# 2023年第53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

2023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、宇宙線研究 者会議(CRC)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。

観測機器分科会

## ■ index

観測 a01	近藤 奨紀	86GHz 帯常温受信機を搭載した VERA 水沢局での試験観測と性能評価	
観測 a02	西川 悠馬	1.85 m 電波望遠鏡での超広帯域同時観測実現に向けた光学系の開発	
観測 a03	高山 楓菜	ROS を用いた汎用望遠鏡制御システム NECST v4 の開発; 1.85m 望遠鏡での駆	
		動試験と試験観測の結果	
観測 a04	李 豪純	野辺山 45 m 電波望遠鏡 100-GHz 帯 MKID カメラ搭載試験におけるビーム特性	
		の評価	
観測 a05	石崎 悠治	野辺山 45 m 鏡搭載 100-GHz 帯 MKID カメラによ る大質量星形成領域 W49A	
		の観測データの解析	
観測 a06	今村 千博	大型サブミリ波望遠鏡のための発見的手法による軽量・高剛性な主鏡支持構造	
		の設計および評価	
観測 a07	岩上 耕太朗	ミリ波補償光学の開発:波面計測データを用いた野辺山 45 m 望遠鏡主鏡面の重	
		力変形のモデリング	
観測 a08	秋澤 涼介	CMB 精密観測衛星 LiteBIRD に向けた偏光変調器の ための低温連続回転機構	
		の開発	
観測 a09	相澤 耕佑	CMB 精密偏光観測 LiteBIRD に向けた偏光変調器のための広帯域反射防止モス	
		アイ構造の開発	
観測 a10	市村 一晟	数値シミュレーションによる近赤外線円偏光波の輸送過程の研究	
観測 a11	小嶋 拓斗	低コストで光学的欠点のない赤外全天雲モニタの開発	
観測 a12	河合 優樹	超広視野4枚鏡望遠鏡の光学設計	
観測 a13	笹岡 大雅	突発天体サーベイの差分画像解析における候補天体絞り込み手法の開発	
観測 a14	山田 裕大	GEO-X 衛星用 MEMS X 線望遠鏡のアニール時間の最適化の研究	
観測 a15	田中 虎次郎	像再構成光学系のための Kirkpatrick-Baez ミラーの開発	
観測 a16	石川 怜	MEMS 技術を用いた広視野 X 線望遠鏡 Lobster Eye 光学系の開発	
観測 a17	河邉 圭寿	ISS に搭載する超高層大気観測用 X 線カメラの概要と開発状況	
観測 a18	佐々木 康祐	TES 性能評価のための極低温環境で用いる磁気シールドの開発	
観測 a19	佐藤 匡駿	HiZ-GUNDAM 搭載候補 pnCCD 素子のノイズ評価	
観測 a20	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 a21	青木 大輝	X線分光撮像衛星 XRISM 搭載 X線 CCD の検出効率の測定	
観測 a22	柏崎 未有	機械学習を用いた XRISM 衛星搭載極低温検出器の異常検知アルゴリズムの開	
		発	
観測 a23	前田 涼太	月周辺での放射線測定 MoMoTarO プロジェクト	
観測 a24	山菅 昇太郎	Boltzmann シミュレーションにおける衝突項計算の GPU を用いた高速化	
観測 a25	伊藤 尚輝	TimePix3 搭載の半導体検出器を用いたミューオン の飛跡の三次元再構成と α	
		線に対する基礎性能評価	

観測 b01	亀山 晃	ブラックホール解明に向けた 86GHz 帯低雑音受信機の開発	
観測 b02	中川 凌	野辺山 45m 望遠鏡 7 ビーム受信機 (7BEE) 用 logger システムの開発	
観測 b03	小関 知宏	強度干渉計実験と画像合成の検討	
観測 b04	田中 颯	超小型衛星 VERTECS ミッションと姿勢制御ユニットのシミュレーション	
観測 b05	小鹿 哲雅	補償光学で用いる4ビームレーザーガイド星の伝搬モデルの開発	
観測 b06	大熊 悠介	ねじり振り子を用いた精密力測定における熱雑音除去法の提案	
観測 b07	藤本 健二郎	pnCCD 素子の軟 X 線評価システムの構築	
観測 b08	杉本 葵	Coloer-Xray-Camera を用いた pnCCD 素子の基礎性能評価	
観測 b09	畠中 大介	pnCCD 素子における軟 X 線性能評価	
観測 b10	伊藤 耶馬斗	X線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器における撮像モード間の X 線検出	
		率の比較	
観測 b11	青木 悠馬	X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器における Goffset の原因究明	
観測 b12	古山 泰成	超伝導遷移端型 X 線マイクロカロリメータの多画素化に向けた Hydra type の	
		解析	
観測 b13	岸本 拓海	ISS に搭載予定の X 線検出器による超高層大気の観測計画と荷電粒子バックグ	
		ラウンドの推定	
観測 b14	瀬口 剛弘	湾曲 Si 結晶を用いた Bragg 反射型偏光計の作成及び性能評価	
観測 b15	藤井 麟太郎	銀河団中心銀河 H1821+643 の Chandra X 線衛星の詳細解析	
観測 b16	塚本 博丈	高感度 MeV ガンマ線天体観測のための ETCC 開発	
観測 b17	吉岡 龍	ガンマ線天文気球観測実験 SMILE-3	
観測 b18	清水 康行	X 線観測衛星用井戸型シンチレータ技術を用いた医療用高感度ガンマ線プロー	
		ブの開発	
観測 c01	一ノ瀬 将也	すばる望遠鏡で高解像度観測を実現するレーザート モグラフィー補償光学	
観測 c02	近藤 謙成	機械学習による生体光イメージングの逆問題解析	
観測 c03	藤巴 一航	野辺山 45m 望遠鏡に搭載した 7beam 受信機での観測効率向上を目指した電波	
		分光計開発	
観測 c04	穂満 理生	時系列解析を用いた補償光学系における遅延誤差軽減に関する性能評価	

-index へ戻る

## 観測a01

# 86GHz帯常温受信機を搭載したVERA水沢局での試験 観測と性能評価

近藤 奨紀

### 86GHz 帯常温受信機を搭載した VERA 水沢局での試験観測と性能評価

近藤 奨紀 (大阪公立大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

宇宙に無数にある銀河の中には、様々な波長の電磁波を激しく放射している天体があり、これらを活動銀河 と呼ぶ。このような銀河の中心には巨大ブラックホールが存在し、そこからは光速付近まで加速されたプラ ズマガスがジェットとして噴出していることが観測から明らかになっている。しかし、その噴出原理は未解 明である。これを解明するにはシンクロトロン透過率が高く、ジェットの放射が明るい 86GHz 帯での観測が 鍵を握っている。この波長で、活動銀河 M87 の中心領域を高分解能・高頻度な観測を行うためには、現在 の EAVN の 86GHz 観測網に日本の VERA が加わることが重要である。そこで、本研究室が中心となって VERA20m 望遠鏡 (水沢局・石垣局) に新たに 86 GHz 帯での観測に対応させるための受信機の開発を進め ており、昨夏に水沢局に常温受信機を搭載した。今年1月から3月にかけてこのアンテナを用いて大気が観 測に及ぼす影響を知るために光学的厚み τ₀を測定したところ、0.15 前後が得られ、シミュレーション値と 近い結果となった。また、電波の受信効率を表すアンテナ開口能率についても測定したところ、0.25 程度の 値が得られた。この値も、アンテナの鏡面精度をもとにしたシミュレーション値と概ね等しい結果となった。 本集録では、これらの結果についての詳細と、今後の冷却受信機の搭載に向けた展望を記載する。

#### 1 研究背景



図 1: 周波数ごとの銀河中心の観測可能領域のシミュ レーション (Credit:CK-Chan)

宇宙に存在する銀河の中には、様々な波長の電磁 波を激しく放射している天体があり、これらを活動 銀河と呼ぶ (Padovani et al. 1995)。このような銀河 の中心には巨大ブラックホールが存在し、そこから は光速付近まで加速されたプラズマガスがジェット として噴出していることが観測から明らかになって いる。しかし、その噴出原理は未解明である。図1 は、活動銀河中心部の領域を43,86,230 GHz の3つ の周波数で観測したとき、どのように見えるかを表 したシミュレーションである。43 GHz 帯では、シン クロトロン放射に対する光学的厚みが厚く、中心を

見通すことが出来ないが、そこからのガスの放射は 明るい。一方で、230 GHz 帯では、シンクロトロン 放射は光学的に薄く、中心を見通すことが出来るが、 ガスの放射は暗い。ジェットとブラックホールの接 続領域を観測し、ジェットの発生・加速機構を解明す るための鍵と考えられているのが、230 GHz 帯の次 にシンクロトロン透過率が高く、230 GHz 帯よりも ジェットの放射が明るいとされる 86 GHz 帯である。 ところが、このような銀河中心領域は見かけの大き さがとても小さく、単一の望遠鏡では構造を分解す ることができない。そこで、電波の波長性を利用し て、複数の望遠鏡で同時に観測を行い、そのデータ を合成することで仮想的に大きな望遠鏡で観測した ことになる「電波干渉計」を用いる。このプロジェ クトでは、そのうちのひとつである「VLBI」という 方法を用いて観測を行う予定でシステムの構築を進 めている。電波干渉計では、望遠鏡間の距離が離れ るほど、角分解能は向上する。

図 2 の左は日本の VLBI 観測網 VERA(VLBI Exploration of Radio Astronomy) である。岩手県水沢 局、鹿児島県入来局、沖縄県石垣島局、小笠原諸島 の小笠原局の 4 局に、口径 20m の望遠鏡が設置され ている。右は、韓国、中国などの東アジア地域での VLBI 観測網 EAVN(East Asia VLBI Network) で

#### 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校



図 2: VERA と EAVN(Credit: VERA, EAVN)

ある。



図 3: 観測網の拡大

EAVN の既存の観測網としては、韓国の KVN が 定常運用されている。そこに加えて、中国の上海の 望遠鏡や、長野県野辺山などでも 86 GHz 受信に向 けたシステム開発が行われており、本研究室は国立 天文台と共同で、VERA の水沢・石垣島局に搭載す るための受信装置の開発を進めている。この開発が 実現できれば、電波干渉計としての角分解能が向上 し、天体のより細かい構造が分解出来るようになる。

### 2 VERA 水沢局に搭載している常 温受信機

図2は、冷却受信機搭載に向けた試験段階として、 2022年7月に、VERA水沢局へ搭載した86GHz帯 常温受信機の写真である。

図3はこのシステムのブロックダイヤグラムであ る。EL, EU, COの3バンドを切り替えることのでき る Diplexer を用いている。観測時は、86GHz 付近の



図 4: 86 GHz 帯常温受信機の写真

図 5:86 GHz 帯常温受信機のブロックダイヤグラム

帯域を取得できるように EU-band に接続している。 その後、Mixer でダウンコンバートされた IF 信号は 最終的に 4-8 GHz の信号として出力される。

**3** 大気の光学的厚み  $\tau_0$ 



図 6: 天頂角 Z における大気の厚み

一般に、周波数の高い電波ほど大気に吸収される 割合が高くなる。VERA の通常の観測は 22 GHz お よび 43 GHz で行われており、今回観測したい周波数 はこれらと比較して大気による影響を大きく受ける。 そこで、岩手県水沢市周辺の大気の状態を調べて観 測が可能かどうかを考察するため、secZ 法と呼ばれ る方法により大気の光学的厚み $\tau_0$ を測定した。 ある天頂角 Z( $0 \le Z \le 90 \deg$ )において、常温の電波吸 収体 (黒体)と空を見た時の受信機出力  $P_{amb} \ge P_{sky}$ を測定する。この測定を複数の Z について行い、横 軸を secZ(= $1/\cos Z$ )、縦軸を  $\log(P_{amb} - P_{sky}/P_{amb})$ としてプロットする。

#### その後、

 $\log\left(\frac{P_{\rm amb} - P_{\rm sky}}{P_{\rm amb}}\right) = \tau \sec Z + C(C \ \mathrm{i} \Xi \Xi)$ 

でフィッティングする。図5に示す1月10日の場合で は、0.12が大気の光学的厚み $\tau_0$ に該当する。その他 にも1月から5月にかけて測定を行い、概ね $\tau_0 \sim 0.10$ から0.18となっている。



図 7: 測定結果の例



図 8: 水沢局の 86 GHz における大気の光学的厚み  $\tau$ のシミュレーション結果 (Credit:VLBI 将来 WG)

図5は水沢局のKバンド、Qバンドの測定結果と、 水沢周辺の大気モデルをもとにしたWバンドでの大 気の光学的厚みのシミュレーションである。今回得 られた値はシミュレーションと概ね一致しており、妥 当であると考えられる。

#### 4 アンテナ開口能率

アンテナ開口能率とは、アンテナに入射した電波 のうち、実際に受信機に到達する電波の割合を表す 物理量である。一般に、輝度温度がわかっていると される天体の観測からアンテナ開口能率は求めるこ とができる。

観測天体の輝度温度  $T_{\rm B}$ , 観測波長  $\lambda$ , 望遠鏡の見かけ の面積  $A_{\rm p}$ , 天体の視半径  $\theta_{\rm s}$ , ビームサイズを HPBW とするとアンテナ開口能率  $\eta_{\rm A}$  は観測量であるアンテ ナ温度  $T_a^*$  を用いて以下の式で表される。

$$\eta_{\rm A} = \frac{4\lambda^2 \log 2T_a^*}{\pi T_B^2 A_p HPBW^2 [1 - \exp{-4\log 2(\frac{\theta_s}{HPBW})^2}]}$$

ただし、アンテナ温度  $T_a^*$  は電波吸収体を見た場合、 天体のないところを見た場合、天体を見た場合のそれ ぞれの受信機出力を  $P_{amb}$ ,  $P_{sky}$ ,  $P_{source}$  を用いて以 下のように表される。(ただし、常温黒体の温度  $T_{amb}$ ) が空の温度  $T_{atm}$  と等しいとした仮定の場合である)

$$T_a^* = \frac{P_{\rm source} - P_{\rm sky}}{P_{\rm amb} - P_{\rm sky}}$$



図 9: 木星の 9 点観測のイメージ図

今回の測定には、木星を用いた。以下の図は、天 体のスキャン方法である。まず、水平 (Azimuth)方 向に5 点観測し、その後垂直 (Elevation)方向に5 点 観測する。中心の1 点は重複しているので、「9 点法」 などと呼ばれたりする。このスキャンの中で、大気雑 音更生用のデータを取得するために電波吸収体と天 体のないところを測定している。図8は、86,98 GHz の2 周波での木星の観測から計算したアンテナ開口



