImR の回転軸、Pyr の頂点を一致させる。

工程 1. 焦点調整光学系の光軸と光軸レーザーを一致 させる

工程 2. ImR の回転軸と光軸レーザーを一致させる

工程 3. Pyr の頂点と光軸レーザーを一致させる

マイルストーン2.

光軸レーザー及び LGS 光源の中心光を用いて、波面 センサーに入射する光の光軸と波面センサーの光軸 を合わせる。

- 工程 1. Pyr の前後位置と Steering mirror の角度を 決定する
- 工程 2. 波面センサーに入射する光の光軸と波面セン サーの光軸が一致していることを確認する
- 工程 3. LGS 光源の中心の光を均等に 4 分割する

マイルストーン3.

各 LGS 光源の光軸をそれらに対応した波面センサーの光軸と一致するように入射させる。

- 工程 1. LGS の各高度・離角における ImR の角度 及び Pyr の前後位置をキャリブレーション する
- 工程 2. 4つの LGS 光源の光をそれぞれの LGS に対応した WFS にいれる

これらの調整により、Tomography-WFS の4つの 波面センサーがそれぞれ対応する LGS からの光を 適切に受光できるようになり、Tomography-WFS の 正常な動作が可能となる。

3 調整結果

マイルストーン1では、20µm 程度の精度で光軸 レーザーと Tomography-WFS の光軸を一致させた。 図 3 に示したように、すべての波面センサーで光軸 レーザーを確認できる。

マイルストーン2の最初のステップとして、各 Pyr の前後位置において、波面センサーの focusing lens を前後に動かしたときに波面センサー上でどのよう に光軸レーザーが移動するかを確認した。その結果、 特定の Pvr の前後位置ですべての波面センサー上で の光軸レーザーが移動しないということはなかった。 したがってここでは各波面センサーに対する最適な Pvr の位置の平均を求めた。Pvr の位置を平均値に 設定し、そこで光軸レーザーが波面センサーの中心 に映るよう Steering mirror の角度を調整した。この 状態で図2の○で囲われた部分に取り付けたター ゲットを用いて光軸の傾きを確認したところ、中心 から4mm 程度ずれていることが判明した。これを 可能な限り小さくするため、Pyr の設置角度や前後 位置を再度調整した。その結果ターゲットの中心か らのズレを 2 mm 程度に抑えることができた。この 状態で再度光軸レーザーが波面センサーの中心に映 るよう Steering mirror の角度を調整した。マイルス トーン2では最終的に図3のようにすべての波面セ ンサーに均等に光をいれることができた。

マイルストーン3では、LGS が各離角・高度のと きの focusing lens の位置と Pyr の位置を求めた。あ らゆる条件において、各波面センサーにそれに対応 する LGS の光が入っていることを確認し(図 5 参 照)、アライメントを完了とした。

4 課題および改善点

上記の調整の結果、課題および改善点が上がった。 課題は LGS 光源にケラレが生じてしまうことであ る。瞳の設定をすばる望遠鏡に合わせたときに波面 センサーで得られる画像は図 5 であり、ほとんどケ



図 3: マイルストーン1達成時の波面センサーの画 像。各波面センサーの中心に映る白い点が光軸レー ザーである。波面センサー3(右上)はこの時点で 他より暗くなっており、原因を調べる必要がある。



図 4: マイルストーン2達成時の波面センサーの画像。LGS 光源の中心の光が Pyr によって4分割され ているため、各波面センサーに映る光は扇形になっ ている。

ラレが生じていないように見える。しかし、図5と 図6を比較すると、瞳の設定をすばる望遠鏡に合わ せたときにケラレる可能性は十分にあることがわか る。したがってこのケラレの原因を見つけ、解消す る必要がある。ケラレの原因を探るため、ImRの前 であえて光を遮り、それによってどのようなケラレ が生じるかを調べた。その結果、ImRよりも前にケ ラレの原因がある場合、どの波面センサーでも同じ 位置にケラレが生じることがわかった。図6で生じ



図 5: マイルストーン3達成時の波面センサーの画 像。ケラレることなく4つの波面センサーにそれぞ れに対応する LGS の光をいれることができれば、調 整は完了である。



図 6: 瞳を最大限開いたときに波面センサーで得られ る画像。ケラレはすべての波面センサーに見られて おり、ケラレる位置は違うが、同じケラレ方をして いる。

ているケラレの位置は波面センサーごとに異なって いるため、ケラレの原因は Pyr 以降にあると考えら れる。

改善点として、再現性および正確性を高くする事 が挙げられる。調整の中には光を均等に4つに分け る工程や焦点を調べる工程がある。現時点ではこれ らを正確に決めるソフトウェアはなく、調整主の主 観で決まるところが少なからずある。したがって誰 が調整を行っても同様に高い精度を出せるようなシ

ステムを開発することが必要である。これと関連し て、調整の手順も改善する必要がある。今回の調整 は、事前に用意していた手順書に従って行った。し かし実際に調整を行うと、手順書通りに進まないポ イントも見つかった。特にマイルストーン2は、手 順書通りの工程だけでは達成することができず、新 たな工程を加える必要があった。その他新たに見つ かった課題を踏まえて、誰でも調整作業を行うこと ができるような手順書を作成することが求められる。

Reference

Koki Terao, Masayuki Akiyama, Yosuke Minowa, Yoshito Ono, Hajime Ogane, Takumi Akasawa, Shin Oya, and Tomoyasu Yamamuro, "ULTIMATE-START: Current status of the Subaru Tomography Adaptive optics Research experimenT"

Masayuki Akiyama, Yosuke Minowa, Yoshito Ono, Koki Terao, Hajime Ogane, Kaoru Oomoto, Yuta Iizuka, Shin Oya, Etsuko Mieda, and Tomoyasu Yamamuro, "ULTIMATE-START:Subaru Tomography Adaptive optics Research experimenT project overview" -index へ戻る

観測 c06

超伝導遷移端型X線検出器の物理機構の解明を目指した基礎研究

西山 智規

超伝導遷移端型 X 線検出器の物理機構の解明を目指した基礎研究

西山 智規 (立教大学大学院 理学研究科)

Abstract

現在の我々の宇宙では宇宙マイクロ波背景放射などの観測から宇宙を構成している約4%ほどがバリオンで あるが、未だにその半分しか発見されていない。発見されていないバリオンをダークバリオンという。この ダークバリオンは宇宙流体シミュレーションによって銀河団同士をフィラメント状に繋ぐ大規模構造に沿っ て 10⁵~10⁷ K 程度のガス (WHIM) となって分布していることが示唆されている。しかし現在の X 線検出 器では WHIM を観測するための十分なエネルギー分解能と視野を備えていない。この問題を解決する次世 代の検出器として超伝導遷移端 (TES) 型 X 線マイクロカロリメータがある。TES カロリメータは、素子の 温度上昇を超伝導から常伝導までの急激な抵抗変化を利用して精密に入射 X 線エネルギーの測定を可能とす る。本研究では、温度計 (TES) の形を様々な形に変えた時の電流電圧特性 (I-V 特性) や交流特性 (Z 特性) の評価を行うことで、TES カロリメータの構造の最適化を目的として研究を行った。解析の結果、TES 温 度計の形によってエネルギー分解能はさまざまで、温度計の転移温度を下げることで、エネルギー分解能が 良くなるという結果を得られた。本研究では、TES カロリメータの形状による性能差を詳細に調査した結果 を報告する。

1 はじめに

現在の我々の宇宙では宇宙マイクロ波背景放射な どの観測から宇宙を構成している約4%ほどがバリ オンであるが、未だにその半分しか発見されていな い。その見つかっていない半分は10⁵~10⁷Kほどの ガスであるWHIMとなって分布していると予想され ているが、図1からもわかるように現在のX線検出 器(CCD)が持つエネルギー分解能では銀河からの背 景放射とWHIMを分離することができない。そのた め、それらを解決するには次世代のより良いX線検 出器が必要である。その次世代のX線検出器として 挙げられているのが本研究で扱う超伝導遷移端型X 線マイクロカロリメータである。



図 1: 天の川銀河からの背景放射 (青色) と WHIM(橙 色) のスペクトルを CCD で観測した場合のシミュレー ション





図 2: X線マイクロカロリメータと抵抗変化の図

図2の左ははX線マイクロカロリメータの構造で ある。X線マイクロカロリメータは入射してきたX 線のエネルギーを吸収体で吸収し、吸収した時の素 子の温度変化を見る検出器である。温度計(TESと 呼ばれる)は熱リンクと繋がっており、その熱リンク は熱バスと繋がっている。上がった熱は熱リンクを通 して熱バスに流れる仕組みになっている。今回用い る超伝導遷移端型X線マイクロカロリメータは入っ てきたX線を図2の右のようにTESの超伝導から 常伝導の間の抵抗変化として検出する検出器である。 そのため、~100mKまで冷やして動作させる。 TESの読み出しには図3の SQUIDと呼ばれる磁束



図 3: SQUID(磁束計)

計を用いる。TES に流れる電流を磁束に変換してそ の磁束を SQUID を用いて電圧変化として測定する ものとなっている。この SQUID から得られた電流、 電圧からインピーダンスを計算し、TES の形ごとに どういう関係があるか、またないのか調べる。今回 調べた TES の形は 5 種類である。

3 実験方法

インピーダンスは交流において流れにくさを表す。 図 4 のように TES の回路系に交流を流し、TES の インピーダンスを測定する。その測定値を熱的方程 式と回路方程式から求められる TES のインピーダン スの理論式にフィッティングさせることで、エネル ギー分解能を求める上で必要なパラメータである吸 収体と TES の熱容量 C、温度依存性 α 、電流依存性 β 、吸収体と TES を繋ぐ熱伝導度 $G_{abs,tes}$ を求める ことができる。図 5 は本研究で扱った 5 種類の TES の形である。



図 4: TES の回路系をテブナンの等価回路で表した 場合



図 5: 本研究で性能比較を行なった TES の光学顕微 鏡写真 (金色:TES、水色:超伝導配線、青色:メン ブレン、緑色:シリコン基盤)。メンブレンのサイズ は縦横 200*um* でどれも同じである。