図 10: 86,98 GHz でのアンテナ開口能率の測定結果

能率が天体仰角によってどの程度変わるかをプロッ トしたものである。

Elevation が低くなるにつれて能率値が低くなるの は、見通す大気の量が増え、大気吸収の割合が多く なるからである。一般的にアンテナ開口能率は 0.60 前後であり、アンテナの鏡面精度と観測波長に依存 する。今回得られた 0.25 前後という値だけ見ると、 本当に観測出来るのかと思うかもしれないが、これ は想定内であった。もともと VERA は 6, 22, 43 GHz などの低周波での観測を目的に製作されたアンテナ なので、鏡面精度の影響が大きい 86 GHz の観測は できないと考えられてきた。しかし、今回実際に受 信機を開発し、観測を行なったところ、シミュレー ションと概ね等しい値が得られたという点で VERA で 86 GHz の VLBI 観測が実現できる可能性は十分 にある。

#### 5 今後の展望

一般に、電波望遠鏡の感度 $\sigma$ は、システム雑音温度 $T_{sys}$ ,観測周波数帯域 $\Delta B$ ,観測時間tに依存する。

$$\sigma \propto \frac{T_{\rm sys}}{\sqrt{\Delta B\tau}}$$

この式から、感度を上げる (σを小さくする) ため には分母を大きくする or 分子を小さくする必要があ るが、分子は √ がかかっているので、例えば感度を 2 倍向上させるには観測時間を 4 倍に増やさなけれ ばならない。そのため、分子を小さくする方が効率 が良い。 ところで、システム雑音温度  $T_{\text{sys}}$  は大気の厚み $\tau$ , 大気の放射温度  $T_{\text{atm}}$ , 受信機雑音温度  $T_{\text{rx}}$  を用いて 以下の式で表される。

$$T_{\rm sys} = \exp(\tau) \left[ T_{\rm atm} (1 - \exp(-\tau)) + T_{\rm rx} \right]$$

第一項は気象条件によるものなので、大きく小さく することはできない。そこで、第二項の受信機雑音 温度  $T_{\rm rx}$ を小さくすることを考える。この方法とし ては、受信機を低音に冷却することである (冷却受信 機と呼ばれている)。現在の常温受信機の場合、 $T_{\rm rx}$ ~ 600[K] で、観測条件の良い冬で  $T_{\rm sys}$  ~ 1000[K] であった。今後搭載を計画している冷却受信機では、  $T_{\rm rx}$  ~ 350[K] を目標として開発を行っており、同様 の気象条件で推定されるシステム雑音温度は $T_{\rm sys}$  ~ 500[K] である。つまり、システム雑音温度が約 1/2 となるので、望遠鏡の感度としては 2 倍向上し、よ り弱い天体からの信号も識別できるようになる。 -index へ戻る

## 観測a02

## 1.85 m 電波望遠鏡での超広帯域同時観測実現に向け た光学系の開発

西川 悠馬

### 1.85m電波望遠鏡での超広帯域同時観測実現に向けた光学系の開発

西川 悠馬 (大阪公立大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

我々大阪公立大学はこれまで、星の形成課程を解明するために野辺山に設置された 1.85 m 電波望遠鏡の 開発・運用を行ってきた。この望遠鏡には、210-375 GHz 帯に存在する CO(*J*=2-1, 3-2) 輝線を同時に 観測するための受信機が搭載されている。そして現在、星形成領域のさらに詳細な情報を取得するために、 84-116 GHz 帯に存在する CO 輝線 (*J*=1-0) も同時に観測する計画を推進している。

その中で新たに設計する光学系に要求されることは主に二つあり、(1) 副鏡とフィードにおけるビームサ イズと曲率半径を周波数依存なく一定にすることと (2)210-375 GHz 帯と 84-116 GHz 帯に分離して集光 することである。(1) は開口能率を全帯域に渡って高めるためであり、周波数に依存しない光学設計のため に確立された理論を用いることで最適化が可能である。(2) は導波管限界により 84-375 GHz という比帯域 (周波数幅/中心周波数)130 %を一つのフィードで給電するのは不可能なためであり、低周波側のみを透過す る準光学フィルタを用いることで実現可能である。準光学フィルタの通過特性は平面波入射の際に最大とな るが、実際の光学系において使用する場合は斜入射成分を含むため、特性劣化は不可避である。従って、出 来るだけ平面波に近い状態で入射させることを考慮した設計を目指した。その結果全帯域共通の楕円鏡を二 枚使用することに加えて準光学フィルターで分離した後にそれぞれ一枚ずつ楕円鏡を追加し、光学系として 成立することを物理光学シミュレーションによって確認した。

本講演では、上記2点を両立する光学系設計の詳細や物理光学シミュレーションの結果と、今後の展望に ついて報告する。

#### 1 研究背景

宇宙空間において、塵やガスからなる分子雲の中 で原始星が誕生し、やがて星が形成される。しかし その詳細は未だ謎な部分が多く、我々の研究室では 詳細な星形成過程の解明を目的として、様々な研究 を行ってきた。分子雲から放射される電波を受信す ることで、星形成の母体となる分子雲の性質を知る ことができる。

我々の研究室は長野県の野辺山に設置された口径 1.85 m の電波望遠鏡の開発と運用を行ってきた。(Onishi et al. 2013) 現在は、CO 同位体である <sup>12</sup>CO, <sup>13</sup>CO, C<sup>18</sup>O 分子の J=2-1, 3-2 輝線 (計 6 輝線) を 同時観測するために 210-375 GHz 帯で最適化され た状態となっている (Masui et al. 2021)。観測する 分子輝線の種類が多いほどより詳細に分子雲の性質 を知ることができるので、現在新たに CO 同位体の J=1-0 輝線も加えた 100-300 GHz 帯という超広帯 域同時観測の実現を目指している。それに伴い新た な受信システムの開発が必要であり、私はその光学 系の設計を行った。



図 1: 1.85 m 電波望遠鏡

#### **2** ガウス光学と FIM 理論

電波は電磁波の一種であるので、電波は電場と磁 場を支配するマクスウェル方程式によって記述され る。マクスウェル方程式から様々な振動・波動現象を 記述する際に基本となる波動方程式が導かれ、さら に波動方程式を変数分離することで楕円型の偏微分 方程式であるヘルムホルツ方程式が導かれる。この ヘルムホルツ方程式を直交座標から円筒座標へ変換 した式を満たす解として図2に示すようなガウシア ンが挙げられ、これをガウスビームと呼ぶ。電波望 遠鏡の光学系を設計する際、光軸付近ではこのガウ スビームを使って電磁波の伝搬を考える (Goldsmith 1998)。



図 2: ガウスビームの伝播の様子と電解分布

図2のように、電場がE<sub>0</sub>の1/e倍になるような半 径 *ω* をガウス光学におけるビームの半径と定義し、 ビームサイズと名付ける。ビームサイズは z に依存 して変化し、その極小値 ω0 をビームウェストとい う。図2のように、ガウスビームはビームを絞って も1点には収束せず、広がってゆく。また、ビーム の等位相面は z 軸付近では球面上になっている。任 意な位置でのビームサイズ ω(z) と等位相面の曲率半 径 *R*(*z*) はビームウェストの大きさ ω<sub>0</sub> とビームウェ ストからの距離 z がわかれば算出できる。逆に、任 意の地点でのビームサイズ ω(z) と曲率半径 R(z) が わかればビームウェストの大きさω<sub>0</sub>とその距離 z が 算出できる。電波望遠鏡の光学系を設計する際のガ ウシアン光学では、主に副鏡でのビームサイズと曲 率半径を初期条件として各光学素子などの地点のパ ラメータを計算していき、ホーン開口部まで求める。

図3のように周波数が異なる電磁波をある集光素 子(ここでは凸レンズを用いて説明する)に入射させ ると、照射した時点でのビームサイズと曲率半径を 周波数に依らず一致させていたとしても、集光素子を 通った後で全ての周波数のビームサイズと曲率半径 が一致することは無い。しかし複数の帯域を同時観測 するためには、副鏡とホーン開口部の2地点において ビームサイズと曲率半径が周波数依存なく一定であ る必要がある。そのために、Frequency Independent Matching 理論 (F.I.M 理論) という理論を用いて周波 数に依らない光学系を作っている。(Chu 1983)



図 3: F.I.M 理論を用いていない光学系 (左) と用い た光学系 (右)

#### 3 新光学系の設計概要

今回、光学系を100-300 GHz 帯に最適化するにあ たって従来の設計 (Yamasaki et al. 2021) から大き く変更した点が主に 2 つある。



図 4: レンズ系で描いた現在の 1.85 m 電波望遠鏡の 光学系



図 5: レンズ系で描いた新たな 1.85 m 電波望遠鏡の 光学系

2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

1つ目は、導波管限界により84-375 GHz とい う比帯域 (周波数幅/中心周波数)130%を一つのフ ィードで給電するのは不可能なため、100 GHz 帯と 200-300 GHz 帯の2種類のホーンを使用することで ある。2つ目は、2種類のホーンを使うにあたって、 100 GHz 帯の電磁波のみを透過し、それ以外の帯域 は反射する性質を持った準光学フィルタを使用する ことである。また、準光学フィルタの通過特性は平 面波入射の際に最大となるが、実際の光学系におい て使用する場合は斜入射成分を含むため、特性劣化 は不可避である。従って、出来るだけ平面波に近い 状態で入射させることを考慮する必要がある。

### 4 設計結果とシミュレーション

ガウス光学と F.I.M 理論を用いた周波数に依存し ない光学系の設計結果を以下の図 6 と図 7 に示す。 フィルターの設置位置は、CM3 から各周波数におけ るビームウェストの距離を平均した位置に設置した。







図 7: 各地点でのビームサイズ

光学系の性能を表す指標として、開口能率がある。 開口能率とは、アンテナの面積に対する鏡面誤差や 反射率などによって生じる電力損失を除いた有効的 なアンテナサイズの面積の割合であり、アンテナ開 口能率を上げることが集光力の向上にとって非常に 重要である。新たに設計した光学系を、GRASP と 呼ばれる電磁界解析ソフトを用いてシミュレーショ ンし、各周波数での開口能率を算出した。







#### 図 9: 230 GHz の遠方解ビームシミュレーション



図 10: 345 GHz の遠方解ビームシミュレーション

230 GHz と 345 GHz は現在の光学系と同等の開口 能率であるが、115 GHz のみ開口能率が少し低い値 となっている。原因の一つに、ビームサイズが大き いことによる spill over(電波の漏れ)があり、集光素 子を大きくする必要があるが、1.85 m 望遠鏡の物理 的な制約条件もあるため、今後の検討課題である。

### 5 楕円鏡が開口能率に与える影響

図 11 のように、楕円鏡の設計の際には等価的な薄 肉レンズで考え、レンズの焦点距離と入射前後の曲 率半径にはレンズの公式が成り立つ。



図 11: 楕円鏡と入射前後の曲率半径の関係

図7を見てもわかるように、楕円鏡 (Curved Mirror)の入射前後の曲率半径は周波数によって異なる が、CM2と CM3 は全周波数共通の楕円鏡であるた め、必然的に入射前後の曲率半径も周波数によって異 なる。従来の光学系は、各周波数の入射前後の曲率半 径を平均した値で設計を行っており、210-375 GHz という帯域においては問題無かった。しかし今回の 100-300 GHz 帯という超広帯域においては、楕円鏡 の設計周波数によって、各周波数の開口能率が大きく 変わることが発覚した。そこで、光軸の距離や反射角 などの楕円鏡の設計パラメータ以外は全く同じ光学 系で、楕円鏡の設計パラメータの周波数のみを変化 させた場合の各周波数の開口能率の変化を GRASP を用いてシミュレーションした。



図 12: 楕円鏡の設計周波数と開口能率の関係

図 12 によれば、全周波数共通の楕円鏡である CM2 と CM3 は 207 GHz で計算した入射前後の曲率半径 を用いて設計するのが良いということがわかった。

#### 6 まとめと今後

我々の研究室が所有する 1.85m 電波望遠鏡の 100 GHz-300 GHz 帯という広帯域同時観測を実現 するための新たな光学系を設計した。新たな光学系 を設計する際、ホーンを 100 GHz 帯と 200-300 GHz 帯の2種類使用すること、それに伴って100 GHz帯 のみを透過する性質を持つ準光学フィルターを使用 すること、という2点が主な変更点である。F.I.M 理 論を用いて副鏡とホーン開口部で周波数に依存せず にビームサイズと曲率半径を一致させる設計に成功 した。GRASP を用いたビームシミュレーションに よれば、200-300 GHz 帯では開口能率 0.80 以上を 達成し、100 GHz 帯では開口能率 0.66 となった。今 後は 100 GHz 帯の開口能率が 0.80 以上になるように 原因究明をするとともに、望遠鏡に搭載する際の物 理的な条件や 4K 冷却 Dewar 内に設置する際の素子 の収縮の影響などを考えていき、ホーンの開発も行 う必要がある。

#### Reference

Onishi, T. et al. 2013, PASJ, 65, 4, 78

- Masui, S. et al. 2021, PASJ , 73, 4, 1100  $\,$
- Goldsmith, P. F. 1998, Quasioptical Systems: Gaussian Beam Quasioptical Propagation and Applications (New York: IEEE)
- Chu, T. S. 1983, IEEE Trans. Ant. Propag., 31, 614
- Yamasaki, Y., et al. 2021, PASJ, 73, 4, 1116

-index へ戻る

## 観測a03

# ROSを用いた汎用望遠鏡制御システム NECST v4の開 発; 1.85m 望遠鏡での駆動試験と試験観測の結果

## 高山 楓菜

### ROS を用いた汎用望遠鏡制御システム NECST\_v4の開発; 1.85m 望遠 鏡での駆動試験と試験観測の結果

高山 楓菜 (名古屋大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

一酸化炭素分子輝線は星の母体である分子雲のトレーサーであり,広範囲の観測により分布と物理状態を調べる ことが重要だ.しかし,その全天観測はいまだ達成されていない.我々は,チリにある NANTEN2 望遠鏡を用 いて,南半球から観測可能な全天の約 70%をカバーする NANTEN2 Super CO Survey as Legacy(NASCO) 計画を推進している.広範囲のサーベイ観測を短時間で行うためには観測効率の向上や観測の自動化が必要 となる.5つのビームを持った NASCO 受信機が 2020 年初めに搭載された (Nishimura et al. 2020) が,ソ フトウェアのメンテナンス性に問題があり,修正や機能の追加が難しかった.また,受信機の性能を活かす ため望遠鏡を高い精度で高速に駆動させることが要求される.そこで我々は,信頼できるリアルタイム制御 やシステムへの機能の追加・修正を容易にする,特定の望遠鏡に特化しない高い汎用性と,分散処理による 柔軟性を持った制御システム NECST\_v4 を開発し,大阪公立大学 1.85m 望遠鏡を用いて試験中である. 今回,我々は加速度を考慮した座標計算を実装し試験観測を行った.OTF 観測においては,観測範囲内を安 定した速度で駆動することが重要である.従来等速直線運動を仮定して座標と速度の指示値を与えていたが, 実際には望遠鏡は慣性運動するため,指示値と実測値に誤差が生じていた.今回助走区間を設け,区間内で 加速するよう指示値を与えることで観測開始時には安定した速度に達するよう,座標の計算方法を改善した. その結果,以前は最大 150 arcsec 程度あった誤差が 10 arcsec(ビームサイズの 1/20) 程度まで抑えられた. さらにデータ通信量の削減や QLook 機能の追加,OTF 試験観測を行った.

#### 1 Introduction

分子雲は星の母体であり,天の川銀河の全面にわ たって分布や物理状態を観測することは星の銀河内 での形成過程を知る上で非常に重要である.分子雲 の代表的なトレーサーとして一酸化炭素分子輝線が 挙げられる.しかし,一酸化炭素分子輝線による観 測は他波長に比べ非常に遅れており,全天観測はい まだに達成されていない.

我々は, チリにある NANTEN2 望遠鏡を用いて NANTEN2 Super CO Survey as Legacy(NASCO) 計画を推進している. この計画が達成されれば, 南 半球から観測可能である全天の約 70%をカバーする ことができる. NASCO 計画の要求性能は表 1 であ る. この目標を達成することにより, 全天観測を約 3 年間で行うことが可能となる. そのためマルチビー ム受信機である NASCO 受信機の開発を行い, 2020 年に搭載作業を行った.

しかし,従来のシステムはソフトウェアのメンテ ナンス性に問題があり,修正や機能の追加が難しかっ

_ 表 1: NASCO		計画の要求性能
	要求感度	$T_{rms} < 0.8K$
	空間分解能	2.6 arcmin
	速度分解能	$0.2 \ \mathrm{km/s}$
	スキャン速度	600  arcsec/s

た.また,NASCO 受信機は多数の装置を時刻同期し て制御する必要のある複雑な受信機であるため,分 散処理を用いた制御システムが開発されたが,デー タの通信量が膨大になるという問題があった.そこで 我々は望遠鏡制御システム NECST\_v4 を開発した. このシステムの特徴として,1:信頼できるリアルタ イム制御,2:システムへの機能の追加・修正を容易に する,特定の望遠鏡に特化しない高い汎用性,3:分 散処理により複数の PC で制御を行うことで,例え1 台が故障してもシステムが止まることがないという 柔軟性,などが挙げられる.我々は NECST\_v4 シス テムを 1.85m 望遠鏡に搭載し,駆動試験を行った.

#### 2 NECST\_v4システムの概要

NECST\_v4 では ROS(robot operationg system) を用いて分散処理を実装した. ROS とはロボット開 発によく用いられているオープンソースソフトウェ アである. ROS では「publisher」,「subscriber」と呼 ばれる機能を用いてデータ通信を行っている (図 1).



図 1: ROS による通信のイメージ

publisher がデータを送信し,subscriber が必要な データを受信することで複数のプログラムが多対多 の通信を行えるようになっている.これにより例えば データ保存,座標計算,モーターの制御といった役割 をそれぞれ別の PC に担わせることが可能となり,分 散処理が実装できた.また,旧システムでは分光計の データの送受信とその他のエンコーダー値などのデー タ通信を同じネットワークで行っていたため,ネッ トワークに負荷が生じていた.そこで,NECST\_v4 では分光計データのみを異なるネットワークに分離 し,データ通信量の削減を図った.

さらに、特定の望遠鏡に特化しない汎用性を持た せるため、Docker を用いて仮想環境を構築し、その 中でシステムを動かす方法を利用した.Docker とは、 必要な環境をまとめたコンテナと呼ばれる箱を用い て仮想環境を作成、配布、実行するためのプラット フォームであり、これを用いることでパソコンの内部 であたかも別のパソコンを動かしているかのように 操作することが可能となる.Docker の情報は Docker イメージというファイルに記載されており、それを元 に立ち上げるため、異なるパソコンでも同じ Docker イメージを使用することで全く同じ環境を再現する ことができる.

昨年度までにコアシステムの開発が完了している. 本稿では、1: データ通信量の削減、2: ブラウザ上で リアルタイムにデータを確認できる QLook の追加, 3: 加速度を考慮した座標計算方法への変更,4: 最終 的に行った OTF 試験観測の結果について説明する.

### 3 結果

#### 3.1 データ通信量の削減

表2は旧システムとNECST\_v4システムにおける データ通信量を比較したものである.

表 2: 旧システムと NECST\_v4 システムにおける データ通信量の比較

旧システム	$9.64~\mathrm{MB/s}$
NECST_v4	0.03  MB/s

従来のシステムでは、1.85m 望遠鏡はシングルビー ムであるにもかかわらずデータ通信量が 9.64MB/s にも上っていた.一方、NECST\_v4 システムでは 0.03MB/s にまで抑えられている.

#### 3.2 QLook の追加

図2は QLook の画面である. QLook では ROS に よって流されているトピックをリアルタイムで表示, 閲覧することができる. 右側の図は分光データを, 左 側の図はエンコーダーの実測値を示している.



図 2: QLook の画面

#### 3.3 加速度を考慮した座標計算方法

望遠鏡の制御では,ある時刻に望遠鏡が向くべき 座標を指示値として与えている.従来の座標計算で は,望遠鏡が等速直線運動をすると仮定して指示値 を出していた.しかし,望遠鏡は自身の重量により 等速で動き出すことができず,加速度を持って運動 する.

そこで,加速度運動を仮定して指示値を出せるよう座標計算方法を変更した.また,望遠鏡が一定の 速度に達するまでには時間がかかるため,スキャン したい範囲の外側に助走区間であるマージンを設け, スキャンを開始する際に望遠鏡の速度が安定するようにした.結果を図3に示す.縦軸は az (deg),横軸が時間であり,オレンジ色の線は座標指示値,青色の線は実測値である.左の図が等速直線運動を仮定していたもの,右の図が加速度運動を仮定したものである.

加速度運動を仮定した場合の方が指示値と実際の 値の差が小さくなっている.



図 3: 指示値と実測値

115.2712 GHz である.

#### 4 考察

表2ではシングルビームである1.85m 望遠鏡の結 果を示した. NANTEN2望遠鏡は5つのビームを持っ ているため,データ通信量も5倍になると考えられ る(表3). 旧システムと NECST\_v4 での差は歴然で ある.また,通信量が抑えられたことにより,QLook のためだけに分光データの一部を流すことが可能と なり,観測中にリアルタイムの分光データの確認を することができるようになった.

表 3: NANTEN2 における旧システムと NECST\_v4 システムにおけるデータ通信量の予想

旧システム	$48.2~\mathrm{MB/s}$
NECST_v4	0.15  MB/s



#### 3.4 OTF 試験観測

また,図3において,指示値から実測値を引くこ とで求めた誤差を図にすると図5のようになる.



図 5: 指示値から実測値を引くことで求めた誤差

左の図は等速直線運動を仮定して指示値を出した 場合であり, 誤差が一定となるまでに2s程度かかっ ていることに加え誤差が最大 150 arcsec まで大きく なっている. 現在は 1.85m 望遠鏡を使用しているた め短時間で誤差が収束しているが, NANTEN2 望遠 鏡は口径が4mであり 1.85m 望遠鏡に比べ重量があ るため,より時間がかかると考えられる.また, 誤差 が一定となってからも70 arcsec程度の大きさとなっ ている. 右の図は加速度運動を仮定して指示値を出 した場合であり, 誤差は終始 10arcsec程度に収まっ ている.

座標計算方法の変更により望遠鏡を安定してスキャン駆動させることが可能となった.素早く誤差を収

図 4: OTF 試験観測の結果

Ori-KL の OTF 試験観測を行い,シングルビーム による1平方度の OTF 観測をおよそ 46 arcsec/s,お よそ 30 分で行うことができた.得られたデータから OTF マップを作成した (図 4).

マップのサイズは1deg\*1deg,スキャン間隔とデー タ点の間隔はどちらも 30 arcmin ,観測周波数は 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

束させられるということは最小のマージンで観測を 行うことに繋がり,観測効率の増加が期待される.

一方,今後の課題として,駆動の始めが安定しない,分光計のデータが欠損するなどの問題が残されている.これらに関しては現在もデバッグを進めている.

#### 5 まとめと今後の展望

我々は CO による全天観測を行う NASCO 計画を 推進している. そのために新たな望遠鏡制御システ ム, NECST\_v4 システムを開発した. コアシステム の開発は去年終了しており,本稿では以下の 4 つを 取り上げた. 1: データ通信量の削減, 2: ブラウザ 上でリアルタイムにデータを確認できる QLook の追 加, 3: 加速度を考慮した座標計算方法への変更, 4: 最終的に行った OTF 試験観測.

分光計周りや座標計算にはいまだ問題が残されており、今後デバッグを進めていく予定である.また、今年中には NECST\_v4 システムを完成させ、NANTEN2 望遠鏡への搭載を予定している.

### Reference

Nishimura et al. 2020, Proceedings of the SPIE, 11453, 18

-index へ戻る

## 観測a04

# 野辺山45 m 電波望遠鏡100-GHz帯MKIDカメラ搭載 試験におけるビーム特性の評価

## 李 豪純

### 野辺山 45m 電波望遠鏡 100-GHz 帯 MKID カメラ搭載試験のおけるビー ム特性の評価

李 豪純 (筑波大学大学院 数理物質科学研究群)

#### Abstract

我々は、遠方銀河の広域探査や銀河系の H<sub>II</sub> 領域の観測を行うため、野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用 100-GHz 帯連 続波カメラの開発を進めている。多素子による観測を目的とした本カメラの焦点面アレイは、109 素子の Si レンズ及 び力学インダクタンス検出器 (MKID) によって構成されている。望遠鏡からの信号はカメラの真空窓へ入射すると、 2 枚の大口径 Si レンズによる屈折光学系を経て焦点面アレイへと伝送される。2021 年 5 月の搭載試験での火星の観 測結果からのビームサイズ評価 [宮澤 修論 (2022)] に続き、2022 年 3,4 月にはより詳細なビーム特性を調べるためク エーサー 3C 273 のラスタースキャン観測を行った。

本発表では、各 MKID およびアレイのビーム特性を調べるため、3C 273 の解析結果について報告する。今回新た に観測した 3C 273 は点源と見なせるため、より直接的なビーム特性の評価が可能である。観測結果の解析のため、 4'×4'(Az, El) の領域内でのビームマップを、データの得られた 58 素子分作成した。また、観測結果に対し 1 次元 および、2 次元ガウシアンフィッティングを行いビームサイズを計算した。その結果、本カメラのビームサイズの設 計値が 16.3" であるのに対して、58 素子のうちビームの見えている 32 素子の結果から導出したビームサイズのアレ イ平均は 16.3±2.6" となり、設計値と一致した。本講演では、フィッティングから得られたビームサイズ、NEFD を含めたアレイ全体の解析結果の詳細を報告する。

#### 1 Introduction

我々の住むこの宇宙には様々な銀河が存在してお り、その大きさや形状、星形成率には違いがあること がわかっている。近年、大量のダストに埋もれた爆 発的な星形成を行っている遠方銀河が多く発見され ているが、星形成領域の若い星からの電磁波は周囲 のダストや分子ガスに吸収されるため直接の観測は 困難となる。その一方でダストは星からの放射によ り数十 K に温められるため赤外線を放射するように なるが、この赤外線は宇宙膨張による赤方偏移によ り長波長側に引き伸ばされ地球では 100 GHz から 1 THz 程度の電波領域になるため、この帯域での広域 観測は遠方銀河の探査に適している。

遠方銀河の探査にミリ波・サブミリ波帯での観測は 有効であるが、遠方銀河を天空上から探すことは通常 の観測では非常に時間が掛かってしまい困難である。 そこで受信機を多素子化することによる観測の広視 野化、高感度化が重要となる。我々はこの多素子受 信機を国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡搭載用に 開発しており、その検出器として超伝導検出器の力 学インダクタンス検出器 (MKID) を用いている。野 辺山 45 m 鏡は長野県の野辺山という標高 1350 m の 高地に位置しており大気中の水蒸気量が少ないため、 天体からの電波が比較的吸収されずに観測を行うこ とができ、100 GHz、150 GHz 周辺では透過率が非 常に高く、この帯域での観測に適している。

#### 2 Instruments and Observations

我々は遠方銀河の広域探査や銀河系の H<sub>II</sub> 領域の 観測を目的として、筑波大学と国立天文台を中心に 野辺山 45 m 電波望遠鏡用 100-GHz 帯多素子カメ ラを開発している。カメラの光学系は図 1 のように なっている。カメラ本体の冷却光学系には 2 つのシ リコンレンズがあり焦点面アレイに集光される設計 になっている。またクライオスタットは外部から 40 K,4 K,1 K,0.1 K ステージという構造になっている。 中心部分に焦点面アレイがあり 100 mK 以下まで 冷却する系となっている。焦点面アレイには超伝導 状態で動作する超伝導検出器である力学インダクタ 2023 年度 第 53 回 天文·天体物理若手夏の学校

ンス検出器 (MKID) が用いられており、109 素子の Si レンズ及び MKID によって構成されている (図 2)。Al と NbTiN のハイブリッド MKID を使用し ており、Al の超伝導状態でのギャップエネルギーは 90 GHz となる [John F.Cochran & D.E.Mapother (1958)] ため 100 GHz 帯に感度を持つ検出器となっ ている。また、読み出し線の Al の周りに NbTiN を 使用することで 1.1 THz のギャップエネルギーを持 つエネルギーのリークを抑えてくれる。

2021 年に続き 2022 年 3, 4 月に野辺山 45 m 鏡へ の搭載試験を行い、大質量星形成領域 W49, W51、 クエーサー 3C 273 の観測を行った。観測方法はラ スタースキャンで、4′×4′の領域を観測しており、 一度の観測で合計 61 回のスキャンを行なっている。 本研究で解析を行った 3C 273 は 3/28, 4/7, 10, 13, 25, 26 日の 6 日の観測を行った。



図 1 野辺山 45 m 電波望遠鏡の光学系とカメラ内 の冷却光学系



図 2 109 個の Si レンズと MKID からなる焦点面アレイ

#### 3 Analysis Methods

本研究では 2022 年試験搭載時の 3C 273 の観測結 果から MKID カメラにおける各素子および平均ビー ムサイズを計算し、アレイマップを作成することに より素子全体でのビームの傾向を見た。また、雑音 等価フラックス密度 (NEFD) を計算した。解析の手 順としては、①ビームマップの作成、②大気成分の差 引き、③ビームサイズの計算、④アレイマップの作成 の順序で行い、その他に⑤ NEFD の計算を行った。

①各ビームの生データを T<sup>\*</sup><sub>A</sub> に直すためチョッ パーホイール法で強度を校正したマップを作成し (図 3a)、②では、各スキャンの OFF 点を繋ぐ直線をベー スラインとして観測データから差引いた (図 3b)。③ ビームサイズの計算は、天体の信号のピークを持つ1 つのスキャンに対して 1 次元ガウシアンフィッティ ングを行う方法と、ビームの回転や歪みをみるため に 2 次元ガウシアンフィッティングからビームサイ ズを計算する二つの方法を用いた (図 3c)。④各素子 における信号のピークに対し、それぞれ求めたビーム をプロットしアレイマップを作成することで素子全 体におけるビームの傾向を見た (図 3d)。NEFD の 計算では 3C 273 のフラックス密度は ALMA Band3 での観測結果を用いた。