4 TES の交流特性

TES のインピーダンスは SQUID を通して得られ た電圧から、計算をして求める。最終的に TES のイ ンピーダンスは以下の式で与えられ、計算される。

$$Z_{TES} = \frac{Z_{obs}}{T(f)} - (R_{th} + i\omega L) \tag{1}$$

 $Z_{obs} = Vth/I_{TES}$ で与えられ、入力電圧 V_{th} と TES に流れる電流 I_{TES} で計算される。T(f) は回路系の 中で寄生インダクタンス、アンプなどの周波数依存 性を持つものをまとめたものである。この式で得ら れるインピーダンスは図 6 になる。



図 6: A5 のインピーダンスの結果

図6は、左から TES の実部のインピーダンスと虚 部のインピーダンスの図、実部のインピーダンスの 周波数特性の図、虚部のインピーダンスの周波数特 性の図になる。

このインピーダンスの測定結果と理論的な式より、 フィッティングを行い、TES のそれぞれの形につい て、熱容量 *C*、温度依存性 α、電流依存性 β等のパラ メータを計算する。今回、吸収体と TES の熱伝導度 が良いとみなせる場合の図 7 で表される One block model でパラメータを導出した。

図4から求められる回路方程式と、図7から求め られる熱方程式から理論的なインピーダンスの式を 求めると以下で与えられる。



⊠ 7: One block model

$$Z_{TES} = R_0(1+\beta) + R_0(2+\beta) \left(\frac{\mathcal{L}}{\mathcal{L}-1}\right) \left(\frac{1}{-1+i\omega\tau_I}\right)$$
(2)

フィッティングで求められるパラメータを、エネ ルギー分解能の式 $\Delta E = 2.35 \sqrt{\frac{4k_b T^2 C}{\alpha}} \sqrt{\frac{n}{2}(1+2\beta)}$ に代入することでエネルギー分解能を出すことがで きる。



5 結果と考察

図 8: 横軸 TES の抵抗、縦軸エネルギー分解能の図 図 8.9 にエネルギー分解能の動作点依存性と温度 依存性の解析結果を載せる。

図8は横軸に TES の抵抗値、縦軸にエネルギー分解 能を TES の形ごとにとった図である。どの TES の 形も抵抗が大きくなるにつれてエネルギー分解能も 大きくなることがわかる。また、エネルギー分解能 の目標値は 2eV 以下だがそれに達しているものはな かった。

下図は形ごとに最小のエネルギー分解能を代表値 として、横軸に転移温度、縦軸にエネルギー分解能 をとった図である。



図 9: 横軸 TES の転移温度、縦軸最小エネルギー分 解能の図

図 9 から、TES の転移温度を下げるとエネルギー 分解能が良くなる可能性があることがわかる。つま り、転移温度を下げれれば、目標値のエネルギー分 解能 2eV を達成できるかもしれない。

6 まとめと今後の展望

超伝導遷移端型 X 線マイクロカロリメータの物理 機構の解明のために5 種類の形を変えた TES 温度計 の基礎測定とその解析を行なった。その結果、エネ ルギー分解能は TES の形によって良い悪いが顕著に 現れ、目標値を超えるエネルギー分解能を出した形 はなかった。しかし、転移温度が下がればエネルギー 分解能を小さくでき、目標値を達成できる可能性が あることが考察できた。今後は違うモデルを使って 同じようにパラメータを計算し、比較していきたい。

Acknowledgement

本実験のデータは、宇宙科学研究所の山崎典子研 究室の八木雄大、田中圭太、立教大助教の林佑らに よって得られたデータを使用しています。また、本 研究の進行にあたり、指導教官として多大なご指導 をいただきました立教大学の山田真也教授と林佑助 教授に深く感謝いたします。

Reference

- Luciano Gottardi & Kenichiro Nagayashi , A Review of X-ray Microcalorimeters Based on Superconducting Transition Edge Sensors for Astrophysics and Particle Physics.
- .J. Maasilta , Complex impedance, responsivity and noise of transition-edge sensors: Analytical solutions for two-and three-block thermal models.
- K.Nagayoshi et al., Lateral Inverse proximity Effect in Ti/Au Transiton Edge Sensors.
- Ralph Kraft et al., A mission concept for the NASA 2023 Astrophysics Probes AO

——index へ戻る

観測 c07

PDD構造を導入したX線天文衛星搭載用SOIピクセル 検出器のサブピクセルレベルのX線応答特性の評価

志賀 文哉

PDD構造を導入したX線天文衛星搭載用SOIピクセル検出器の サブピクセルレベルのX線応答特性の評価

志賀 文哉 (東京理科大学大学院 創域理工学研究科)

Abstract

我々は、2030 年代の打ち上げを目指す X 線天文衛星へ搭載する予定の X 線 SOI ピクセル検出器 XRPIX の 開発を進めている。XRPIX は X 線が到来したピクセルのみを読み出すことができ、これにより 10 μs の時 間分解能を実現している。従来構造の XRPIX では、ピクセル内で電荷収集効率のばらつきが問題点となっ ていた。そのため新しい構造の XRPIX を開発し、従来構造の XRPIX と比較すると、電荷収集効率は格段 に向上した。表面からピクセル中心に X 線を照射した時のエネルギー分解能は X 線 CCD に匹敵したが、ピ クセル境界や裏面照射ではエネルギー分解能の低下とピーク位置のシフトが見られた。ピークシフトの原因 として考えられるデータ解析時に数え落とす電荷の影響やキャリアのドリフト時間を見積もり、ピクセル境 界の深い領域に電荷損失が生じやすい領域があることを示した。

1 Introduction

近年の研究から、銀河中心にはブラックホール(BH) が存在していることがわかった。そのため、銀河の進 化を知るには、未発見の BH の発見が必要となる。し かし、ガスや塵に埋もれていた BH は従来の衛星では 観測することができない。よって、広帯域かつ高感度 の撮像分光が可能な X 線天文衛星が必要となる。現 在、2030 年代の打ち上げを目指して次世代の X 線天 文衛星「JEDI」の検討が進められている。JEDI 衛星



図 1: JEDI 衛星のイメージ図

には、高角度分解能(15秒角)をを実現するスーパー ミラーと広帯域(0.5-79keV)観測を担うハイブリッ ド検出器が搭載される予定である。このうち、ハイブ リッド検出器は、0.5-20 keV を Si 検出器、20-79 keV を CdTe 検出器を用いて検出される。我々は Si 検出 器として搭載する予定の X 線 SOI ピクセル検出器 XRPIX の開発に取り組んでいる。XRPIX は、セン サー層と CMOS 回路層が一体型となった検出器であ り、X 線が到来したピクセルのみ読み出す方法によ り 1010 µs の時間分解能を達成している。従来構造 の XRPIX では、絶縁層内部に Si 層を入れることで 回路層とセンサー層の電気的干渉を抑制した構造と なっていたが、サブピクセル (1 ピクセルよりも細か い領域) 応答を見ると、ピクセル内部での検出感度 のばらつきやピクセル境界で入射 X 線のエネルギー を低く見積もという問題が見られた。これは、セン サー層と絶縁層 (Si/SiO₂) 界面での電荷損失の発生 が原因であるとわかったため、新たなピクセル構造 にする必要があった。



図 2: 従来構造 (Double SOI) の XRPIX の断面図

2 Methods/Instruments and Observations

新しいピクセル構造として、Si/SiO₂ 界面埋め込み p層(BPW)とn層(BNW)を形成した PDD(Pinned Depleted Diode)構造を導入した。BPW は高濃度に



図 3: 従来構造の各領域でのスペクトル

し、固定電位層とした。これによりセンサー層と回 路層の電気的干渉が抑制と電荷収集効率の向上が見 込まれた。PDD 構造でのサブピクセル応答を調査す



図 4: PDD 構造の XRPIX8.5 の断面図

るために、放射光施設にて、ピンホールを用いて X 線の径をピクセルサイズの 1/9 に絞って、1 ピクセ ル内の細かい領域に照射して測定を行った。

3 Results

サブピクセル応答調査の結果として、従来構造より も、相対検出効率は格段に向上していた。また、ピク セル中心に表面から X 線を照射した時のエネルギー スペクトルでは、エネルギー分解能が X 線 CCD に 匹敵した。ただ、裏面照射やピクセル境界では、エ ネルギー分解能は低下し、ピークが低エネルギー側 にシフトしていた。

4 Discussion

裏面照射やピクセル境界で見られたピークシフト の原因として次の2つが挙げられる。

複数ピクセルに拡散したキャリアをデータ解析
 時に数え落とす。



図 5: XRPIX8.5 に 6 keV 単色 X 線を照射したとき の各領域でのスペクトル



図 6: ピークシフトの割合

2. ドリフト中に電荷を損失してしまう。

まず、複数ピクセルに拡散したキャリアをデータ解 析時に数え落とす影響について、数え落とした電荷 量を見積もったところ、この影響だけではピークシ フトを説明できないことがわかった。次に、ドリフ ト中に電荷を損失してしまう影響について、表面照 射 (FI) と裏面照射 (BI) で異なるのはドリフト距離 であるため、TCAD sim. を用いて差分をドリフトす る時間を計算したところピクセル境界とピクセル中 心でドリフト時間に大きな違いは見られず、この影 響もピークシフトを説明するには不十分であること がわかった。

5 Conclusion

- 1. PDD 構造の XRPIX のサブピクセル応答を調査 した。
- 2. 従来素子に比べて、1ピクセル内の相対検出効率

のばらつきは 6 keV 裏面照射において σ = 1.3% になり、ピクセル境界でのピークシフトは従来 構造の最大約 75%から 1%(表面照射)、7%(裏面 照射) に抑えることができた。

- ピクセル中心の表面照射でのエネルギー分解能 は 160 eV@6 keV となり、局所的には X 線 CCD に匹敵することを確認した。
- 裏面照射やピクセル境界ではエネルギー分解能の低下やピークシフトが見られ、データ解析時に電荷を数え落とす影響や電荷のドリフト時間を計算したところ、ピクセル境界の深い領域に 電荷損失が生じやすい領域があることを示した。