図 3 a. ビームマップ (大気成分差引き前)、b. ビー ムマップ (大気成分差引き後)、c.1 次元ガウシアン フィッティング、d. アレイマップ

#### 4 Results

本研究では 6 日間の観測データの内、大気の変動 が比較的小さい 4/7 と 4/10 のデータを解析した。 2 日共に 109 素子中 58 素子分のデータがあり、そ の内、天体の信号が 1 次元フィッティングを行った 1 スキャンのゆらぎ σ の 4 倍以下のものや、クロス トークしているもの、データが飛んでいるものを除 いた結果、解析に使えたのは 25 素子 (4/7) と 32 素 子 (4/10) であった。ビームサイズを計算した結果、 4/10 のデータでは 1 次元フィッティングから得られ た Az 方向と 2 次元フィッティングから得た短軸方 向のビームサイズはばらつきの範囲で設計値の 16.3″ に一致した。本解析で得られた平均ビームサイズと NEFD の計算結果を表 1 に示す。

表1 平均ビームサイズと平均 NEFD

	2022/4/7	2022/4/10
$\theta_{\rm HPBW}(1D \text{ fit})['']$	$16.6\pm2.8$	$16.3\pm2.6$
$\theta_{\rm HPBW}(2D \text{ fit})['']$	$16.6\pm1.9$	$16.2\pm2.6$
NEFD $[Jy/\sqrt{Hz}]$	$0.34\pm0.09$	$0.45\pm0.16$

#### 5 Discussion

4/10の観測結果ではビームサイズがばらつきの範 囲で設計値に一致することがわかった。一方 4/7 の 観測結果では一致しない結果となったが、4/10 に比 ベ4/7の方が観測時に風が強く、そのために鏡面が 歪みビームサイズが大きくなったと考えられる。ア レイマップ (図 4a, b) を実験室での測定結果 (図 4d) と比較してみると、実験室で測定したビームはほと んど正円であることから、観測では天候による鏡面 の歪みなどの外的要因によってビームの歪みが生じ ていると考えられる。また、ZEMAX によるビーム パターンシミュレーションの結果 (図 4c) と比較する と、シミュレーションのような端の素子が中心方向 に歪む傾向は見られず、視野中心のビームが歪んで いたり素子毎にばらつく方向が異なることから、カ メラ内や望遠鏡の El 変化によるカメラと望遠鏡の伝 送系でのずれによって生じたものであると考えられ る。今後、望遠鏡の El 変化によってビームの歪みが 生じているのかを確認するためにシミュレーション を行う必要がある。

NEFD の計算結果では、2018 年の試験搭載時の木 星の観測結果から得られた  $6.00 \pm 2.23 \text{ Jy}/\sqrt{\text{Hz}}$ から 10 倍の感度の改善が見られ、2021 年に火星の観 測結果から得られた  $0.50 \pm 0.16 \text{ Jy}/\sqrt{\text{Hz}}$ とおおむ ね一致する結果となっている。



図4 a.4/7 のアレイマップ、b.4/10 のアレイマッ プ、c. ビームパターンシミュレーション、d. 実験室 での測定結果 [鈴木 修論 (2021)]



図 5 2 次元ガウシアンフィッティングから得た 各素子のビームサイズおよび平均ビームサイズ (左:4/7, 右:4/10)



図 6 素子毎の NEFD および平均 NEFD(左:4/7, 右:4/10)

#### 6 Conclusion

本研究では 2022 年の野辺山 45 m 電波望遠鏡搭 載試験におけるクエーサー 3C 273 の観測結果から MKID カメラのビーム特性評価を行った。その結 果、平均ビームサイズは 1 次元フィッティングの結 果から  $16.3 \pm 2.6''$ 、2 次元フィッティングの結果から  $16.2 \pm 1.6''$ となり、設計値の 16.3''にばらつきの範囲 で一致した。また、NEFD は 4/7と 4/10 のデータか らそれぞれ  $0.34 \pm 0.09$  Jy/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $0.45 \pm 0.16$  Jy/ $\sqrt{\text{Hz}}$ となった。ビームサイズの計算結果から作成したア レイマップからは、ビームパターンシミュレーショ ンや実験室での測定結果の比較から、今回の観測に おけるビームの歪みは天候や望遠鏡内の伝送系での 外的要因によって生じたものと考えられる。

今後の解析の課題として、本解析で使用しなかっ たクロストークしている素子や他の観測日のデータ 処理方法を検討し統計数を増やす必要があり、ビー ムの歪みを見るために望遠鏡の El 変化によるビーム パターンのシミュレーションを行う必要がある。ま た、装置の課題としては、サイエンス観測に向けて検 出器として用いている MKID の雑音レベルの改善や 観測における高い歩留まりを達成する必要がある。

#### Reference

宮澤啓 2022, 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 物理学 専攻 修士論文

John F.Cochran, & D.E.Mapother 1958, Phys.Rev 鈴木理花子 2021, 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 物 理学専攻 修士論文 --index へ戻る

## 観測 a05

# 野辺山45 m鏡搭載100-GHz帯MKIDカメラによる大 質量星形成領域W49Aの観測データの解析

## 石崎 悠治

### 野辺山 45 m 鏡搭載 100-GHz 帯 MKID カメラによる大質量星形成領域 W49A の観測データの解析

石崎 悠治 (筑波大学大学院 数理物質科学研究群)

#### Abstract

ミリ波サブミリ波帯多素子カメラは遠方銀河等の広域探査において有用である。我々は45 m 望遠鏡に搭載する 100-GHz 帯連続波カメラを開発している。焦点面アレイには 109 素子アンテナ結合型力学インダク タンス検出器 (MKID) を使用している。2022 年 3-4 月に天体を用いた試験観測を実施し、太陽系内惑星や 大質量星形成領域 W49A, W51A, クエーサー 3C273 のラスタースキャン観測を行なった。本研究では大質 量星形成領域 W49A の観測データの解析を行なった。

観測は (4' × 4') の領域を 20 分間かけ赤経、赤緯方向にマッピングした。今回は、ビームスイッチは用い ておらず単純にスキャンの端の値を差し引くことで大気成分を差し引いた。最終的には、全ての素子のデータ をノイズで重み付けして足し合わせた。マップのノイズは重ね合わせる前の平均である 0.080 K から 0.011 K まで改善した。本研究のデータより W49A のフラックススペクトルを作成したところ先行研究の曲線に よく乗っていることを確認できた。フラックススペクトルからダストと free-free 成分の寄与を計算したとこ ろ、100-GHz において free-free の寄与は 87%であった。

### 1 Introduction

宇宙には様々な銀河が存在しているが、その形成 や進化の過程は未解明な部分が多い。銀河形成期の 情報を含む宇宙初期の遠方銀河はダストに覆われて 可視光では観測が困難なものも存在する。数10 Kの ダスト放射は遠赤外線領域にピークを持ち、宇宙膨 張による赤方偏移の影響で地球上ではミリ波・サブ ミリ波・テラヘルツ波帯で観測される。また、低周 波側のミリ波帯では HII 領域 (電離水素領域) からの 放射である free-free 放射を観測することができる。 よって、ミリ波・サブミリ波カメラは銀河進化の研 究において有用である。

本研究における観測対象である大質量星形成領域 W49A は銀河系内鷲座方向へ地球から11 kpc ほど離 れた天体である。また、W49A の中心部にある W49N ではたくさんの大質量星 (太陽の数十倍) が一気に形 成されていることが分かっている。

我々は野辺山 45 m 望遠鏡に搭載する 100 GHz 帯 MKID109 多素子カメラを開発している。 2022 年に 100 GHz 帯多素子カメラによって得られた大質量星 形成領域 W49A のデータを用いて、 アンテナ温度 の時系列データからマップを作成するプログラムを 構築し、完成したマップの性能評価を行う。さらに、 得られたデータから、W49A における 100 GHz 連続 波の放射機構を議論する。

### 2 MKID カメラ

MKID とは Microwave Kinetic Inductance Detector の略であり超伝導状態で動作する共振器である。 超伝導状態の物質内で電子はクーパー対と呼ばれる 電子対をなす。クーパー対にギャップエネルギー以上 の光子が入射すると対が破壊され2つの準粒子が生 成される (図1)。この粒子数の変化に応じて MKID 等価回路 (図2)の力学インダクタンスが変化し読み 出し線の共振周波数が変化する (図3)。この共振周波 数の変化を読み取るのが MKID の動作原理である。



図 1: クーパー対の崩壊と準粒子の生成



図 2: MKID の等価回路



図 3: 異なる温度放射源を見た時の共振周波数変化 の様子。横軸が周波数で縦軸は読み出し用マイクロ 波信号が MKID の feed line を通じて戻ってきた時 の透過率の大きさ共振周波数ではマイクロ波信号の 大きさが最小になる。(青) ミラーを受信機の前に置 くことで受信機の熱放射を反射し、MKID に~40 K の放射が入射する。(橙) 常温の黒体源を受信機の前 に置くことで MKID に~300 K の放射が入射する。

天空上で広がりを持つ天体や、 位置が不明な遠方 銀河の観測には掃天観測を行う必要がある。この際、 広い視野を持つ単一鏡に、多数の検出器を並べると 一度に広範囲を観測することができ観測効率が上昇 する。MKID カメラの利点として1本の読み出し線 で多素子化が比較的容易という点があり、広域探査 に有用である。

### 3 野辺山 45 m 電波望遠鏡

我々の MKID カメラは国立天文台野辺山 45 m 電 波望遠鏡搭載用に開発されている。野辺山 45 m 電波 望遠鏡 (図 4) はミリ波帯の望遠鏡では世界最大級の 口径を持つ望遠鏡である。観測周波数は 1~150 GHz であり 100 GHz 帯では、世界最高クラスの高い感度 を誇っている。長野県野辺山は標高 1350 m の高地 に位置しており、大気透過率のシミュレーション結 果 (図 5) から周波数 100 GHz 周辺の透過率が高く、 この帯域での観測が可能である。また、本観測の観 測諸元を (表 1) にまとめる。



図 4: 野辺山 45 m 電波望遠鏡



図 5: 野辺山観測所の大気透過率シミュレーション

表 1: 本研究の観測諸元		
観測天体	大質量星形成領域 W49A	
中心座標	$(19^{\rm h}10'14'', 9^{\circ}06')$	
スキャン方法	ラスタースキャン	
観測領域	$4' \times 4'$	
スキャン幅	$4^{\prime\prime}$	
キャリブレーション	観測開始前	
観測期間	$2022/03/28 \sim 04/13$	
1回の観測に要する時間	20 分	
観測時の角度分解能	17"	



#### 観測結果 4

#### アンテナ温度マップの作成 4.1

本研究で作成する二次元強度マップの出力単位は アンテナ温度 T<sub>A</sub>\* を用いる。ラスタースキャン観測 の時系列データからマップを作成しており、赤経ス キャン、赤緯スキャンを同数回行っている。1ピクセ ルのサイズは正方でなく、スキャン方向で形が異な る。よって、重ね合わせのため正方ピクセルにガウ シアンカーネル (σ = 12") でリサンプリングを行っ ている。こうして出来た1612枚のマップをそれぞれ のノイズで重み付けし重ね合わせたマップが図6で ある。本研究で作成したマップとの比較のために270 GHz 帯先行研究のマップ (図 7) の相対座標を計算し たところおおよそ一致した。マップのノイズは重ね 合わせる前の平均である 0.080 K から 0.011 K まで 改善した。



図 6: W49A の 100 GHz 帯 T<sub>A</sub>\*マップ



図 7: W49A の 270 GHz 帯 T<sub>A</sub>\*マップ

#### フラックススペクトル 4.2

本研究で取得したデータからフラックスを計算し 先行研究とのフラックススペクトル (図8)を作成し た。フィッティングには free-free の成分からの寄与、 3種類の温度を想定したダストからの黒体放射を使 用している。本研究の結果 (赤丸) は曲線に良く乗っ ているように見え、free-free 成分からの寄与を計算 したところ 87%であった。



図 8: W49A のフラックススペクトル

#### まとめと今後の展望 $\mathbf{5}$

本研究での成果としては、天体の二次元強度マッ プを作成するプログラムを確立し 1612 枚のマップを 2023 年度 第 53 回 天文·天体物理若手夏の学校

重ね合わせた二次元強度マップの作成、マップのノイ ズは重ね合わせる前の平均である 0.080 K から 0.011 K まで改善したこと、フラックススペクトルを作成 し本研究の数値が先行研究との曲線によく乗ってい ることの確認、及び free-free 成分からの寄与を推定、 が挙げられる。

また、本研究の今後の課題としてはノイズの数値 が重ねた枚数に対し大きいこと、MKIDの応答性に ついて議論の余地があること、解析に使用できない 素子が半数以上であることが挙げられる。

#### Reference

Galván-Madrid R et al, ApJ, 779.2, 121, 2013

- H. D. Buckley, & D. Ward-Thompson, MNRAS, 281.1, 294.300, 1996
- D. Ward-Thompson et al, MNRAS, 257.2, 180.186, 1992

--index へ戻る

## 観測a06

大型サブミリ波望遠鏡のための発見的手法による軽 量・高剛性な主鏡支持構造の設計および評価

## 今村 千博

### 大型サブミリ波望遠鏡のための発見的手法による 軽量・高剛性な主鏡支持構造の設計および評価

今村 千博 (名古屋大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

大型サブミリ波望遠鏡 (LST) は日本が主導する将来の大型サブミリ波単一鏡であり、広視野観測に強みが ある。LST の実現には、高精度な鏡面 (アストロドームなしで 45 µm RMS 以下) と軽量な望遠鏡構造が必 須である。この課題に対し、主鏡支持構造の設計は予測可能な静的変形の最小化、および望遠鏡の軽量化に 寄与するが、LST の主鏡支持構造の設計は困難である。これは、主鏡支持構造を構成するトラス材の配置の 仕方が膨大であり、構造は望遠鏡が受ける複雑な外的擾乱の下で LST の性能要求を満たさねばならないた めである。望遠鏡の主鏡支持構造の設計は、これまで設計者の経験や部分的な数値計算に依存してきたが、 LST の主鏡支持構造を設計するのは難しく、計算機による構造最適化が必要である。この応用例として、せ いめい望遠鏡では架台の開発に遺伝的アルゴリズム (GA) が取り入れられ、軽量かつ高剛性な構造を獲得し たことが報告されている。

本講演では、LST のデザイン案をもとに作成した主鏡支持構造の3次元モデルに対し、鏡面の自重変形量と 主鏡支持構造の重量を最小化する構造をGAによって探索した結果を報告する。構造探索には、電波天文学・ 建築構造学の両者からの要請や鏡面上の積載物の重量を考慮した。構造最適化の結果、軽量かつ高剛性な構 造を複数得ることができた。その中でも、鏡面の変形量が小さい構造では、理想的な放物面からの変形を約 72 µm 、重量を約134 tons まで最小化した。最適化された構造はいずれも、周方向の部材同士が互いに引っ 張り合い、望遠鏡の変形を抑える性質が見られたほか、仰角の低い場合には望遠鏡構造の光軸方向の変形を 半径方向・斜め方向の部材が支える様子も見られた。