Reference

- [1] 土居俊輝 2022, 東京理科大学, 修士論文
- [2] 佳山一帆 2020, 京都大学, 修士論文
- [3] 大野顕司 2019, 東京理科大学, 修士論文

--index へ戻る

観測 c08

広視野X線集光系の開発と性能評価

平井 健登

広視野X線集光系の開発と性能評価

平井 健登 (青山学院大学大学院 理工学研究科)

Abstract

全天 X 線監視装置 MAXI は、連続的に全天を観測することが可能であり、超新星や GRB などの突発的な 天体現象に対して有効な観測方法を提供する。一方で重力波イベントの際に重力波源の早期 X 線放射の観測 を可能とするには MAXI の検出感度では不十分であると考えられる。そこで、暗い可能性がある重力波源の 早期 X 線放射の全天モニタによる検出を可能とするため、MAXI のような走査型全天モニタのための 1 次 元集光系を開発する。本研究では、焦点距離 1500mm の Wolter I 型光学系を円錐近似した形にミラーを配 置する設計を用いる。先行研究において、レプリカ法とシリコンウェハによるミラーを製作し JAXA 宇宙科 学研究所の 30m X 線ビームラインでの集光実験を行なった際、集光像の広がりを確認した。原因と考えら れるハウジングの歪みを改善するため、本研究では加工精度を向上したハウジングとアライメントプレート を組み合わせた新しい 集光系テストモデルを作製、シリコンウエハを用いた X 線ミラーを挿入し、30m X 線ビームラインを用いた X 線集光実験を行った。

1 研究背景

MAXI は国際宇宙ステーション (ISS) に搭載され ている全天 X 線監視装置であり、1 次元位置検出器 と直交したスリットを用いた帯状の観測領域を持ち、 この観測領域を ISS の周回軌道によって走査すること で全天の 90%を 1 周回の 92 分で連続的に観測する。 MAXI のような全天モニタは宇宙の全体像を知る上 で重要な知見をもたらす。本研究では MAXI のよう な観測手法を用いて検出感度を向上させることを目 標としているが、検出感度の向上が必要が必要であっ た一例として、重力波イベントである GW170817 を 挙げる。

GW170817 の発生時、MAXI は高バックグラウン ド帯に侵入していたため電源を落としていた。その ため、発生から4時間40分後に重力波源電磁波対応 天体を視野に含む観測を行なったが、有意なX線イ ベントは検出されなかった。また、仮に発生時から 観測できていたとしてもMAXIの検出感度では検出 できていなかった可能性がある。

2 走査型全天モニタ用集光系

突発的に発生し、従来よりも暗いと考えられる重 力波源電磁波対応天体の早期 X 線放射の観測のため には、全天モニタとしての広い視野はそのままに受 光量を増やす必要がある。そこで、全天モニタ用の 集光系として平面平板ミラーを用いた1次元方向に 特化した集光系の開発を検討する。

作製するテストモデルは図1のようなイメージで 集光する。X線は屈折率が1より僅かに小さく屈折 系での集光が難しい。そのため本研究では、このよ うにスリットを取り付けたピクセル型検出器の上部 に平面平板ミラーを配置し、X線を2回全反射させ る集光系を検討する。MAXIは1次元方向に伸びた 観測領域をISSの軌道によって走査することで全天 のイメージを取得している。そのため、図2のよう な1次元方向の集光系のみで1周回における総視野 を減らすことなく受光量を増やすことが可能である。 加えて、一般に検出感度の向上のため検出器の有効 面積を大きくする必要がある2次元の観測装置と比 較し、1次元方向に特化した集光系は開発が容易に なるというメリットが挙げられる。

本研究では平面平板ミラーを収めるハウジングを 制作し、それを用いた集光系テストモデルを開発、X 線と可視光による性能評価を行った。



図 1: 集光方法のイメージ



図 2: 集光系のイメージ

3 広視野X線集光系モデル

本研究では、ハウジングとアライメントプレート を用いて X 線ミラーを配置したものを広視野 X 線集 光系テストモデルとした。

3.1 ハウジング

X線ミラーを配置・保護する筐体をハウジングと呼称する。また、ハウジングに挿入しミラーを差し込むことで位置を直接決定する板状のパーツをアライメントプレートとそれぞれ呼称する。先行研究において、ハウジングの制作過程で生じた数値不明の誤差が最も X線反射像に影響を及ぼしたと結論づけられたため、本研究ではハウジングを再設計し、金属加工法を改めることで高精度化したものを製作した。



図 3: ハウジングの概形

3.2 アライメントプレート

アライメントプレートは以下の近似値計算によっ てモデル設計を行い製作されたものを用いた。実用 上は隙間なくミラーをネスティングすることで検出 感度が向上するが、性能評価の代表点として光軸か らの距離 R が 50mm と 100mm の地点にミラーを配 置する。集光系モデルは次に示す3つの要件をクリ アする Wolter I 型円錐近似である。

- On-axis の X 線が1段階目のミラー中心に入射 角 θ で反射 (反射角は軸に対して 2θ)
- 2.2段階目ミラー中心に再度入射角 θ で反射 (入射 角は軸に対して 3θ、反射角は軸に対して 4θ)
- 3. 焦点面に 4*θ* で入射

また、本来 Wolter I 型ミラーとは回転放物面鏡と 回転双極面鏡を組み合わせたものであり製作が困難 であるが、本研究では1次元の集光が目的のため、1 次元に円錐近似し平面ミラーを用いる。そのため、図 4 (B) に示すように1段階目の開口分 (hm×sinθ) 反 射像が広がる。以降、1段階目ミラーを Primary ミ ラー、2段階目ミラーを Secondary ミラーと呼称す る。また、実際に作成する際のパラメータは今回の 収録では省略する。

hm:モデルにおいて、ミラーの高さ

 $\theta: X$ 線入射角



3.3 性能目標

本テストモデルでは、装置単体での観測に限らず、 全天観測による速報によってその他衛星の追観測を 行う想定をしている。また、Wolter I 型の円錐近似 による誤差が存在することと追観測を行う地上望遠 鏡の視野が 10[arcmin] 程度であることから、本テス トモデルの目標性能として、HPW=5[arcmin] とい う値を設定する。

4 X線撮像実験

製作した広視野 X 線集光系テストモデルの性能評価を行うため、JAXA 宇宙科学研究所の 30m X 線ビームラインによる X 線撮像実験を行った。本測定では R=50 に 3 層、R=100 に 2 層ネストさせた。用意したシリコンミラーの枚数が 10 枚のため、このように配置した。



図 5: ミラーの配置

4.1 撮像結果

得られたデータを FITS 形式に変換し、イベント データとして扱えるように加工する。撮像イメージ 画像はこれらをソフトを用いてグラフィカルに可視 化したものである。以下に具体的な手順を示す。

- X 線イベントを RAWX 方向に足し合わせ RAWY 軸のヒストグラムを作り、その累計度 数の 25% - 75%の領域にある、全イベントに対 する 50%の pixel 値を求める。
- pixel 値から mm 幅に変換し、HPW[mm] を求 める。(2048pixel/20mm)
- 3. f を焦点距離として、 $\theta = 2 \arctan(\frac{\text{HPW}}{2\text{f}})$ より mm を arcmin に変換する。
- また、以下に示す撮像結果の図は左上から、
- A. X 線イベントの画像
- **B.** 画像を Y 軸方向に足し合わせた X 軸 1 次元ヒス トグラム
- C. ヒストグラムの規格化した累積度数分布
- **D.** X 線イベントの波高値 (Pulse Height Array:PHA) スペクトル

とした。本集録では、R=50 と R=100 でそれぞれ目 標値に最も近づいた測定結果をのせる。

R=50mm (2), HPW=2.69[arcmin]



図 6: R=50mm X 線 2 回反射像 (2)

R=100mm (2), HPW=3.76[arcmin]





4.2 性能評価·考察

R=50mm と R=100mm の両者において、ハウジ ングの光軸に中心を合わせた検出器の中央に反射像 が現れていることから、ほとんど設計値通りの位置に 集光されたことが確認できる。厳密には最大で 2mm 程度中心から離れているが、実際の観測装置におい てこのこの程度のズレであれば X 線は検出器に入社 するものと考えられるため、ここでは大きな課題と はしていない。

表 1,2 が R=50,100 それぞれの各地点における HPW である。

| No. | $\mathrm{HPW}[\mathrm{mm}]$ | HPW[arcmin] |
|-----|-----------------------------|-------------|
| (1) | 1.17 | 2.69 |
| (2) | 1.17 | 2.69 |
| (3) | 1.48 | 3.40 |
| (4) | 2.19 | 5.01 |
| (5) | 1.95 | 4.48 |

表 1: 各地点における HPW (R=50)

| No. | $\mathrm{HPW}[\mathrm{mm}]$ | HPW[arcmin] |
|-----|-----------------------------|-------------|
| (1) | 1.56 | 3.58 |
| (2) | 1.64 | 3.76 |
| (3) | 1.80 | 4.12 |
| (4) | 1.88 | 4.30 |
| (5) | 1.80 | 4.12 |

表 2: 各地点における HPW (R=100)

また理論値は R=50 で 1.98[arcmin]、R=100 で 3.85[arcmin] であるため、R=50mm では約 1.72 倍、 R=100mm では約 1.07 倍の広がりで結像に成功して いる。このことから、本研究で作製した集光系テス トモデルと同程度以上の加工精度とミラー性能を満 たしていれば、性能目標とした 5[arcmin] を達成でき ると言える。理論値との差が R=50mm と 100mm で 大きく異なることについては、ミラーのネスティン グ数が R=50mm では 3 層、R=100mm では 2 層で あることに起因していると考えられる。これは、各 層における 2 回反射像の位置がずれている場合、そ の総数が多いほど像が広がりやすくなるためである。

5 まとめと今後

今回は精度と剛性を高めるために、設計と加工方 法を見直してハウジングを作成し、そのハウジングで 集光系テストモデルを完成させ X 線撮像実験を行っ た。その際、目標値である HPW=5[arcmin] を測定 した 10 点のうち 9 点で達成した。今後の展望として は、主に二つのことを行いたいと考えている。一つ はミラーの形状測定である。この測定結果を考察す ることで、より詳細な反射像への影響が解明できる と考えられる。もう一つはミラーのネスティング数 を増やした X 線撮像である。先行研究より、本研究 と同設計の集光系において、X 線ミラーを 100 枚ネ ストさせることで、検出感度を 1 桁向上させること が可能であると結論が出ている。ネスティング数を 増やした X 線撮像を行い、シミュレーション値と比 較する。 -index へ戻る

観測c10

X線分光撮像衛星XRISM搭載軟X線撮像装置Xtendの 軟X線撮像検出器SXIにおけるフレームデータとノイ ズ性能の評価

伊藤 耶馬斗

X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載軟 X 線撮像装置 Xtend の 軟 X 線撮像検出器 SXI におけるフレームデータとノイズ性能の評価

伊藤 耶馬斗 (近畿大学大学院 総合理工学研究科)

Abstract

我々は、2023 年 9 月 7 日に打ち上げられた X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載軟 X 線撮像装置 Xtend の軟 X 線撮像検出器 SXI を開発してきた。SXI は裏面照射型の X 線 CCD 4 枚で構成されており、200 μm の厚 い空乏層を作ることで 0.4–13 keV の広エネルギー帯域を観測可能である。CCD を-110 度まで冷却し、ノ イズの発生を抑えることで高いエネルギー分解能を実現している。我々は SXI のノイズ性能評価のため、非 冷却時に取得したフレームデータの暗電流やオフセットなどを含んだペデスタル信号の、中心値および幅を、打ち上げ前に行われる様々な地上試験において都度測定し、その長期トレンドを調査した。その結果、地上 試験のデータでは、ペデスタルは常にほぼ一定であった。軌道上環境を模擬して衛星搭載機器の動作を確認 する衛星熱真空試験では、ペデスタル中心値と幅がそれまでのトレンド値から変動していたが、これは CCD 温度などの環境温度の違いで説明できた。特に、ペデスタル中心値と環境温度には負の相関関係があった。さらに、打ち上げ後に軌道上で取得したフレームデータにおけるペデスタル中心値と幅は地上試験と同等で あり、ノイズ性能は打ち上げ前から変動していないことを確認した。CCD が冷却状態のフレームデータの ペデスタルも地上試験と軌道上とで同程度の値だった。これらの解析結果の詳細を報告する。

1 X線分光撮像衛星 XRISM

X 線分光撮像衛星 XRISM (Tashiro et al. 2020) は、はくちょう、てんま、ぎんが、あすか、すざく、 ひとみに次ぐ、7番目の X 線天文衛星であり、2023 年 9 月 7 日に種子島宇宙センターから打ち上げられ た。 XRISM 衛星は X 線マイクロカロリメーター 「Resolve」(Ishisaki et al. 2022)と軟 X 線撮像装置 「Xtend」 (Mori et al. 2022)の2つの機器を搭載し ている。

Xtend は X 線望遠鏡である X-Ray Mirror Assembly (XMA) と軟 X 線撮像検出器 Soft X-Ray Imager (SXI) の 2 つの機器からなり、0.4–13 keV のエネル ギー帯域を 38 分平方の視野で観測する。SXI では 4 つの Charge Coupled Device (CCD) を 2×2 の格 子状に配置している。CCD 素子には、浜松ホトニク スが開発した P チャンネルの裏面照射型を採用して いる。

本研究では、SXI が地上試験および軌道上で取得 したフレームデータに基づいてノイズ性能を評価し、 SXI の健全性の確認を行なった。2章では SXI の電 荷転送と出力データの概要を説明したのち、3章で 実際の結果を示し、4章で結論を述べる。

2 SXIの電荷転送・出力データ

2.1 SXI の電荷読み出し方式

SXI の CCD はフレームトランスファー方式であ り、撮像領域と蓄積領域を持つ。1 つの素子につき読 み出し口は4つ (A、B、C、D)存在し、そのうち2 つの読み出し口 (A または B と、C または D)から データを読み出す。A または B から読み出される領 域をセグメント AB、C または D から読み出される 領域をセグメント CD と呼ぶ。SXI では常に2つの 読み出し口を用い、残りの2つは冗長構造になって いる。転送方向と読み出し口が同じである場合を順 転送、逆の場合を逆転送と呼ぶ。読み出された電荷 は後段の処理により信号値に変換され出力される。

2.2 ペデスタル

CCD のピクセルは、X 線光子が入射していない 場合でも、あらかじめ与えているオフセット電圧お よび暗電流に由来する信号値を出力する。これをペ デスタルという。図1は冷却時に実際に取得した信 号値のヒストグラムである。450 ch 付近のピークが
ペデスタルで、ガウス分布をしている。この中心値 と幅の変動は、検出器の健全性やノイズ性能の評価 指標になるため重要である。



図 1: 冷却時に取得した信号値のヒストグラムであ る。横軸が信号値、縦軸がカウント数である。450 ch 付近のピークがペデスタルである。

2.3 フレームデータ

SXI では CCD カメラ内の各ピクセルで蓄えられ た電荷が転送され、出力される信号値と転送回数に よる位置の情報から2次元画像として読み出される。 2次元画像として読み出されたものをフレームデータ と呼ぶ。本集録ではフレームデータ中のX線が入射 していないピクセルの信号値をペデスタルとして解 析した。図2はSXIの実際のフレームデータである。



図 2: SXI のフレームデータ。画像下部のカラーバー の単位は ch である。

3 地上試験および軌道上における ペデスタルの調査

我々は地上試験および軌道上で取得したフレーム データのペデスタルを測定し、異常な値を示してい ないかを確認することで CCD の健全性を調査した。 地上試験では基本的に、非冷却で逆転送のデータを 取得し、試験によっては冷却した状態で順転送のデー タも取得した。表1は、解析に使用したデータを取 得した試験および軌道上のデータの試験環境と取得 日時の一覧である。

解析では、まず 1 フレームごとに、ペデスタルの 平均値 (以降 PHAave) と標準偏差 (以降 stdDev) を 計算した。その上で、一定期間中に取得したフレー ムの PHAave と stdDev の時間平均を計算し、その 値を当該期間での代表点として、トレンドチャート を作成した。PHAave と stdDev には、CCD の健全 性を確認するための規格値を設定しており、それぞ れ PHAave は各代表値がトレンドから ±30 ch 以内 にあること、stdDev は各代表値がトレンドの平均か ら ±1.5 ch 以内にあることと定めた。

表 1: 地上試験および軌道上のデータの試験環境と 取得日時の一覧

| 試験名 | CCD 温度 | 気圧 | 転送方向 | 実験日 |
|---------------|--------|-----|------|-------------------------|
| フライトモデル冷却試験 | 非冷却 | 大気下 | 逆転送 | 2021.09.8 |
| フライトモデル冷却試験 | 冷却 | 真空下 | 順転送 | 2021.09.10,13 |
| SXI 単体熱真空試験 | 非冷却 | 大気下 | 逆転送 | 2021.10.17,26 |
| Xtend 総合試験 | 非冷却 | 大気下 | 逆転送 | 2022.05.20 |
| FNC-D | 非冷却 | 大気下 | 逆転送 | 2022.06.12 |
| 熱真空試験前 FNC-N | 非冷却 | 大気下 | 逆転送 | 2022.07.27, 08.5, 9, 28 |
| 衛星熱真空試験 | 冷却 | 真空下 | 順転送 | 2022.08.7,9,14,16,18,28 |
| 熱真空試験後 FNC-N | 非冷却 | 大気下 | 逆転送 | 2022.09.1 |
| 機械環境試験前 FNC-N | 非冷却 | 大気下 | 逆転送 | 2022.11.25 |
| 機械環境試験後 FNC-N | 非冷却 | 大気下 | 逆転送 | 2023.01.3 |
| 軌道上 | 非冷却 | 真空下 | 逆転送 | 2023.10.18 |
| 軌道上 | 冷却 | 真空下 | 順転送 | 2023.10.21 |

3.1 トレンドチャート

図3は冷却時、非冷却時に取得したフレームデータ から算出した PHAave と stdDev の代表値をそれぞ れデータ取得期間ごとにプロットしたトレンドチャー トである。非冷却逆転送のトレンドチャートにおける 青点は衛星熱真空試験、緑点は軌道上のデータを表 している。冷却時に取得した PHAave と stdDev は、 地上試験から軌道上に至るまで大きな変動は生じて いない。一方で非冷却時は軌道上において、PHAave 3.2
と stdDev はともに規格値から逸脱している。この
ような規格値からの逸脱は衛星熱真空試験でも発生
している。



図 3: PHAaveと stdDev のトレンドチャート。横軸が データを取得した日付、縦軸に PHAave または std-Dev である。図は上から順に冷却順転送の PHAave、 冷却順転送の stdDev、非冷却逆転送の PHAave、非 冷却逆転送の stdDev の順にプロットしている。

3.2 軌道上非冷却・逆転送時のペデスタル 信号と CCD 温度の相関関係

PHAave と stdDev の逸脱は冷却時には起きてお らず非冷却時にのみ起きていることから、逸脱の原因 は環境温度にあると考えた。非冷却時の PHAave と stdDev について、 CCD 温度との相関を表したもの をそれぞれ図4、5 に示す。赤点は地上試験、青点は衛 星熱真空試験、緑点は軌道上のデータを表している。 衛星熱真空でも軌道上でも、非冷却逆転送の PHAave と stdDev は CCD 温度との相関があり、地上試験 と軌道上のデータは概ね同じ相関関係にのることが 分かった。したがって、 PHAave と stdDev の逸脱 は、CCD 温度の変化で説明できる。特に、 PHAave と CCD 温度には負の相関関係があった。



図 4: 上図は非冷却時の PHAave と CCD 温度のト レンドチャート。横軸がデータを取得した日付、縦 軸左が PHAave、縦軸右が CCD 温度である。下図 は非冷却時の PHAave と CCD 温度の相関図。横軸 が CCD 温度、縦軸が PHAave である。