#### 1 Introduction

大型サブミリ波望遠鏡 (LST, Kawabe et al. (2016)) はチリ共和国に建設を予定している口径 50 m のサブミリ波単一鏡である。サブミリ波の領域にお いては、近年の ALMA による高感度・高空間分解 能観測により、遠方銀河や原始惑星系円盤などさま ざまな天体の物理的・化学的性質が解明されるなど 革新的な成果が次々と挙げられている。しかしなが ら、干渉計である ALMA は視野が狭く、サーベイ観 測には適していない。LST は、この現状を打破すべ く計画された大型単一鏡である。高感度を有しなが らも広視野観測が可能であるため、サブミリ波によ る天文観測において、ALMA と相補的な役割が期待 される。

LST の実現には、高い鏡面精度 (<45 µm RMS) と 高い駆動性能が必要である。LST のアンテナの口径 は 50 m と非常に大きく、自重変形、熱変形、風変形 によって鏡面は大きく変形し、鏡面精度が悪化する。 これらの変形は、重力による予測可能な静的変形と 熱や風による予測不可能な動的変形に分類され、静 的変形を最小限に抑えるには、複数の分割鏡からな る主鏡を支える主鏡支持構造の設計において、その 剛性を高めることが重要である。また、軽量な構造 は高い駆動性能の実現に不可欠であるだけではなく、 望遠鏡の熱性能にも直接影響を与える要素である。し かしながら、高剛性と軽量性は互いにトレードオフ の関係にあるうえに、LSTの主鏡支持構造のような 巨大な構造物を構成する部材の数は数万に上る。こ の構造を構成するトラス材の配置の仕方、すなわち 部材の組み合わせは無数に存在するため、従来の構 造設計ではLST の仕様を満たす構造を探索すること は困難である。

上述のタイプの問題は、統計科学では組み合わせ 最適化問題と呼ばれており、有効な解法が知られて いる。さらに、近年のコンピュータの発展によって、 この問題の有用な近似解を現実的な時間で求められ るようになった。天文学においても、せいめい望遠 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

鏡の軽量架台の設計において構造最適化が行われた (Kurita et al. 2010) ほか、口径 60 m の大型電波望 遠鏡の主鏡支持構造に対しても数値的に最適化が行 われた例 (Gao et al. 2022) がある。

#### 2 Methods

#### 2.1 構造最適化問題

#### 2.1.1 最適化する構造

本研究における構造最適化の対象となる構造は、 LSTのデザイン案として提案された図面から読み取っ た口径 50 m のパラボラの形状をした主鏡支持構造で ある (図 1)。主鏡支持構造は、センターハブと呼ば れるリング状の堅い構造で支持されたトラス構造で ある (図 2)。

#### 2.1.2 問題の定義

本研究では、上記の構造をもとに電波天文学およ び建築構造学からの要求を満たす軽量かつ高剛性な 主鏡支持構造を設計することを目指す。すなわち、要 求を満たすトラスを構成する節点と直線部材の配置 を求める。

本研究で最小化する量 (目的関数) は、主鏡支持構 造の重量と、仰角 85°と 30°において自重変形を受 けて変形した鏡面の理想放物面からの逸脱量の最大 値である。重量は直線部材と節点部材の総重量とし、 逸脱量は仰角 85°の場合と 30°における場合の平均 で評価し、それぞれの場合において仰角 50°での補 正を考慮した。

同時に、電波天文学から要請される開口能率の制約、建築構造学から要請される応力制約を守ることを仰角85°の場合と30°の場合に要請する(制約条件)。開口能率に関する制約は、望遠鏡の変形によって生じる鏡面の変形を天体から到来する電波の光路差に変換した後、観測波長を仮定しさらに位相差に変換する。このようにして見積もった位相差によって引き起こされる開口能率の損失が90%を下回らないという制約を課す。応力制約は建築構造学の許容応力度設計に基づく計算から、それぞれの直線部材がそこにかかる力に耐えられることを要請するものである。両者とも算出した量が制約値の95%以上の

とき、制約値と最大値の比に比例するペナルティを 目的関数に掛けることで解としての評価を下げて制 約を満たす個体を探索する。

また、本研究で最適化を変数は節点配置と部材断 面積であり、節点配置は図1に示す点が対象であり、 各変数の範囲から離散的に12種類の配置を取れるも のとした (図2)。部材断面積は、せいめい望遠鏡でも 使用実績のある太陽工業株式会社の TM トラスを用 いると仮定し、外径 48.6 mm から 318.5 mm の鉄製 の直線部材 12種類から選べるように設定した。本研 究では、これらの変数を回転対称性に基づき適宜グ ルーピングすることで、計算コストの低減を図った。

#### 2.2 遺伝的アルゴリズム

本研究では、この構造最適化を組合せ最適化問題 とみなし、その解法として遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた。このアルゴリズムでは、与えられた問題 の解を遺伝子の集合である個体で表現し、つぎの手 順で近似的な最適解を探索する。

- 1. 初期化: 個体をランダムに多数生成し、これを 初期世代とする
- 2. 評価: 各個体の適合度を評価する
- 3. 選択・淘汰: 適合度の高い個体を選択する
- 交叉:選ばれた個体同士で交叉を行い、次世代の個体を生成する
- 5. 突然変異:一定の確率で、一部の個体の遺伝子 がランダムに変化する突然変異を発生させる
- 4,5を次世代の個体数が初期世代と等しくなる まで繰り返す
- 7.2-6を予め設定した終了を満たすまで繰り返す

本研究の場合、節点の初期配置と部材断面積を遺伝 子、それによって定義される主鏡支持構造を個体に 対応させる。この手法は、集団による探索による広 範囲な解空間における解の探索や離散的な取り扱い が容易な点が特徴で、本研究のような組合せ最適化 問題に対して有効である。本研究では目的関数は2 つ存在するため、両者を同時に最小化可能な多目的 GA の1つである NSGA-II(Deb et al. 2002)を採用



図 1: 本研究で最適化する構造の (a) 節点、(b) 部材 の分布。図は鏡面を上から見た視点で描画されてい る。図の色に従って節点及び部材断面積の初期配置 をグループピングする。

した。本研究では、最大世代数を 10000 世代に設定 し最適化を行う。

#### 3 Results

最適化の結果、359 個の構造が得られた。最適化前後の目的関数空間における解の分布を図3に示す。最 適化された個体は、逸脱量が71.56 µm から229.8 µm、 重量が64.75 tons から134.5 tons に分布し、両目的 関数がトレードオフの関係にあることがわかった。 また、全個体が制約条件として課した2条件を満た した。



図 2: 最適化する構造の半径方向の断面図。最適化の 対象となる節点の初期配置のうち (a) r 方向、(b) z 方向への基準からのずれの範囲。各変数に対し、取 りうる範囲を 11 等分し、そこに基準点への配置を表 す ±0 m を加えた計 12 通りの配置を考える。



図 3: 2つの目的関数を軸にとった平面に、最適化前 の構造と最適化後の構造をプロットした図。最適化 後の個体の集合は、逸脱量と重量が互いにトレード オフの関係にある。

#### 4 Discussion

#### 4.1 最適解の鏡面精度

最適化では、(Kurita et al. 2010) を参考にしたた め目的関数に取り込まなかったが、最適化前後で個 体群の鏡面の RMS を計算し、比較した。最適化前 に 58.43 µm RMS から 4607 µm RMS に分布してい た鏡面精度は 39.31 µm RMS から 108.6 µm RMS に まで減少した。理想放物面からの逸脱量を最小化す る方法でも、鏡面精度を向上させる効果があること を確認した。

#### 4.2 最適解の構造の特性

図4に最も逸脱量の小さい個体が作る構造の変形 の様子を示す。(a)では周方向の部材の断面積が大き いことに加え、大きな引張を受けている。これは、周 方向の部材が樽のたがのような役割を果たすことで、 構造全体が自重で外側へ広がるのを抑えていると理 解できる。(b)では、地側の半径方向の部材とその周 辺の斜材に大きな引張力が作用している。これは、仰 角が下がり鏡面の下側が垂れようとするのをこれら の部材が引っ張り上げることで、逸脱量を小さくし ようとしている。半径方向だけでなく周辺の斜材が 引張力を受けることで、効率よく鏡面の変形を抑え ることができている。また、半径方向の部材断面積 の分布を見ると、中心付近では断面積の大きい部材 が多い一方で、外側では断面積が小さい部材が多い。 これは、中心付近で大きな力やモーメントを受けら れる部材を配置する一方で、半径方向の力のモーメ ントを小さくするために外側に断面積の小さい部材 が自然と選ばれたと考えられる。

#### 5 Conclusion

本研究では、LST のデザイン案を参考に作成した 主鏡支持構造の節点配置と部材断面積を、GA を用 いて最適化した。その結果、逸脱量が71.56 µm から 229.8 µm、重量が64.75 tons から134.5 tons の個体 の集合が得られ、両目的関数が互いにトレードオフ の関係にあることがわかった。最適化の際に設定し た構造が天文学と建築構造学からの要請を守るとい う制約は得られた全個体が守っていた。最適化され



図 4: 最適化の結果得られた構造のうち、逸脱量が最 も小さい個体の (a) 仰角 85°、 (b) 仰角 30° における 変形の様子。図中の赤い点は変形前の節点配置、構 造は変形後の構造、線の太さは部材断面積、線の色 は直線部材にかかる応力(圧縮は青、引張は赤)を 表す。なお、変形は計算された量の 500 倍に誇張し てある。

た構造は RMS も小さく、部材の配置も適材適所にな るように選ばれており、GA による構造最適化の有 効性を確かめられた。

#### Acknowledgement

Data analysis was in part carried out on the Multi-wavelength Data Analysis System operated by the Astronomy Data Center (ADC), National Astronomical Observatory of Japan.

#### Reference

- Deb et al. 2002, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6, 182
- Gao et al. 2022, JATIS, Volume 8, 028001
- Kawabe et al. 2016, SPIE Proc., 9906, 12
- Kurita et al. 2010, SPIE Proc., 7733, 11
- 薫田 2009, 名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専 攻, 修士論文

-index へ戻る

### 観測 a07

ミリ波補償光学の開発:波面計測データを用いた野辺 山 45 m 望遠鏡主鏡面の重力変形のモデリング

### 岩上 耕太朗

### ミリ波補償光学の開発: 波面計測データを用いた野辺山 45 m 望遠鏡 主鏡面の重力変形のモデリング

岩上 耕太朗 (名古屋大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

サブミリ波干渉計が高分解能の観測を可能にする現在、広い視野と高い感度を武器とした次世代の大型単一 鏡型サブミリ波望遠鏡の建設計画が進んでいる。広視野・高感度の両立に大口径化が必要となる一方、構造の 大型化は風・熱・重力の影響を受けて鏡面精度を低下させる。特に、風・熱による変形は時間変動が大きく予 測も困難であるため、サブミリ波帯においてこれを補償する技術は確立されていない。そこで我々は、鏡面 精度の低下を実時間で補償するミリ波補償光学(MAO)の技術開発を進めている。このシステムでは、アン テナ構造の変形に起因する波面の歪みを、主鏡面に設置した参照信号源から受信機までの超過経路長(EPL) として実時間で検出する。

今回、野辺山 45 m 電波望遠鏡の主鏡面上に設置した 5 つの波面センサを用いて、仰角を短時間で大きく動 かした際の EPL を測定した。本実験では自重変形の仰角依存性を定量的に測定するために、風や熱の影響が 小さくなる環境下で実施した。測定された EPL に対して、ホモロガス構造による主鏡面の変形を仮定して モデリングしたところ、仰角が下がるにつれ放物面が閉じる変形を表す結果が得られた。この結果より、測 定された波面の変形をホモロガス変形する主鏡面で説明できることが確認できた。また、アンテナ構造の重 力変形 (ホモロガス変形) を MAO の波面センサを用いて検出できることが示された。

#### 1 Introduction

現在、ALMAを代表とするサブミリ波干渉計との相 補的な役割を目指し、南米チリに口径 50 m の単一鏡 型大型サブミリ波望遠鏡 LST(Large Submillimeter Telescope)(Kawabe et al. 2016)を建設する計画が 進められている。広い視野・広い周波数帯域幅を特 徴とし、既存のものに比べて格段に高い探査能力が 期待される。ミリ波サブミリ波帯における大規模な 分光撮像観測で、宇宙最初期からの銀河進化史を明 らかにすることが1つの目標である。LST の実現に は、鏡面精度を維持しつつ口径を大きくすることが 求められる。

このような大型の電波望遠鏡の場合、望遠鏡全体 を囲むような大型の構造物は設置困難である。その ため、アンテナ主鏡面は常に風と日射にさらされ、風 負荷や熱膨張によってアンテナ主鏡面は変形してし まう。また、その構造の大きさと自重による重力変 形も無視できない。アンテナの仰角が変わるとアン テナ主鏡面に対する重力の向きも変化するため、仰 角変化に伴って重力変形の様子が変わる。電波を用 いた観測では、大気の影響に比べて、重力・風・熱 といった要因によるアンテナ主鏡面の鏡面精度の低 下が観測精度に大きな影響を与える。次世代の大型 サブミリ波望遠鏡の実現には、これらによる波面の 劣化を克服することが必要である。

鏡面精度の低下の要因である風変形・熱変形・重 力変形は、その再現性を考慮した特徴から、"重力変 形"と"風変形・熱変形"の2種類に区別できる。

重力変形は仰角の変化のみに依存することから、再 現性があり予測可能である。これは、既存技術であ るホモロガス構造によって影響を抑えることが可能 である。ホモロガス構造が採用されたアンテナ主鏡 面は、仰角の変化に伴って重力変形が起きても、変 形後に新たな放物面を構成する。副鏡を新たな焦点 位置に調整することで集光能力を維持し、重力変形 による影響を抑えることができる。

一方、風変形・熱変形はその影響の再現性を確認す ることは難しく、予測も困難である。このような変形 に対して、鏡面精度の低下を実時間で補償することを 目指し、我々はミリ波補償光学(MAO: Millimetric Adaptive Optics)の技術開発を進めている。


図 1: MAO における波面センサの概念図 (Tamura et al. 2020)

#### 2 Methods

#### 2.1 補償光学(AO)

補償光学(AO:Adaptive Optics)とは、予測困 難な要因で引き起こされる画像のぼやけ(波面の歪 み)を「波面センサ」と「可変形鏡」を組み合わせ たシステムで補償する技術である。以下で示す2つ の手順を素早く繰り返すことで、実時間での補償が 可能になる。