図 5: 上図は非冷却時の stdDev と CCD 温度のト レンドチャート。横軸が日付、縦軸左が stdDev、縦 軸右が CCD 温度である。下図は非冷却時の stdDev と CCD 温度の相関図。横軸が CCD 温度、縦軸が stdDev である。

4 結論

軌道上で取得したフレームデータを用いて、ペデ スタルの PHAave と stdDev を測定し、CCD の健 全性を検証した。逆転送のデータでは、地上試験での ペデスタルの値は基本的に安定していたが、衛星熱 真空試験と軌道上で取得したデータでは、PHAave、 stdDev ともに規格値から逸脱していた。しかし、こ れは CCD 温度などの環境温度の違いで説明できた。 特に、PHAave と環境温度には負の相関関係があり、 地上試験と軌道上のデータは同じ相関関係にしたがっ ていた。冷却状態の順転送のフレームデータのペデ スタルも、地上試験と軌道上で同程度の値であるこ とがわかった。このことから、軌道上の SXI のノイ ズ性能は、打ち上げ前から変化していないことを確 認した。

Reference

- M. Tashiro et al. Status of x-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM), 2020, Proc. SPIE, 11444, 1144422.
- Y. Ishisaki et al. Status of resolve instrument onboard x-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM), 2022, Proc. SPIE 12181, 121811S.
- K. Mori et al. Xtend, the soft x-ray imaging telescope for the X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM), 2022, Proc. SPIE 12181, 121811T.

--index へ戻る

観測c11

XRISM 衛星搭載極低温検出器の地上・軌道上データ を用いたX線イベント処理最適化

望月 雄友

XRISM 衛星搭載極低温検出器の 地上・軌道上データを用いた X 線イベント処理最適化

Yuto Mochizuki (東京大, JAXA/ISAS), Masahiro Tsujimoto (JAXA/ISAS), Caroline A. Kilbourne (NASA/GFSC), Megan E. Eckart (LLNL), Yoshitaka Ishisaki (都立大), Yoshiaki Kanemaru (JAXA/ISAS), Maurice A. Leutenegger (NASA/GFSC), Misaki Mizumoto (福岡教育大), Frederick S. Porter (NASA/GFSC), Kosuke Sato (埼玉大), Makoto Sawada (立教大), Shinya Yamada (立教大), on behalf of the XRISM *Resolve* team

Abstract

XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) 衛星は、2023 年 9 月 6 日に種子島宇宙センターから打ち上げられ、地球低軌道周回に投入された。XRISM に搭載される *Resolve* 装置は、X 線マイクロカロ リーメーター検出器を搭載し、幅広いエネルギー範囲 (0.3–12 keV)、高いエネルギー分解能 (\leq 7 eV; 6 keV での FWHM)、高検出効率での非分散 X 線分光を達成し、画期的な観測成果を多数上げることが期待されて いる。同年 10 月 9 日より観測を開始し、立ち上げ運用が完了して、現在、定常運用で科学観測を実施中で ある。多くの検証項目で期待通りの性能を確認できている。本研究では、先行する X 線マイクロカロリメー タミッション、特に ASTRO-H 衛星に搭載された SXS 装置に基づき、地上および軌道上のデータセットを 使用して *Resolve* のイベントスクリーニング— (1) イベントのパルス形状、(2) 複数のイベント間の相対 到着時間、(3)時間間隔に基づく 3 種類 19 個の項目の最適化および評価を行った。その結果、性能検証期間に適用される初期スクリーニングで、バックグラウンドレートが $1.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ と要求を満たす ことを確認した。さらに、X 線イベントのいくつかのパルス形状特性間の相関を利用した追加スクリーニング グを評価した。特に 2keV 以下の帯域でバックグラウンド率をさらに低減し、0.3–12keV 全体でのバックグ ラウンドで $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1}$ を達成した。

1 Introduction

XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) (Tashiro et al. 2020) は、2023 年 9 月 6 日 (UT) に H-IIA ロケットによって JAXA の種子島宇 宙センターから打ち上げられ、31 度の傾斜角を持つ 近地球軌道に投入された。科学機器の一つである *Resolve* (Ishisaki et al. 2022) は、高いエネルギー分解能 (\leq 7 eV; 6 keV での FWHM)、高い検出効率、非分 散分光、および広いエネルギー範囲 (0.3–12keV) の分 光観測を可能とする X 線マイクロカロリメータを搭 載している。実際に ~4.5 eV のエネルギー分解能を 軌道上で達成している。*Resolve* は、ASTRO-E 衛星 に搭載された XRS (Poter et al. 2004)、ASTRO-E2 衛星に搭載された XRS2 (Kelley et al. 2007)、およ び ASTRO-H 衛星に搭載された SXS (Kelley et al. 2016) などのヘリテージに基づき、JAXA、NASA、 SRON、およびジュネーブ大学の国際協力の下で開 発された。

Resolve は、バックグラウンドが低い点において も優れている。バックグラウンドレートの要求値は 0.3–12 keV で < 2 × 10⁻³ s⁻¹ keV⁻¹ である。こ のような低いバッググラウンドは、Resolve とほぼ 同じ設計を持つ SXS の軌道上で実際に達成されて いる (Kilbourne et al. 2018a)。この達成のために は、ハードウェアとソフトウェアの組み合わせが必 要であった。ハードウェアについては、反同時検出 器 (Kilbourne et al. 2018b) が宇宙線によるバック グラウンドイベントを除去するために有効であり、 ソフトウェアについては、X 線イベントをバックグ ラウンドイベントから識別するイベントスクリーニ ングが開発された。このイベントスクリーニングは、 スクリーニングなしの場合のバックグラウンドレー トを7.3%にまで低減することに成功している。この 低いバックグラウンドを達成することによって、超 新星残骸 N132D から到来したわずか 17 個の X 線 イベントから新しい科学的発見がなされた (Hitomi collaboration $2014)_{\circ}$

本研究の目的は、軌道上および地上データセット を用いて、Resolve のイベントスクリーニングを開 発し、性能を実装することである。3種類19個の項 目の個別スクリーニングの最適化については、望月 (2024) もしくは Mochizuki et al. (2024) を参照さ れたい。2章で使用したデータセットの導入、3章で 性能検証フェーズにおけるデータプロダクトに使用 される初期スクリーニングの性能が要求を満たすこ とを示す。4章では、信号対雑音比をさらに向上さ せ、Resolveの性能を拡張するための追加スクリーニ ングについて議論する。最後に5章でまとめる。

$\mathbf{2}$ Dataset

イベントスクリーニング評価のために使用可能な Resolve のデータセットは、SXS に比べて、軌道上 および地上の両方で豊富に存在する。軌道上データ については、SXS が打ち上げ後34日後に衛星の姿勢 制御喪失で失われたため、衛星が地球遮蔽されたと きのバックグラウンドデータは 366 ks の積分時間で あった (Kilbourne et al. 2018a)。一方で、Resolve は 2023 年 10 月 9 日から 50 mK 制御下で運用されて おり、すでに数倍の長い軌道上の観測時間が蓄積さ れている (表 1)。また、地上においては、SXS は較 正試験に1週間未満しか費やしていないが、Resolve はほぼ2か月を費やした。そのため、単色の X 線照 射や、ゲートバルブ(GV)を開いた 0.1-25 keV の X 線照射実験などの多様なデータセットが取得され た。ここで、GV とは打ち上げ前にクライオスタッ トを真空に保つための X 線透過窓付きの開口ドアで あり、約 1.7 keV 以上の X 線を透過する (Midooka et al. 2021).

3 Initial event screening

イプライン処理で適用されるイベントスクリーニン

グである。初期スクリーニングには、いくつかの個 別スクリーニング項目を組み合わせて使用する。こ こでは、表1のNon-X-ray Background (NXB) デー タを用いて初期スクリーニングの性能を評価する。

使用した NXB データは、衛星が地球に遮蔽され た時間を用い、南大西洋異常帯の通過時間帯、断熱 消磁冷凍機の再磁化の時間帯、較正 X 線線源の照射 の時間帯を除去している。その結果、2023年10月 11日から 2024年1月4日までの合計で 650ks の積 分時間が得られた。

初期スクリーニングを実行する前を青色、実行し た後をオレンジ色とした、NXBのエネルギースペク トルを図1に示す。初期スクリーニングを実行する ことによって、0.3-12 keV 帯域のカウントレートが 1.8×10⁻³ s⁻¹ keV⁻¹ となることを確認した。した がって、初期スクリーニングは、バッググラウンド の要求値である <2.0×10⁻³ s⁻¹ keV⁻¹ を満たすに 十分であると結論づける。



図 1: イベントスクリーニング前 (青)、初期スクリー ニング後(オレンジ)、追加スクリーニング後(緑) の NXB スペクトル。科学データに用いるイベント を(Hp および Mp グレード)を使用している。

Additional event screening 4

3章により、パイプライン処理における初期のスク リーニングは、バッググラウンド要求値を十分に満 たすものであることが示された。しかし、SXS と同 様に、追加のイベントスクリーニングを Resolve にお いても開発することができれば、信号対雑音比を向 上させるとともに、微弱な信号源に対する観測性能 を向上させることが可能である。X 線マイクロカロ リメータには、検出した信号波形を軌道上で処理を 初期スクリーニングとは、性能検証フェーズのパ 行い、波形の特徴量を地上にダウンリンクする。そ こで、得られた特徴量同士が互いに相関しているこ

| 表 1: | イベン | トス: | クリ | ーニン | グ評価の | ために用い | いた軌道 | 上と地 | 上のデー | ・タセッ | ኑ。 |
|------|-----|-----|----|-----|------|-------|------|-----|------|------|----|
|------|-----|-----|----|-----|------|-------|------|-----|------|------|----|

| Label | Start time | Stop time | Exposure (ks) | |
|--------------|------------------|------------------|---------------|--|
| GVO | 2022/03/04 01:30 | 2022/03/09 23:00 | 403 | |
| Abell 2319 | 2023/10/14 07:25 | 2023/10/23 20:30 | 193 | |
| IMC V 9 | 2023/11/16 12:05 | 2023/11/17 13:50 | 204 | |
| LIMO A-9 | 2023/11/30 08:04 | 2023/12/03 06:23 | 204 | |
| NXB | 2023/10/11 23:13 | 2023/10/31 19:50 | 650 | |
| | 2023/10/31 19:50 | 2024/01/04 15:07 | 030 | |