- 1. 「波面センサ」で波面の歪みを測定する
- 2. 測定された歪みをもとに「可変形鏡」をアクチュ エータで制御し、波面の歪みを補正する

可視光赤外線領域においては既に補償光学技術は実 用化されており、後者の「可変形鏡」に関する技術 は、MAO にも適用することが可能である。

#### 2.2 ミリ波補償光学(MAO)

MAO において現在開発を進めているのが、波面セ ンサにおいて波面変形を計測する技術である。この 技術の基礎となるのは、電波干渉計にも用いられて いる開口面干渉法であり、2つの信号の到達時間差か ら幾何学的遅延を求め、波面の変形を計測する手法 である。MAO における波面センサの概念図を 図1 に示した。まず、参照信号発生器から2つの経路に 信号を送る。一方は主鏡面上に設置した放射器から 放射し、副鏡を経由して相関器に送られるが、もう 一方は直接相関器へ送られる。別々の経路を辿った2 つの信号を相関器で干渉させることで、2つの信号の 到達時間差 τ が得られ、これに光速 c をかけること で超過経路長(EPL: Excess Path Length)を計算 することができる。EPLは2つの信号の経路差を表 している。例えば、主鏡面の変形で放射器の位置が ずれると経路長も変化し、EPL にも変化が現れる。 我々は、EPL の変化を解析することで、主鏡面変形 の様子を明らかにすることが目的である。2020年に 行われた実証実験 (Nakano et al. 2022) では、主鏡 面上の2ヶ所に放射器を設置し、MAO 波面センサで 測定された EPL の時間変化から主鏡面の変形を検出 可能であることが示された。

#### 3 Experiment

我々は、2022年に野辺山45m電波望遠鏡を用い て波面センサの実証実験を行った。2020年の実証実 験に比べ、主鏡面上に設置する放射器を5ヶ所に増や し主鏡面全体を捉えるられるように発展させた(図 2)。本実験の目的は、重力変形による波面変化の様 子を測定し、それをモデルで再現することで、主鏡 面の重力変形を推定することである。具体的には、望 遠鏡の仰角を短時間(約10分間)で大きく(13-72 度)変化させた時のEPLを測定した。この実験を、 風の弱い時間帯(平均風速1.3 m/s)に実施し、実験 時間を熱変形の時間スケールに比べて短くした。こ のような環境下で実施することで、風変形・熱変形 の影響が小さく、重力変形が支配的になり、重力変 形の仰角依存性を定量的に測定した。



図 2: 本実験の概念図と主鏡面上に設置した放射器の 位置

(Tamura et al. 2020)

#### 4 Results and Discussion

#### 4.1 測定された EPL



#### 4.2 重力変形のモデリング

#### 4.2.1 ホモロガス変形を表現したモデルの構築

得られた EPL をもとに、主鏡面の重力変形をモデ リングを行った。野辺山 45 m 電波望遠鏡の主鏡面は ホモロガス構造が採用されていることから、主鏡面 の重力変形を図 4 で示すようなホモロガス変形と仮 定し、変形の様子やそれぞれの変形量を推定した。各 微小変化量は、δf が焦点距離の変化、δx,δz が平行 移動、δφf が光軸の傾き(放物面の回転)を表現し ている。



図 3: 仰角を上昇させた時間帯の

Top,Bottom,Right,Center の放射器において測定さ れた EPL の時間変化. ある時刻で全 EPL が 0 mm となるように処理している(基準をとっている).



図 4: ホモロガス変形を表す 4 つの微小変化量  $\delta f, \delta x, \delta z, \delta \phi$  をパラメータとし、主鏡面の重力変形 をモデリング

#### 4.2.2 モデリングの結果

モデリングの結果、パラメータとした各微小変化 量の値や振る舞いが推定できた。



図 5: 微小変化量 δf の結果

図5で $\delta f$ の結果を示す。焦点距離の変化を示す $\delta f$ は、仰角の増加(15–72度)に伴って約2cm伸びる結果が得られた。これは、望遠鏡が上を向くにつれて主鏡面を形作るパラボラが広がる変形を表しており、予想と一致する。その他の微小変化量 $\delta x, \delta z, \delta \phi$ の結果は、計算によって複数の異なる解を得た。これは、それぞれが縮退しているためと考えられるが、さらなる解析や考察が必要である。ただし、これらはどの結果も数cm程度の変化量を示すことから、予想と一致しスケールも妥当な結果である。これらの結果より、本実験で測定された EPL の変化は、主鏡面のホモロガス変形で説明可能なことが示された。

#### 4.2.3 波面の再現

モデリング結果をもとに、主鏡面全体の波面変形 の様子を図6で示す。基準となる面を仰角が36度の 状態として、任意の仰角における波面全体の様子を 再構築した。構造に対して重力の影響を受けやすい 面の上下方向で変化が大きいことが分かる。

#### 5 Conclusion

今回、野辺山 45 m 望遠鏡の主鏡面上に設置した MAO の波面センサを用いて、望遠鏡の重力変形に よる EPL の変化を測定した。解析の結果、アンテナ 構造の重力変形を MAO の波面センサを用いて実時 間で検出できることが確認できた。また、測定され



図 6: 主鏡面全体での波面変形の様子を再現したもの

た EPL に対して、ホモロガス構造による変形を仮定 してモデリングしたところ、波面の歪みを主鏡面の ホモロガス変形で説明可能なことが示された。そし て、モデリング結果より任意の仰角における波面全 体の変形の様子を再現することが可能となった。

今後の展望として、ホモロガス変形の変化の様子 をより詳細に明らかにしたいと考えている。現状で は解が複数存在している δx, δz, δφ について解析を進 める予定である。また、風変形が支配的な状況下で の測定データの解析も行いたいと考えている。MAO の主な補償対象である風の影響が、波面の変形にど う影響を与えるのか明らかにすることは、MAO の 実現に向けて重要である。

#### Reference

Kawabe et al. 2016, Proc. SPIE, 9906, 990626
Tamura et al. 2020, Proc. SPIE, 11445, 114451N
Nakano et al. 2022, Proc. SPIE, 12185, 121856Z

### 観測a08

# CMB精密観測衛星LiteBIRDに向けた偏光変調器のための低温連続回転機構の開発

### 秋澤 涼介

#### CMB 精密観測衛星 LiteBIRD に向けた 偏光変調器のための低温連続回転機構の開発

秋澤 涼介 (東京大学大学院 理学系研究科 / Kavli IPMU)

#### Abstract

JAXA 宇宙科学研究所戦略的中型衛星 LiteBIRD は宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background; CMB) 偏光パターンを全天で精密観測することでインフレーション起源の原始重力波を探索するこ とを目指した観測衛星であり、テンソル・スカラー比 r の不確かさ  $\delta r < 0.001$  を感度目標とする。CMB 偏 光を精密に観測することで、代表的なインフレーションモデルに観測的な制限をもたらす。この感度を実現 するために、我々は LiteBIRD 低周波望遠鏡 (Low-Frequency Telescope) のための偏光変調器を開発してい る。これは入射した偏光を変調することによって検出器の系統誤差および低周波ノイズ (1/f ゆらぎ) を低減 する重要な開発項目である。特にこの偏光変調器は5 K の低温下で数 mW の低発熱で駆動することが要求 される。本集録では偏光変調器の概要をまとめるとともに、現在取り組んでいる低温保持機構用リニアアク チュエータのための高純度導線を用いたステッピングモーターに焦点をあて、低温での発熱特性測定につい て報告する。

キーワード:宇宙マイクロ波背景放射、原始重力波、インフレーション、偏光変調器, LiteBIRD

#### 1 Introduction

現在確立されている標準ビックバン宇宙論である ACDM モデルは、宇宙マイクロ波背景放射(CMB) を含む観測結果によって、6つの宇宙論パラメータで 記述される。一方でこのモデルでは地平線問題や平 坦性問題、初期宇宙における密度揺らぎなどの観測 的事実については説明しない。この事実を解決するた めに宇宙初期における「インフレーション仮説」が提 唱されている。テンソル・スカラー比rは原始重力波 のパワースペクトル Ph と空間曲率ゆらぎのパワース ペクトル  $P_c$  の比として定義され、 $r = P_h/P_c$  として 書ける。現在の代表的なインフレーションモデルでは r < 0.032 (95% C.L.) と制限している (M.Tristram et al. 2021)。インフレーション中に成長した原始重 力波のうちのクロスモード hx はトムソン散乱を介 して宇宙マイクロ波背景放射(以下 CMB)の偏光に 奇パリティの四重極成分「B モード」を刻む。一方 で密度揺らぎとプラスモード h<sub>+</sub> は CMB 偏光に E モード (偶パリティ) を刻むから、CMB の B モード 偏光を大角度スケールで精密に観測することで、原 始重力波の証拠を探索することができる。

一方で CMB は観測可能な光として最も遠方から 到来するため、我々が得られる観測データには「前 景放射」が含まれる。この「前景放射」は主にシン クロトロン放射と星間ダストによる放射である。観 測データから原始重力波由来のBモードを得るには、 CMBと前景放射の周波数依存性が異なることを利用 して、**広い周波数帯域**での観測を行うことで前景放 射を区別する必要がある。

CMB に刻まれた B モード偏光の痕跡を探索し、 人類の根源的な問いに挑戦するのが科学衛星 Lite-BIRD(図 1) である。LiteBIRD は CMB 偏光パター ンを全天で精密観測し、r = 0 の場合テンソル・ス カラー比 r の不確かさ  $\delta r < 0.001$  を感度目標とす る。LiteBIRD は 34 ~ 448 GHz の広帯域を 15 バン ドに分け帯域ごとに 3 つの望遠鏡で観測する。日本 は 34 ~ 161 GHz をカバーする低周波望遠鏡 (Low Frequency Telescope; LFT) を担当しており、その 中でも Kavli IPMU が中心となって開発している**偏** 光変調器 (Y. Sakurai et al. 2020) に焦点をあてて次 章から述べる。

#### 2 Instruments

LiteBIRD LFT のための偏光変調器 (Polarization modulator unit; PMU) は、広帯域サファイア半波長 板 (Sapphire Half-wave plate; HWP) と低温連続回

#### 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校



図 1. LiteBIRD のイメージ図:日本は低周波望遠鏡 (LFT)の開発を担当している。(E.Allys et al. 2022)

転機構から構成される。(図 2)。この PMU は CMB から到来した光が検出器に到達する前に、回転する 半波長版によって入射偏光に対して変調をかける。半 波長板を周波数 f で回すとき変調された出射偏光は 4fの周波数を持つ。変調周波数を検出器由来の1/f ノイズよりも高くすることで、信号の揺らぎと検出 器の揺らぎの縮退を解く。また半波長板の回転周波 数を常に測ることで入射偏光の周波数を復調できる。 加えて半波長板の回転に伴って偏光が回転するため、 単一の検出器による読み出しが可能になり系統誤差 を減らすことができる。この PMU は5 K の低温下 で数 mW の低発熱で駆動することが要求される。



図 2. 偏光変調器の全体図 (T. Hasebe et al. 2022)

#### 広帯域反射防止モスアイ構造付き多層 2.1サファイア半波長板

低周波望遠鏡 LFT の観測帯域は 34 ~ 161 GHz で CMB 望遠鏡の中でも最も広い。ゆえに低温で動作す 網かけで示した固定子と回転子に分けられる。固定子

る偏光変調器の半波長板には 20 K の低温で広帯域に おいて機能することが求められる。また半波長板に 用いるサファイアはミリ波に対しての屈折率が高い ため、表面に反射防止を施すことで広帯域での高い 透過率を実現しなければならない。まずサファイア の光学軸をずらして5枚重ねることで広帯域におい て半波長板として機能させる。その5層サファイア半 波長板の両面に、広帯域反射防止としてモスアイ構 造と呼ばれるピラミッド構造 (高さ 2mm, ピッチ 0.5 mm)を施す。これは多層膜コーティングなど既存の 反射防止技術が抱える低温での薄膜の剥離や広帯域 化といった問題を解決する技術で、我々は**超短パル スレーザー**加工を用いてモスアイ構造を直接サファ イアに施すという技術をリードしてきた (R. Takaku 2022)。



図 3. モスアイ構造の外観 (R. Takaku 2022)

#### 低温連続回転機構 2.2

前述のサファイア半波長板によって入射直線偏光を 変調するには半波長板を回転させる必要がある。この 回転機構は熱ノイズを低減するためにおよそ5Kの 低温下で運用するため、衛星の限られたリソースで 実現するにはその発熱を考慮する必要がある。現在 検討されている許容発熱量は数 mW であり、これを 達成するような低温連続回転機構では、構成部品全 てにおける発熱に注目し低減させねばならない。こ の低温連続回転機構は、(1)低発熱・長寿命化のため の磁気浮上による回転機構と、(2)半波長板の回転角 度検出のためのエンコーダ、(3) 低温保持機構から構 成される。各部について以下で詳細を述べる。

#### (1) 超伝導磁気軸受による回転機構 2.3

低温連続回転機構(図4)は大きく紫色および黄色の



図 4. 低温連続回転機構の断面図 (T. Hasebe et al. (2022) より一部改変)

は YBCO 高温超伝導体、回転子は SmCo マグネット をもち超伝導磁気軸受 (superconducting magnet bearing; SMB) と呼ぶ非接触回転機構を構成する。 回転子に配置された SmCoマグネットは、固定子側の YBCO 超伝導体に対して外部磁場を及ぼす。YBCO 超伝導体は転移温度 T<sub>c</sub> = 95 K 以下では超伝導状態 になり、この外部磁場に対して磁束ピン止め効果を 生じる。このピン止め効果を利用して、永久磁石と 超伝導体の間に作用する磁気力によって半波長板を 搭載した回転子を安定的に浮上させることができる。 この磁気浮上した回転子を回すためにはきっかけに なる角運動量が必要である。これには図4の水色枠 で示した高純度銅線コイルとマグネットを用いて、コ イルに3相交流を流すことでモーターのように磁気 浮上した回転子を回転させる。このような非接触回 転機構は摩擦熱のない低発熱かつ長寿命な回転を実 現する。

#### 2.4 (2) 光学式エンコーダシステム

半波長板の回転周波数と回転角度は、64 個の切り 欠き付きのエンコーダーディスクと LED およびフォ トダイオード (図 4, 緑枠) によって測定される。LED とフォトダイオードは互いに向かい合わせに設置さ れ、エンコーダディスクの切り欠きが光路上を通過 する。回転子とともにエンコーダーディスクが回転 し LED の光をチョップするから、フォトダイオード に入る信号の回数と時間を測定することで回転子の 回転周波数と回転角度を再構成できる。

#### 2.5 (3) 低温保持機構 (Gripper)

半波長板を乗せた回転子は固定子側の YBCO 超伝 導体が転移温度に達するまで低温で動作するグリッ パー(図 4, 黄枠)によって固定される。グリッパー はステッピングモーターによって半径方向に駆動さ れ、衛星打ち上げ後に回転子が超伝導状態に転移し たのちにリリースすることができる。また回転子が ひとたび磁気浮上してしまえば、冷やすためには放 射による熱交換しかできない。ゆえにこの保持機構 が半波長板と回転子全体を冷やす熱伝導経路の役目 も担っている。