とを利用し、追加イベントスクリーニングの開発を存し、ピクセル依存性があり得る。そこで、Resolve 行った。

図2は、ブラックホール連星 LMC X-3 の軌道 データを使用して、パルス波形の立ち上がり時間 (RISE_TIME) と微分した波形の最大値 (DERIV_MAX)の 関係を示している。エネルギーが大きい (DERIV_MAX が大きい)ほど X 線吸収体が迅速に熱化される (RISE_TIME が小さい)。そこで微分波形の最大値と パルス波形の立ち上がり時間との間に相関が生じる ことを利用し、衛星から地上にダウンリンクされた 数少ない X 線パルスの波形を目で確認しながら、青 色で示したスクリーニング条件を設定した。



図 2: RISE_TIME と DERIV_MAX の分布。初期スクリー ニング後のイベントは灰色の点、さらに熱的なバッ ググラウンドイベントを除いたイベントを黒点で示 している。青の線で囲った主系列から外れた分布は 主にバックグラウンドイベントである。

加スクリーニングは、バックグラウンドをさらに低 減する一方で、偽陽性による信号の損失も考慮しなけ ればならない。さらに、天体のカウントレートに依 ベントが帯域内への混入することによるものと解釈

の多様なデータセット(表1)を活かし、その評価を 実行した。これには、GV が開いた状態での地上 X 線照射データ (GVO)、ピクセル全体に広がって観測 された銀河団 Abell 2319、明るい点源として観測さ れたブラックホール連星 LMC X-3、そして初期スク リーニング評価にも用いた NXB データを使用した。 GVO データは、X線イベントが全帯域(0.1-25 keV) を支配していると仮定する。また、GV が閉じてい る Abell 2319 および LMC X-3 の観測データでは科 学バンド(1.7-12 keV)をX線イベントが支配する 一方で、1.7 keV 未満はバッググラウンドイベントが 支配している。また、NXB データの全エネルギー帯 域ではバックグラウンドイベントが支配していると 仮定する。



図 3: 追加スクリーニング前後の X 線イベントカウ ントレート比。

図3は、X線イベントが支配するエネルギーバンド における追加スクリーニング前後のカウントレート つぎに、追加スクリーニングの性能評価を行う。追の比を示している。この比は、スクリーニングによる 削減率を示す。信号が支配するバンドでのカウント レート比の低下は、偽陽性またはバックグラウンドイ



図 4: 追加スクリーニング前後のバッググラウンドカ ウントレート比。

できる。最も低いカウントレートである Abell 2319 のデータセットでは、イベントの削減率(0.94)が 他の二つのセットよりも大きい。これは、バックグ ラウンドイベントが無視できないためである。した がって、追加スクリーニングによる偽陽性による X 線イベントの損失は、6%未満であると結論づける。

図4は、バックグラウンドイベントが支配するエ ネルギーバンドにおけるスクリーニング前後のカウ ントレートの比を示している。Abell 2319 と NXB では、1.7 keV 未満での追加スクリーニングによる削 減率は約95%である。本データセットの中で最も高 い X 線カウントレートである LMC X-3 データセッ トは、他の2つのデータセットよりも削減率が低い。 これは、>1.7 keV での信号が支配するバンドから <1.7 keV でのバックグラウンドが支配するバンド への再分布が原因であると考えられる (Tsujimoto et al. 2018b)。この再分布されたイベントは乗算的な性 質を持ち、信号情報を表している。したがって、バッ クグラウンドとして削除するのではなく、応答関数 としてモデル化されるべきでものである。

追加のスクリーニングを施した結果得られた NXB スペクトルを図1の緑色に示す。追加イベントスク リーニングを実行することにより、0.3–12 keV の帯 域におけるカウントレートが、1.0×10⁻³ counts s⁻¹ keV⁻¹まで低下した。これは、要求基準を2倍下回っ ている。特に、~2 keV 以下での追加スクリーニング が効果的であり、このエネルギー領域は軌道上で GV が開放されると利用可能となる。

5 Conclusion

軌道上および地上のデータセットを使用して、*Re-solve*のイベントスクリーニングの開発と評価を行った。パイプライン処理による初期スクリーニングにより、0.3–12.0 keVのエネルギー範囲でのバックグラウンドカウントレートが要件を満たす 1.8 × 10⁻³ s⁻¹ keV⁻¹ であることを確認した。また、X 線パルスの特徴量に基づく追加のスクリーニングにより、偽陽性による X 線イベントの損失を 6%未満に抑えつつ、特に \leq 2 keV 帯でバックグラウンドがさらに減少し、0.3–12 keV で 1.0 × 10⁻³ s⁻¹ keV⁻¹のバックグラウンドカウントレートまで低減した。

Acknowledgement

この研究は JSPS Core-to-Core プログラム(助成 番号: JPJSCCA20220002)の支援を受けた。また、 NASA/GSFC の Astrophysics Science Division が提 供する High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (HEASARC) のデータとソフトウ ェアを使用した。さらに、JST SPRING (助成番号: JPMJSP2108) および 2023 年度の岩垂奨学会の奨学 金によっても本研究は支援された。

Reference

Tashiro et al. 2020, SPIE Ishisaki et al. 2022, SPIE Poter et al. 2004, RSI Kelley et al. 2007, PASJ Kelley et al. 2016, SPIE Kilbourne et al. 2018a, PASJ Kilbourne et al. 2018b, PASJ Tsujimoto et al. 2017, JATIS Hitomi collaboration 2014, PASJ 望月雄友 2024, 東京大学修士論文 Mochizuki et al. 2024, SPIE Midooka et al. 2021, JATIS Tsujimoto et al. 2018b, PASJ -index へ戻る

観測c12

狭視野Si/CdTe半導体コンプトン望遠鏡による気球実験の試作機miniSGDの開発と現状

大熊 佳吾

狭視野 Si/CdTe 半導体コンプトン望遠鏡による気球実験の試作機 miniSGD の開発と現状

大熊 佳吾 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

sub-MeV・MeV 帯域は、粒子加速や元素合成といった宇宙の高エネルギー現象を理解する上で重要な帯 域であるが、X 線や GeV、TeV 帯域と比べ感度が数桁低く、その観測は遅れている。2027 年には NASA の MeV ガンマ線観測衛星 COSI が打ち上がりその感度を1桁向上させるが、さらなる改善が必要である。

我々は、MeV ガンマ線観測の感度向上を目指し、2016 年打上げの「ひとみ」衛星搭載の軟ガンマ線検出 器 SGD でも採用された狭視野 Si/CdTe 半導体コンプトン望遠鏡の気球実証実験機 miniSGD を開発した。 miniSGD は、有効検出面積 $32 \times 32 \text{ mm}^2$ で 0.5 mm 厚の Si 両面ストリップ検出器 (DSSD)2 枚と、同じく $32 \times 32 \text{ mm}^2$ で 2 mm 厚の CdTe 両面ストリップ検出器 (CdTe-DSD)4 枚からなる半導体コンプトン望遠鏡 と、厚さ 20-30 mm の 9 個の BGO シンチレータからなるアクティブシールドで構成される。2023 年にオー ストラリアで予定していた気球実験はキャンセルされたが、次の放球機会を目指し改良を続けている。

これまでに、気球搭載に向けた開発と地上での性能試験を行ってきておりその累計動作時間は 2000 時間を超 える。データ解析では、両面の電極の信号差を用いた CdTe-DSD での相互作用深さ (Depth Of Interaction: DOI)の推定方法を開発し、356 keV ガンマ線に対して 3.0°と Si/CdTe コンプトン望遠鏡としては世界最 高レベルの角分解能を得た。現在は、DOI 推定精度の向上と高エネルギー帯域への適用、10 分角レベルの角 分解能の実現に向けた符号化マスクとの組み合わせイメージング (観測機器 a02, 西村講演) にも挑戦し、さ らなる角分解能向上を目指している。

1 Introduction

sub-MeV・MeV帯域は、粒子加速や元素合成といっ た宇宙の高エネルギー現象を理解する上で重要な帯 域であるが、X線や GeV、TeV帯域と比べ感度が数 桁低く、その観測は遅れている。図1は、keV から TeV帯域の観測衛星の観測感度を示す。この図より、 100 keV-10 MeV の感度は他の帯域と比べて最大で 6 桁程度低くなっており、「感度のギャップ」と呼ば れる。2027年には NASA の MeV ガンマ線観測衛星 COSI の打ち上げが予定されており、その観測感度を 1桁向上させるが、さらなる改善が必要である。

MeV 帯域のガンマ線の有効な観測手法に狭視野 Si/CdTe 半導体コンプトン望遠鏡がある。これは、 図 2 に示されるような、Si/CdTe 半導体コンプトン カメラとそれを囲む BGO アクティブシールドで構 成される。このコンセプトは、2016 年打上げの「ひ とみ」衛星搭載の軟ガンマ線検出器 SGD でも採用 され、5000 s という短い観測時間でカニ星雲の偏光 観測に成功した (Hitomi Collaboration et al. 2018)。



図 1: keV から TeV 帯域の観測衛星の感度 (Takahashi et al. 2012)。赤の波線はカニ星雲の 1/1000 の フラックスを表す。

入射ガンマ線は上層の Si 検出器でコンプトン散乱さ れ、散乱光子を下層の CdTe 検出器で光電吸収する。 この時、コンプトン散乱の式より、入射ガンマ線の エネルギー E_{in} と散乱角 θ は以下のように表される。

$$E_{\rm in} = E_{\rm Si} + E_{\rm CdTe} \tag{1}$$



図 2: 狭視野 Si/CdTe 半導体コンプトン望遠鏡の概 念図

$$\cos\theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_{\rm CdTe}} + \frac{m_e c^2}{E_{\rm Si} + E_{\rm CdTe}}$$
(2)