#### 3 高純度銅線を用いたステッピン グモーターの発熱測定

前述のグリッパーの駆動に必要なステッピングモー ターも検討すべき発熱源である。モーターの発熱を測 定することで、冷却系に適した駆動時間や速度を検討 することができる。モーターの発熱は機械損 P<sub>mech</sub>、 ジュール熱 P<sub>Joule</sub>、ヒステリシス損 P<sub>hys</sub>、渦電流損 P<sub>eddy</sub> が原因となる。総発熱量 P<sub>tot</sub> はこれら 4 つの 要因の和としてかけて次式のようなパラメータ依存 性を持つ。

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{mech}} + P_{\text{Joule}}(I^2, R) + P_{\text{hys}}(B^{1.6}, f, V) + P_{\text{eddy}}(B^2, f^2, t^2, V) \quad (1)$$

ここでそれぞれのパラメータは表 1 の通りである。 またヒステリシス損と渦電流損はまとめて鉄損 P<sub>Iron</sub> と呼ばれる。

	表 1.	ステッ	ピング	モータ	ーの発熱パラ	メーク	2
--	------	-----	-----	-----	--------	-----	---

Ι	コイルの交流電流
R	コイルの抵抗値
f	モーターの回転周波数
B	マグネットの磁束密度
t	鉄心の積層厚さ
V	鉄心の体積

これまでの研究で (a) コイルに通常のマグネット ワイヤーを用いたモーター ( $RRR^1 = 131$ ) と (b) コ

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>残留抵抗比 (Residual Resistivity Ratio; RRR) は次の電気 伝導率の比として定義される。 $RRR = \rho_{273 \text{ K}}/\rho_{4 \text{ K}}$ 

イルに高純度銅線 (*RRR* = 2769)、ケースに GFRP を用いたモーターを用意しそれぞれの 15 K における 発熱測定が行われてきた。

#### 4 Measurement & Discussion

モーターには2つのコイルが用いられていて、そ れぞれの測定値は15 K下において表2のようであっ た。高純度銅線を用いることで抵抗値が小さくなっ ていることが確認できた。

表 2. コイルの抵抗値の測定結果

	(a)RRR = 131	(b) $RRR = 2769$
コイル1	$41.9 \text{ m}\Omega$	$1.8~\mathrm{m}\Omega$
コイル 2	$40.3 \ \mathrm{m}\Omega$	$2.1~{ m m}\Omega$

次に振幅 590 mA、周波数 fi の交流電流をモーター に印加し回転させた。そのときの温度上昇 ΔT を測 定し校正曲線を用いて発熱 Pm.OP に変換した。校正 曲線はモーターを回転させずに直流電流を流したと きのコイルの温度上昇と発熱から求めた。測定結果 を図5に示した。図5からモーター回転時の総発熱 量 P<sub>m,OP</sub> はいずれの回転周波数でも高純度銅線を用 いたモーターで小さいことを確認した。一方でこの 発熱の違いはコイルのジュール熱の違いによる寄与 が大きいことがわかっており、モーターのヨーク材 にヒステリシス曲線の小さい材料を採用したり、回 転周波数を抑えて運用したりすることでこの発熱を 低減することを検討している。現在は図6のような 4K-GM クライオスタットを用いて、仕様温度 10 K 以下での発熱試験を実施しており、冷却のための熱 伝導性の改善や DAQ およびモーターコントロール システムの構築を並行しながら進めている。

このステッピングモーターの発熱測定をはじめと して偏光変調器の各部における低発熱化を実現した のち、大型冷凍機と光学系を用いて実際に低温光学 評価を行う予定である。

#### Reference

E. Allys et al., Prog. Theor. Exp. Phys., 2023 042F01(2022)

M.Tristram et al., Phys. Rev. D, 105 083524(2021)



図 5. 回転時の発熱と回転周波数の関係:モーター a(青線)とb(橙色)を表す。



図 6.4K クライオスタットでの試験準備の様子

- Y. Sakurai et al., SPIE Conf. Ser, 11453 114534E(2020)
- R. Takaku, A Broadband Half-wave Plate for a Spaceborne CMB Polarimeter Using Laser Ablation, Ph.D Thesis(2022)
- T. Hasebe et al., Proc. of SPIE **12180** 1218053-1(2022)
- T. Iida et al., "15 K 下におけるステッピングモーターの 発熱量の実験的見積もり", 第 105 回 低温工学・超電導 学会研究発表会

### 観測a09

# CMB精密偏光観測LiteBIRDに向けた偏光変調器のための広帯域反射防止モスアイ構造の開発

### 相澤 耕佑

# 未提出

—index へ戻る

### 観測a10

### 数値シミュレーションによる近赤外線円偏光波の輸送 過程の研究

### 市村 一晟

#### 数値シミュレーションによる近赤外線偏光波の輸送過程の研究

市村 一晟 (筑波大学大学院 数理物質科学研究群)

#### Abstract

医療診断で近赤外線円偏光がガンの検出に有効である可能性が近年提案された。先行研究 (Nishizawa et al 2021)では、実際にガン細胞片と正常細胞片に完全右回り円偏光を入射しその散乱光の 円偏光度 (DOCP)を計測する実験が行われた。その実験では、ガン細胞片と正常細胞片の散乱光の円偏光 度に差があるという結果が得られている。よって入射光を円偏光にし、散乱光の円偏光度を計測することに よって散乱体がガン細胞なのか正常細胞なのかを区別できるのではないかと期待されている。

そこで本研究では、Mie 理論から光が散乱する際の散乱角を決めるための位相関数を導出した。そして、そ の位相関数を用いてガン細胞と正常細胞それぞれを仮定した一様媒質でのモンテカルロ法による3次元輻射 輸送シミュレーションの計算コードを作成し、完全右回り円偏光波が輸送されるにつれて円偏光度がどのよ うに変化するのかを調査した。その結果、完全右回り円偏光波を入射した位置から0.36 cm までは、媒質を ガン細胞にした場合と正常細胞にした場合で円偏光度に差が見られた。これは位相関数を調べると、媒質が ガン細胞の場合の方がより直線的な前方散乱が起こる可能性が高いことから、光子の散乱の際に円偏光度が 保たれやすいためだと考えられる。

#### 1 Introduction

現在の天文観測の研究では、星間ダストや磁場の 構造を明らかにするために偏光観測が用いられる。実 際に (Kataoka et al 2016)の研究では ALMA 偏光観 測を用いて、原始惑星系円盤 HD142527 内で成長す るダストの最大サイズを調べている。

一方、医療分野においても偏光がガン診断に有用 である可能性が近年提案された。偏光は散乱体のサ イズの違いによって伝播の仕方が異なる。そしてガ ン細胞は正常な細胞よりも肥大化することが既に医 学的に明らかになっているため、伝播している偏光 を観測することでガン細胞と正常細胞を見分けるこ とが出来ると考えられている。さらに用いる偏光を 近赤外線偏光波にすることで、従来のレントゲンや CT 検査とは異なり、被ばくがないガン診断の可能性 が示唆されている。被ばくがないため、体が弱い小 さな子供や妊婦であっても気軽に診断を受けられる ことが期待されている。

先行研究 (Nishizawa et al 2021) では、実際にガ ン細胞片と正常細胞片に完全右回り円偏光を入射し、 その散乱光の円偏光度 (DOCP) を計測する実験が行 われた。その結果、がん細胞片と正常細胞片の円偏 光度に差が見られたため、完全右回り円偏光を用い てガン細胞を発見することができるのではないかと 考えられている。しかし、こういった先行研究では 結果に対する物理的な理解はほとんどされていない。

そこで本研究では、体内のどの位置まで完全右回 り円偏光が有用なのかを数値シミュレーションを用 いて定量的に明らかにする。そのために、偏光成分 を扱うことが出来る一様媒質でのモンテカルロ法を 用いた3次元輻射輸送計算コードを作成する。そし て作成した計算コードを用いて、完全右回り円偏光 が伝播するにつれて、円偏光度がどのように変化し ていくのかを調べる。

#### 2 偏光の性質と計算方法

#### 2.1 偏光の性質

振幅値を $E_{0x}, E_{0y}$ 、位相差を $\delta$ とすると直交する 電場の振動成分 $E_x, E_y$ は以下の式で表される。

$$E_x = E_{0x} \cos(\omega t - k_z)$$
$$E_y = E_{0y} \cos(\omega t - k_z + \delta)$$

位相差 $\delta = 0$ の場合は線偏光、 $\delta = \pi/2$ の場合は完 全右回り円偏光と呼ばれる偏光の種類になる。偏光 状態を表すストークスパラメータには、I,Q,U,Vの 4つのパラメータがある。I は入射光の強度を表し、 Q,Uは線偏光成分を表している。そして本研究で用 いる V は円偏光成分を表している。円偏光が右回り の場合は正、左回りの場合は負の値を取る。円偏光 度 (DOCP) はストークスパラメータの V/I で定義さ れる。円偏光が散乱する際、前方に散乱される方が 散乱前の V 値が保たれやすいという性質がある。

# 2.2 モンテカルロ法を用いた3次元輻射輸送の計算方法

本研究では、時間依存せず、散乱・吸収のみを考慮 した輻射輸送方程式を想定する。 $I_{\nu}$ :輻射強度、 $\mu_{a}$ : 吸収係数、 $\mu_{s}$ :散乱係数、s:光が進む距離、 $P(\Omega', \Omega)$ : 光が入射する方向 ( $\Omega'$ )から出ていく方向 ( $\Omega$ ) への散 乱の位相関数、として以下のように書き表す。

$$\frac{dI_{\nu}}{ds} = -(\mu_a + \mu_s)I_{\nu} + \mu_s \int I_{\nu}(\Omega')P(\Omega',\Omega)d\Omega'$$

散乱角を決めるための位相関数は以下の式で与えら れる。

$$C_{sca} = \frac{1}{k^2} \int d\Omega (S_{11}(\alpha)I_i + S_{12}(\alpha)Q_i\cos 2\beta + S_{12}(\alpha)U_i\sin 2\beta)$$

ここで  $C_{sca}$  は散乱断面積、 $S_{11}, S_{12}$  は散乱時の偏光 成分の変化を計算する際に用いる Muller Matrix と 呼ばれる行列の 11,12 成分、 $I_i, Q_i, U_i$  は散乱前の偏光 が持っているストークスパラメータ、k は波数、 $\alpha, \beta$ は散乱角を表している。

これらの輻射輸送方程式と位相関数を用いて、本 研究では図1で示されているステップでモンテカル ロ法を用いた輻射輸送計算を行った。



図 1: 今回行った計算のフローチャート

図1における、散乱が起こる確率 *P<sub>sca</sub>* と吸収が起 こる確率 *P<sub>abs</sub>* は以下の式で与えられる。

$$P_{sca} = \frac{\mu_s}{\mu_s + \mu_a}$$
$$P_{abs} = \frac{\mu_a}{\mu_s + \mu_a}$$

#### 2.3 計算のセットアップ

0.5 cm 四方の計算ボックスを仮定し、計算ボック ス内は一様媒質であるとした。一様媒質にはガン細 胞を想定した 11  $\mu$ m、正常細胞を想定した 6  $\mu$ m を 設定する。光子の入射位置は (0.25,0.25,0)cm とし、 入射方向は z 軸正方向とした。入射光子の初期偏光 状態は完全右回り円偏光 (V=1)を想定している。そ の他のパラメータは散乱係数  $\mu_s = 68.6$ /cm、吸収係 数  $\mu_a = 1.0$ /cm、入射波の波長=0.9  $\mu$ m である。

#### 3 計算結果

#### **3.1** 円偏光度の測定

前述した計算のセットアップで開口角 20 度の検出 器を z 軸上 0.04 cm ごとに置き、検出器に入る光子 の円偏光度の平均を計算することで、検出器の位置 ごとの円偏光度を測定した。入射光子数は 100 万個 である。



図 2: 円偏光度を測定した結果 (紫色:ガン細胞、緑 色:正常細胞)

紫色の線が媒質をガン細胞にした場合、緑色の線が 正常細胞にした場合である。図2を見ると、0.36 cm までは媒質がガン細胞と正常細胞の場合で円偏光度に 0.1~0.15 程の差が見られた。そのため、0.36 cm ま では円偏光度を観測することで散乱体がガン細胞かど うかを区別することが出来ると考えられる。0.36 cm 以降の測定は検出器に入る光子の数がかなり少なかっ たため、今回の結果には載せていない。





図 3: 偏光の伝播のイメージ図 (紫色:ガン細胞、緑 色:正常細胞)

計算ボックス内での偏光の伝播は、位相関数を調 べたところ媒質をガン細胞にした方が円偏光が前方 方向に散乱する確率が高いため、正常細胞の場合と 比較して図3のように検出器に直線的に飛んでくる 光子の数が多くなると考えられる。光子は前方に散 乱された場合の方が散乱前の偏光状態を保ちやすい。 そして直線的に飛んでくる光子の方がより前方に散 乱されて伝播しているので、初期の偏光状態(V=1) をより保っていると考えられる。このように媒質を ガン細胞にした場合の方が、初期の偏光状態を保ち やすい直線的に伝播する光子が多く検出される可能 性が高いため、図2のような円偏光度の違いが見ら れたと考えている。

#### 5 まとめと今後の展望

ガン細胞を区別するために、一様媒質を仮定した 計算ボックス内の完全右回り円偏光の伝播について 調査した。そのために、モンテカルロ法を用いた偏光 を扱える3次元輻射輸送計算コードを作成した。作 成した計算コードを用いて、完全右回り円偏光でガ ン細胞を区別する際にどの位置まで有用なのかを円 偏光度を測定することで調査した。

今後の展望としては、まずは入射光子数を 100 倍 程度増やした計算を行うことで 0.36 cm 以降の円偏 光度の変化を調査する。入射光子の偏光状態を線偏 光にした場合の伝播の様子を調べ、線偏光と円偏光 が伝播する際の性質の違いについて明らかにする。ガ ン細胞の大きさを現在は 11 µm にしているが、この 大きさを変えることで、ガン細胞の大きさと円偏光 の関係について定量的に明らかにする。これらのこ とを目的として研究を進めていきたいと考えている。

#### Reference

N.Nishizawa,B.Al-Qadi,T.Kuchimaru, 2021,14,e202000380 J.Biophotonics

A.Kataoka,T.Tsukagoshi,M.Momose,H.Nagai,T.Muto, Cornelis P.Dullemond,A.Pohl,M.Fukagawa,H.Shibai,T.Hanawa, & K.Murakawa, 2016,The astrophysical journal letters,831:L12

### 観測a11

### 低コストで光学的欠点のない赤外全天雲モニタの開発

### 小嶋 拓斗

#### 低コストで光学的欠点のない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

せいめい望遠鏡がある京都大学岡山天文台では雲の評価に適さない可視カメラによる雲モニタが行われてい て、より適した赤外線カメラを用いた全天雲モニタの導入が望まれる。しかし、従来の赤外線全天雲モニタ は高コストであったり、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 表示するシステムを開発し、実際に機能した。次に、この試作機を用いて視野内の歪曲を測定した。その結 果、正確な視野形状と必要な歪曲の補正量が得られた。この歪曲のデータを元に、カメラ配置を行い、12 個 のカメラで全天をカバーする配置を設計した。