ここで、*E*_{Si} と *E*_{CdTe} は、それぞれ Si 検出器と CdTe 検出器での検出エネルギーを表す。このように、コ ンプトン望遠鏡では入射ガンマ線の到来方向は円錐 として得られ、これをコンプトンコーンと呼ぶ。1つ のガンマ線イベントではその到来方向は特定できな いが、複数のコンプトンコーンを重ねることで天体 の位置を得ることができる。また、アクティブシー ルドで視野を狭めることで荷電粒子や視野外からの バックグラウンドイベント、Si、CdTe 検出器で止め きれなかったガンマ線イベントを除去できる。

コンプトン望遠鏡の角分解能の評価には、式2から求まる散乱角 θ と、検出器での反応位置と天体の 位置から幾何的に求まる散乱角 θ_G の差 $\theta - \theta_G$ で定 義される Angular Resolution Measure (ARM)が用 いられる。これは、検出器のエネルギー分解能と位 置分解能、そして、量子力学的な不定性(ドップラー ブロードニング)によって決まる。

2 miniSGD

我々は、MeV ガンマ線観測の感度向上を目指し、 狭視野 Si/CdTe コンプトン望遠鏡の気球実証実験機 miniSGD を開発した (Nakazawa et al. 2022)。図 3 に miniSGD の外観と断面図を、図 4 に搭載されて いる検出器を示す。主検出器である Si/CdTe 半導体 望遠鏡は、受光面積 32×32 mm² で 0.5 mm 厚、0.25 mm ピッチの DSSD 2 枚と、同じく 32×32 mm² で 2 mm 厚、0.25 mm ピッチの CdTe-DSD 4 枚からな り、視野方向が陰極、その反対側が陽極となるように 配置した。BGO アクティブシールドは、厚さ 20-30 mmのBGOシンチレータと光センサ MPPCを組み 合わせたユニット9個で構成され、半導体検出器の 視野外を囲っている。他に、検出器のDAQ 回路や HV モジュール、電源やスイッチ回路、miniSGD 全 体を制御する Raspberry Piを搭載し、これらは高さ 331 mm、直径 314 mm の耐圧容器に収められる。



図 3: miniSGD の外観(左)と断面図(右)



図 4: DSSD (左上)、CdTe-DSD (右上)、BGO ア クティブシールド(下)

これまでに、気球実験に向けて、電池のみの動作 試験や Raspberry Pi を用いたコマンド・テレメトリ と検出器の遠隔制御システムの開発を行い、-20°Cの 熱真空試験と JAXA 気球チームの通信システムを用 いてのコマンド・テレメトリと検出器制御の試験を 完了し、miniSGD はフライト可能な状態となった。 我々は、2023 年にオーストラリアにて気球実験を予 定していたが、やむを得ない事情により実験はキャ ンセルとなった。

3 コンプトン望遠鏡の性能評価

3.1 実験セットアップ

miniSGD のコンプトン望遠鏡としての性能評価の ため、-20°C の低温下で放射線源の照射実験を行っ た。図5に、実験セットアップの概略図を示す。線源 は⁵⁷Coと¹³³Baを使用し、DSSD から約1.6 m 離れ た場所に設置した。DSSD には 200 V、CdTe-DSD には 500 V のバイアス電圧を印加した。



3.2 DOI sensing

コンプトン望遠鏡の角分解能の向上において、検 出器内でのガンマ線相互作用位置の決定精度が重要 な鍵の1つである。特に、我々の用いる CdTe-DSD は2mm 厚と半導体検出器としては比較的厚いため、 相互作用深さ (DOI) の位置の不定性が大きく影響す る。そこで我々は、CdTe-DSD の両面の電極で得ら れた信号の差からモデルを用いずに測定データから 深さの再構成を行う、簡便な DOI sensing 手法を開 発した (Okuma et al. 2023)。

図6は、¹³³Ba 照射時に CdTe-DSD の両面の電極 で得られた電子とホールの信号のスペクトルを示す。 ¹³³Ba 崩壊時の輝線がいくつか見られるが、電子と 比べてホールのスペクトルは大きな tail 構造を持っ ており、エネルギーが高くなるほどより大きな tail 構造となっている。これは、CdTe 半導体のホールの 移動度の低さに起因しており、陰極から離れた位置 で相互作用した場合にホールの一部が電極まで辿り つかないことでこのような構造となる。特に高エネ ルギーのガンマ線は、検出機の深い場所で相互作用 する割合が増えるため、より大きな tail 構造になる。 図7(上)は、¹³³Ba 照射時の CdTe-DSD の電子と ホールの信号の相関を示す。この図を見ると、¹³³Ba の輝線が湾曲し2本に分かれているが、これは陽極 側で検出したストリップの数によって曲がり具合が 異なることがわかっている。また、 $E_{e^-} = E_{h^+}$ より 左に伸びた構造が確認できる。これは、図6のホー ルのスペクトルで見られた tail 構造であり、DOI を 反映している。我々は、Minami et al.(2024) を参考 に、輝線の曲がった構造と分岐した構造を補正し、横 軸を $(E_{h^+} - E_{e^-}/2)$ 、縦軸を湾曲と分岐を修正した エネルギー E_{reconst} とし、図7(下)のように再構成 した。この図の左に伸びた構造の右端と左端を、そ れぞれ深さが0mmと2mmと定義し、DOIの再構 成関数を作成した。



図 6: CdTe-DSD で得られた ¹³³Ba のスペクトル





3.3 コンプトンイメージと角分解能

前節の DOI sensing で得られた CdTe-DSD での相 互作用深さの情報を用いてコンプトン再構成を行っ た。図8に、¹³³Baの356 keV ガンマ線に対するコン プトンイメージと ARM を示す。コンプトンイメー ジの中心付近が明るくなっており、¹³³Baを捉えられ ていることがわかる。角分解能を ARM の FWHM で定義すると、miniSGDの356 keV に対する角分解 能は 3.0° であった。この値は、Si/CdTe 半導体コン プトン望遠鏡としては世界最高レベルである。また、 DOI sensing を行わず、相互作用深さを 1 mm で固 定した場合の角分解能 5.9° と比べると約 2 倍の向上 であり、DOI sensing の必要性が示された。



図 8: ¹³³Baの 356 keV に対するコンプトンイメージ (上) と ARM(下)

4 Conclusion

我々は、MeV ガンマ線の観測感度向上のため、狭 視野 Si/CdTe コンプトン望遠鏡の気球実証実験機 miniSGD を開発した。コンプトン望遠鏡としての性 能試験では、-20°C に冷却し、¹³³Ba 放射線源を照射 した。データ解析において、CdTe-DSD における両 面の電極の信号差を用いた DOI の推定方法を新たに 開発しコンプトン再構成を行なったところ、356 keV ガンマ線に対して 3.0°と Si/CdTe コンプトン望遠 鏡としては世界最高レベルの角分解能を得た。今後 は、より高エネルギーの 0.5-2 MeV 帯域への DOI sensing を用いたコンプトン再構成と、10 分角レベ ルの角分解能の実現に向けた符号化マスクとの組み 合わせイメージングに取り組んでいく。

Reference

- T. Takahashi, Y. Uchiyama & L. Stawarz, "Multiwavelength Astronomy and CTA: X-rays", Astroparticle Physics, 43, 142, 2012
- Hitomi Collaboration et al., "Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector", PASJ, Vol.70(6), 113(1–19), 2018
- K. Nakazawa, K. Okuma, Y. Tsuji, S. Takeda, M. Ando, Y. Omiya, M. Oguchi, A. Tanaka, S. Watanabe, T. Takahashi, M. Onishi, T. Arai, M. Kobayashi & N. Ishida, "Balloon-borne narrow field of view semiconductor Compton telescope concept: miniSGD", Proc. SPIE, Volume 12181, id. 1218172 14 pp. (2022)., 2022
- T. Minami, M. Katsuragawa, S. Nagasawa, S. Takeda, S. Watanabe, Y. Tsuzuki & T. Takahashi, "2-mmthick large-area CdTe double-sided strip detectors for high-resolution spectroscopic imaging of X-ray and gamma-ray with depth-of-interaction sensing", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1059, 169024, 2024
- K. Okuma, K. Nakazawa, S. Takeda, M. Ando, Y. Omiya, M. Oguchi, A. Tanaka, Y. Tsuji, S. Watanabe, T. Takahashi, M.Kobayashi, N.Ishida, T.Minami, M.Onishi, and T.Arai, "Development of miniSGD, a proof-of-concept balloon experiment for a narrow field of view Si/CdTe semiconductor Compton telescope," PoS ICRC2023, 899 (2023).

-index へ戻る

観測c13

重力波検出器KAGRAにおける防振懸架装置の制御

玉木 諒秀

重力波検出器KAGRAにおける防振懸架装置の制御

玉木 諒秀 (東京大学大学院 理学研究科)

Abstract

地上の重力波検出器では、高感度を達成するために鏡を地面振動から十分防振する必要がある。そこで鏡 は多段振り子型の防振懸架装置で吊るされているが、共振周波数で鏡が大きく揺れてしまうためダンピング 制御を行う。これにより、共振周波数における懸架装置の振動を抑えることができる一方、制御ループに混入 するセンサ雑音が問題になることがある。実際、2023 年 5 月 25 日から行われた重力波の国際共同観測では 10 - 60 Hz の低周波帯において局所制御系由来の雑音が検出器の感度を制限するという問題が報告された。 この低周波帯は、たとえば質量の大きなブラックホール連星合体からの重力波に対する感度向上にとって 重要であるため、制御雑音の低減が求められる。そこで KAGRA の懸架装置を対象に、振動モードに基づく 最適な制御をシミュレーション上で設計し、鏡に伝わる雑音を低減できることを確かめた。

1 Introduction

1.1 KAGRA の防振懸架装置



☑ 1: KAGRA Optical layout



図 2: KAGRA の防振懸架装置 [1]

KAGRA はレーザー干渉計型重力波検出器であり、 その干渉計は図1のように多数の鏡で構成される。ま た、それぞれの鏡は防振性能の要求に応じて異なる 種類の懸架装置で吊られている(図2)。

1.2 防振

1.2.1 受動防振

地上の重力波検出器の鏡(テストマス)は地面振動 による外乱の影響を常に受けるため、防振技術が必要 不可欠である。たとえば 10^3 m スケールの基線長を 持つ KAGRA の場合、 10^{-21} のオーダーの重力波ひ ずみを検出するためには、テストマスの変位レベルは 少なくとも 10^{-18} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 以下でなくてはならない。 一方、地面振動雑音は 10 Hz において 10^{-11} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 程度であるから、テストマスに伝わるこの雑音を 10^7 程度減衰する必要がある。そこで、テストマスを多 段振り子として吊り下げることで受動的に地面振動 の影響を低減する(受動防振)。

たとえば図 3 のような N 段の多段バネ-質量系に よってモデル化すると、支配方程式は

$$-\omega^2 \boldsymbol{M} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \boldsymbol{K} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 x \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$
(1)

である。ただし、M と K はそれぞれ質量行列、 剛性行列であり、またここでは $\ddot{x}_i = -\omega^2 x_i$ (i = 1,2,…,N) とした。よって、各段における防振比 は $(-\omega^2 M + K)^{-1}$ を計算すれば良いが、M は各段 の質量からなる対角行列であるから、 $-\omega^2 M + K$ の 行列式は 2N 次の多項式になることはすぐに分かる。 よって、N 段の多段バネ-質量系の最終段(懸架装置 におけるテストマス)での減衰は $1/\omega^{2N}$ となる。例 として $N = 1 \sim 4$ の場合、支点に対する最終段の防 振比を図示すると図 4 のようになる。段数を増やす と共振以上の周波数での受動防振性能が向上するの が分かる。



図 3: 多段バネ-質量系



図 4: 多段バネ-質量系による防振性能

1.2.2 能動防振

多段振り子式の懸架装置では共振周波数において 地面振動雑音が増幅され、テストマスが過剰に動い てしまう。これは光学系のミスアライメントを引き 起こし、最終的には干渉計をロックできなくなるた め、懸架装置の共振を抑制する必要がある。このよ うな防振は、センサやアクチュエータなどを用いた 能動的な制御システムによって達成される(能動防 振)。具体的には、マスの変位をセンサで局所的に検 出してその信号を制御器に送り、生成した駆動信号 (マスの速度に比例)をアクチュエータでマスに返す フィードバック制御を施す(図5)。このような局所 的な制御を以下ではダンピング制御と呼ぶ。



図 5: ダンピング制御の概略図

2 Motivation



図 6: ダンピング制御雑音と設計感度

一般に、フィードバック制御系ではセンサの雑音 が制御器を介してシステムにフィードバックされる (制御雑音)。制御雑音の内、特に前回の観測(2023 年5月25日-2023年6月21日)における振り子の ダンピング制御を図6に示す。これよりダンピング 制御を改良しなければ、低周波数帯において設計感 度である128 Mpcを達成することができないと分か る。しかし低周波帯は、たとえば質量の大きなブラッ クホール連星合体からの重力波に対する感度向上に とって重要であるため、ダンピング制御における制 御器を最適なものにすることを考える。なお、ここ での最適とは干渉計ロックのための振動減衰に関す る要求を満たしつつ、ループに混入する雑音を最小 化するという意味である。

3 Methods

メインの鏡を懸架する Type-A suspension 中の低 温懸架装置(図7)をモデル化して制御対象とする。 なお、振動は6自由度あるが、簡単のため以下では ビーム軸方向の振動制御のみを考える。



図 7: 低温懸架装置

3.1 モード制御

多段振り子の系は図4の赤線などで示されるよう に、複数のモードが存在する複雑なシステムである。 従来はこれらのモードをまとめてダンピングする制 御を設計していたが、モードごとによってダンピン グを調整することで最適化が容易になる。たとえば、 一番周波数の低いモードはエネルギーの面で支配的 であり、大きなダンピングが必要である。一方、高い 共振モードはそれほどダンピングを必要とせず、観 測帯域に最も近いためシステムにフィードバックさ れるセンサ雑音をなるべく減らすことの方が重要で ある。そこで制御対象を振り子の振動モードに基づ いて分解し、そのモードごとに制御を行うことを考 える。このようなモード制御自体は単なる座標変換 であるからダンピング制御雑音低減に直接関係しな いが、制御対象の単純化は最適な制御設計を容易に するため、結果として雑音の低減が期待される。

このモード分解は式で表すと以下のようになる。

$$\begin{cases} \boldsymbol{M}\ddot{\vec{x}} + \boldsymbol{K}\vec{x} = \vec{F} \\ \vec{x} = \Phi\vec{q} \end{cases}$$
(2)

$$\boldsymbol{M}_m \ddot{\vec{q}} + \boldsymbol{K}_m \vec{q} = \vec{F}_m \tag{3}$$

ただし、 \vec{F} は制御力のベクトルであり、添字mはモー ド座標系における表記を意味する。このモード分解 において、各段の変位を表すベクトル \vec{x} は $M^{-1}K$ の固有ベクトル Φ によってモード座標系での変位 \vec{q} に変換される。この上で各モードに対して制御器を 設計することになる。

3.2 状態推定

モード制御の実現のためには各段のマスの位置や 姿勢を測定する必要があるが、たとえばビーム軸方 向のダンピング制御ではセンサ感度と雑音の観点か ら MN 段(図7)のみでセンシングを行うのが良さそ うである。そこでシステムの完全な状態を得るため、

$$\begin{bmatrix} \dot{\vec{q}} \\ \ddot{\vec{q}} \\ \dot{\vec{q}} \end{bmatrix} = \boldsymbol{A}_m \begin{bmatrix} \dot{\vec{q}} \\ \dot{\vec{q}} \end{bmatrix} + \boldsymbol{B}_m \vec{u} - \boldsymbol{L}_m \left(\boldsymbol{C}_m \begin{bmatrix} \dot{\vec{q}} \\ \dot{\vec{q}} \end{bmatrix} - \vec{y} \right)$$
(4)

のような状態推定を用いる。これは制御入力 *u*とセンサ信号 *g*を用いて対応するモード信号 *q*を推定するものであり、たとえば MN 段のセンサ信号からシステムの完全な状態を推定することができる。なお、 *A*, *B*, *C* はシステムの運動方程式を行列表現を用いて1階の微分方程式に変換した状態空間方程式

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\vec{x}} \\ \ddot{\vec{x}} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \vec{x} \\ \dot{\vec{x}} \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} d \\ \vec{u} \end{bmatrix} \\ \vec{y} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} \vec{x} \\ \dot{\vec{x}} \end{bmatrix}$$
(5)

の係数(*d* は地面振動による外乱であり、また直達行 列 **D** は 0 とした)であり、添字 *m* はそれらをモー ド座標に変換したことを意味する。

ここでの目標は最適な L_m (オブザーバゲイン)を 求めることであり、LQR法を用いて推定器を設計す る。これはコスト関数

$$J = \int_0^\infty \left(\begin{bmatrix} \tilde{\vec{q}}^\top & \dot{\tilde{\vec{q}}}^\top \end{bmatrix} \boldsymbol{Q} \begin{bmatrix} \tilde{\vec{q}} \\ \dot{\vec{q}} \end{bmatrix} + \vec{z}_m^\top \boldsymbol{R} \vec{z}_m \right) \mathrm{d}t \quad (6)$$

を用いて

$$\boldsymbol{L}_m = \operatorname{argmin}(J) \tag{7}$$

として設計する。ただし、Q は状態推定の正確性 を、R はセンサ雑音を重み付けする行列であり、 $\vec{z} = -L_m^{\top} \begin{bmatrix} \vec{q} \\ \dot{\vec{q}} \end{bmatrix}$ とした。

まずQは、モード座標系におけるインパルス応答 振幅の2乗を対角成分に配置する。低い方から数え てi番目のモード周波数を f_i とするとき、各振幅は $\frac{1}{2\pi f_i M_{m,ii}}$ で与えられる。これにより、最も大きな応 答を持つモードがより効率的に減衰される。

また **R** については、テストマスの振動減衰時 間 *T*_{decav} とテストマスに対するセンサ雑音の寄与 N_{sensor} についてコスト関数

$$J_R(\boldsymbol{R}) = \max(T_{\text{decay}}^2) + \max(N_{\text{sensor}}^2) \qquad (8)$$

を用いて、最適なもの

$$\boldsymbol{R} = \operatorname{argmin}(J_R) \tag{9}$$

を計算する。なお、ここではテストマスの振動減衰 時間を10秒としてシミュレーションを行う。

モード制御と状態推定による制御ループは図8の ようになる。



図 8: ダンピング制御ループの概略図

4 Results

ビーム軸方向の振動に対し、モード制御と状態推 定を用いたダンピング制御を施したシミュレーショ ン結果を図9および図10に示す。図9は周波数応答 性を示しており、これより特に低周波のモードにつ いて共振ピークを押さえられているのが分かる。ま た、図10はインパルス応答を加えたときの時間応答 を示しているが、10.2秒で振動が1/eの大きさに収 まるのが分かる。これは懸架装置の振動が収まる時 間の目安であり、KAGRAにおける要求値60秒を 充分満たしている。

またビーム軸方向の振動に対する制御について、テ ストマスに伝わる雑音(環境雑音および測定雑音と してそれぞれ地面振動雑音とセンサ雑音を使用)を 図 11 に示す。これよりモード制御と状態推定を用い ることで 10 Hz 以上の観測帯域において雑音性能が 大きく改善し、要求値を下回ることができたのが分 かる。





図 10: ダンピングの結果(時間応答)



図 11: ダンピング制御雑音の低減

5 Conclusion & Outlook

シミュレーションにより、モード制御と状態推定 を用いることでダンピング制御雑音を低減できる可 能性を示した。現在、これを実験で確かめる準備を 行なっている。

Reference

 Y. Akiyama et al., 2019, Class. Quantum Grav. 36 095015