#### 1 研究背景

#### 1.1 動機

京大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。しかし現在せいめいで使われているのは雲の 監視に適さない可視カメラである。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、定量的な雲量の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 ムがレンズの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。

二つ目は凸球面鏡と狭視野カメラを組み合わせて 全天を撮る方法である。これは空からの光を凸球面 鏡で反射させて天頂部にある狭視野の赤外カメラに 集めるという仕組みで、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にあ るカメラにより、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 せて全天を撮る方法である。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 (Risa Tsutsuki et al. 2022)。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。

#### 2 仕様

狭視野の廉価な赤外カメラを並べる方式により低 コストで光学的欠点のない雲モニターの開発を目指 した。ここで、「光学的欠点がない」とは、遮蔽がな く空間分解能が全方向で一様であることと定義する。 使用したカメラは、FLIR 社の Lepton3.5 で、これは 2 万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 ようなカメラ複数をマイコンに繋ぎ、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 無線で上位 PC にアップロードし、上位 PC は集約 された画像を一枚の全天画像に統合する。

#### 3 開発・実験

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。

- 1ch. システム開発
- 視野・歪曲の評価
- カメラ配置設計
- 複数 ch. システム開発
- 機械構造の制作
- 画像制作ソフトの制作

なお、ここで 1ch. システムとは一つのマイコンで 一つのカメラを制御し一枚の画像を読み出すシステ ムを指し、複数 ch. システムとは一つのマイコンで 複数のカメラを制御し、複数の画像を読み出すシス テムを指す。

1ch.システムの開発には、複数のカメラ扱う複数 ch.システムの前準備としての意味と、視野・歪曲の 評価に使うカメラの準備という意味がある。視野・歪 曲の評価の結果はカメラの配置設計および画像接続 ソフトの制作に用いる。得られた視野角からカメラ 配置の設計を行い、それに基づきカメラを固定する 機械構造を設計・製作する。これらのうち今まで1ch. システム開発、視野・歪曲の評価、カメラ配置設計 を完了した。以下、これらの開発の詳細を報告する。

#### 3.1 1ch. システム

1ch.システムの開発はカメラを複数繋ぐ前の段階 の、基礎となる一個のカメラについてのエンジニア リングである。Lepton3.5 はそれ単体では機能せず、 マイコンで制御をする必要があるため、マイコンと カメラモジュールを接続し、ソフトウェアを書き込 む「組み込み開発」が必要になる。私はマイコン、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、今回使用したマイコ ンで Lepton3.5 を制御するためのソフトウェアは配 布されてなかったため自らソフトウェアづくりを行っ た。次に、開発した 1ch.システムを用いて実際に夜 空の赤外画像を撮影した (図2)。このように、1chシ ステムは実際に機能した。



図 1: 開発した 1ch. システム



図 2: 1ch. システムで撮影した夜空の赤外画像

#### 3.2 視野・歪曲の評価

歪曲収差の評価実験の目的は次の二つである。

- 視野角を正確に把握するため。これは確実に全 天を捉えられるカメラ配置の設計に必要である。
- 複数の画像を一つの全点画像に統合するソフト ウェアづくりのため。画像を接続する際に歪曲 の補正が必要になる。

実験では、ハンドルで正確に角度の調整ができる回 転ステージにカメラをおき、カメラを回転させて一 定の角度ごとに熱源を撮影した (図3)。このとき、熱 源が画像の対角線上に映る角度にカメラを傾けてお き、全視野角について歪曲が評価できるようにした。

歪曲は理想像高・実像高の二つから算出される。理 想像高は歪曲がないと仮定した時の像の高さで、カ メラレンズの焦点距離を F、光軸と光線のなす角を θ とすると

#### 理想像高 = $f \tan \theta$

で求められる。この実験の場合、歪曲がゼロのカメ ラで熱源を撮影した場合に熱源が検出器の中心から



図 3: 実験を真上から見た模式図

どれだけ離れた位置に像を結ぶかを意味する。 θ は 回転ステージの目盛、ハンドルの回転数から知るこ とができる。

実像高は実際の像の高さである。撮影した熱源の 画像について、画像中心からの熱源のスポット重心 の距離 (ピクセル数) にピクセルピッチ (12 µm) をか けることでこれは求められる。

こうして得られた理想像高と実像高を用いて、

より歪曲が求められる。

実験で得られた各点での歪曲から、図4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ということを意味している。



図 4: 歪曲より作成したグリッドマップ

このように、正確な視野と歪曲の補正量が得られ た。

#### カメラ配置設計 3.3

づいた 3D モデルを製作した (図 5)。視野モデルはカ ムを開発し、実際に機能することを確認した。実験

メラの視野に収まる部分に対応する表面を紫色、カ メラに映らない部分に対応する側面を黄色に着色し た。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方向が あるとその部分のみ黄色く見える。この方法でどの カメラにも映らない方向ができないようにした。ま た、視野同士の重なる角度の最小値および視野と地 平線の重なる角度の最小値が最大になるように調整 した。最終的に図6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。



図 5: 視野の 3D モデル



図 6: 全天をカバーするカメラ配置

#### まとめ、今後の展望 4

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 まず、視野・歪曲評価の結果より得られた視野に基 し、今まで以下の開発・実験を行った。1ch. システ 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

により正確な視野と歪曲の補正量を得た。12 個で全 天をカバーするカメラ配置を設計した。今後は複数 ch.システムの開発、機械構造の制作、画像接続ソフ トの制作を行なっていく。

#### Reference

Risa Tsutsuki, Shigeyuki Sako, Hidenori Takahashi, Sohei Kondo, Satoshi Takita, Ryou Ohsawa, Jin Beniyama, Takashi Miyata, Takafumi Kamizuka, & Ichiro Takahashi 2022, Proc. of SPIE Vol. 12184 121848F

観測a12

### 超広視野4枚鏡望遠鏡の光学設計

### 河合 優樹

#### 超広視野4枚鏡望遠鏡の光学設計

河合 優樹 (京都大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

現在建設中の Large Synoptic Survey Telescope (LSST) は3枚鏡で視野 3.5 度を有するが、すべての鏡 が高コストな非球面鏡である。 これに対し我々は、球面の主鏡と副鏡からなる4枚の鏡で LSST と同じ視 野を実現する光学系を見出した。なお、この光学系は LSST と同様に M3 が M1 と一体化可能である。

初期設計案を我々が開発してきた4枚鏡アプラナート光学系とし、そこから解を探索した。広視野化を想定していない元の光学系のままでは、M4 に視野端の光線が全てケラレてしまう。そのため、スループット を確保しつつケラレを防ぐための条件を探索、その条件を満たす光学系に対して結像性能について最適化を 行った。

M1 と M2、M3 を球面鏡とする光学系の場合、結像性能とスループットの間にトレードオフの関係があ るため、高結像性能、高スループットを達成するのは難しいことが判明した。そこで、M3 を非球面にする ことで、結像性能を向上させるための自由度を確保した。その結果、スループットが 45%程度と低く、セン サーとレンズ径が大きいという問題があるものの、視野直径 3.5°にわたって星像半径 1.2″以下を達成する 4 枚鏡光学系を実現できた。

#### 1 Introduction

非常にサーベイ効率が高いことで知られる、Vera C. Rubin Observatory の Large Synoptic Survey Telescope (LSST) は口径 8.4m の望遠鏡であり、視野直 径 3.5°、f/1.23 と極めて広視野の明るい望遠鏡であ る。(図 1)

LSST は 3 枚鏡の光学系を用いており、M1 と M3 が一体化しているという点が特徴的である。しかし、 M1、M2、M3 全てに非球面鏡を用いている。非球面 鏡は製造が困難なので、大きなコストが必要となる。

一方で、我々は視野直径 8'(=0.125°)で回折限 界を達成する球面主鏡の光学系(図 2)を開発済みで ある。この光学系は4枚鏡で LSST と同様に M1 と M3 を一体化可能であり、M1、M2、M3 が球面鏡、 M4のみ非球面鏡である。非球面を比較的小さな M4 に限定することで製作コストを抑えられる。この光 学系を初期設計案として広視野化を試みた。目標と する仕様は、LSST の光学性能を参考にして、口径 8.4m、視野直径 3.5°で星像半径 2″のシーイング限 界を達成することとした。



図 1: LSST の光学系 (S. S. Olivier et al. 図 2: 4 枚鏡光学系 (2006))

#### 2 Methods

前述の4枚鏡光学系を広視野化するにあたって、補 正レンズを加える前に解決すべき問題がある。視野 端の光線ほど中間焦点が光軸から遠くなるため、そ のまま広視野化すると、M4 位置にある中間焦点に おいて視野端の光線が全て遮蔽される。M3 に光を 到達させるためには M4 に穴を開けなければならな いが、視野を広げれば広げるほど大きな穴が必要と なる。視野半径 1.6°の時点で中間焦点の高さは M4 半径と一致し、それ以上の視野を確保しようとする と M4 を置くことができなくなり、そもそも光学系 が成立しない。(図 3) この問題を解決するため、初期設計の4枚鏡光学 系に対して鏡の形状や配置に制限を付ける。



図 3: 広視野化によるケラレ

しかし、光線の遮蔽を防ぐために鏡の形状や配置 に制限を加えると、結像性能を向上させるための自 由度が減少する。つまり、この場合結像性能とスルー プットの間にトレードオフの関係があることを先に 述べておく。

光学設計の手順は以下の通り。

- 1. 広視野でも遮蔽を抑えるための条件を抽出
- 2. 光学シミュレーションソフト (Zemax) に、得ら れた条件を入れて最適化し、4 枚鏡の光学系を 探索
- 3. 補正レンズを追加、シーイング限界を目指す

最終的に図4のような条件を与え、適切なウェイトを設定して最適化を行った。以下、与えた条件を 分類して挙げる。なお、煩雑になることを防ぐため、 一部図に記載していない条件がある。

鏡の形状とレンズの条件

- M1、M2、M3 が球面鏡 (M3 は後ほど非球面に 変更)
- M1とM3が接続する
- 補正レンズは Rubin と同じ3枚
- M1 と M2 がコンセントリックかつその曲率中 心が入射瞳位置に置かれる
- 鏡とレンズが製作可能な形状である (極端な 曲率や負の厚さを持たない)

スループットを向上させるための条件

 M1の全面を無駄なく使うため、M1内縁で反射 した光が M4 外縁と一致する ケラレを防ぐため、M4の位置に中間焦点を結び、さらにそこでの光線束半径がM4半径と比べて小さい

結像性能を向上させるための条件

• スポットダイアグラムを最小化する



図 4: 条件

#### 3 Results

結果を図 5 に示す。星像半径は 3 " から 16 " とな り、視野端で特に大きくなった。また、スループット は 41.3 から 46.7%となった。



(c) 視野 - スループット

(スループットは、ある視野から入射瞳に入射する全ての 光のうち、ケラレることなく像面に到達する光の割合)

#### 図 5: 結果

ここで、結像性能を改善するために補正レンズの 数を増やしても、要求仕様の達成には至らなかった。 そのため、M3を非球面鏡に変更して再び最適化を 行った。その結果を図6に示す。

星像半径は 0.5 " から 1.2 " となり、目標仕様を達 成した。なお、これは像面におけるスポットダイア グラムの RMS 半径だが、エンサ – クルドエナジー が 80%となる半径も 0.5 " から 1.3 " であり、ほとん ど同じ値となる。スループットは 41.7 から 46.0%で、 M3 が球面鏡の場合と大差ない。

#### 4 Discussion

#### 4.1 結像性能についての考察

広視野の4枚鏡光学系では、

- M4 に中間焦点を置く必要がある
- 中間焦点で視野端の光線の高さに制限がある
- M4 反射後の光線が像面に到達するために M3 に 大きな穴が必要

といったケラレを防ぐための要求が多いため、M3まで非球面にしなければ残された自由度で結像性能を 改善できない。

#### 4.2 遮蔽についての考察

M1、M3、M4は全てリング状になっている(図7) ため、それぞれの鏡の穴に入る光によってスループッ トが低下する。実際、図 6c のスループットは 41.7-46.0%であり、56.5-63.6%程度ある LSST と比べると 低い。しかし、結像性能とスループットにはトレー ドオフの関係があるため、結像性能を維持したまま これ以上スループットを向上させることは困難であ ると考えられる。



図 7: 鏡の形状

また、M3 に空いた穴によって、M2 で反射した後 に M3 の穴を通過し、直接像面に到達する光 (迷光) が発生する。

しかし、図8のようにマスクを付けることで、必 要な光を遮ることなく不要な光を排除できる。



図 8: 迷光

#### 4.3 コストについての考察

この光学系は全体で f/2.04 となり、f/1.23 の Rubin と比べて暗くなった。そのため、像が大きくなり、直 前に配置されるレンズも大きくなる。センサー径が 1048 mm、レンズ径は最大で 2133 mmとなるが、こ れはセンサー径が 634 mmで最大レンズ径が 1550 m m (S. S. Olivier et al. (2006)) である LSST と比べ て大きい。このことは、製造コストが高くなること を意味する。

この光学系は M1 と M2 が球面鏡であるという点 ではコスト面で有利だが、センサーとレンズ径が大 きいという点で不利である。実用化にあたっては、ど ちらの影響をより強く受けるか調査する必要がある。

#### 5 Conclusion

本研究では、4 枚鏡光学系の広視野化を試みた。非 球面を M4 に限定すると十分な結像性能が確保できな い。しかし、M3 を非球面に変更することで、M1,M2 球面、M3,M4 非球面、口径 8.4m で視野直径 3.5°に わたって星像半径 1.2″以下を実現する 4 枚鏡光学系 を実現した。しかし、スループットが 45%程度と低 めであり、センサーとレンズが大きくなるという問 題点も存在する。

#### Reference

"Rubin Observatory". https://www.lsst.org/

Olivier, Scot and Seppala, Lynn and Gilmore, Keenan and Hale, Layton and Whistler, Wayne. LSST Camera Optics. Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering. June 5, 2006

### 観測a13

### 突発天体サーベイの差分画像解析における候補天体絞 り込み手法の開発

### 笹岡 大雅

#### 突発天体サーベイの差分画像解析における候補天体絞り込み手法の開発

笹岡 大雅 (東京大学大学院 理学系研究科)

#### Abstract

近年、超新星をはじめとした突発天体の発見数は大幅に増加しており、今後も更なる増加が見込まれている。 日本国内においても、東京大学木曽観測所の Tomo-e Gozen チームが全天サーベイ/高頻度サーベイを毎晩 行い、突発天体を探査している。突発天体の発見を目的としたサーベイでは、新規に取得した画像と参照画 像の「引き算」を行うことによって突発天体の検出を行なっている。しかし、候補天体として検出されるも のの多くは引き残しや宇宙線などであり、適切にフォローアップを行うには、それらを候補から除かなけれ ばならない。近年は機械学習による判別手法の進歩が著しいが、モデルを修正する場合に非常に時間がかか る等のデメリットもあり、パラメータによる判別手法と住み分けができると考えた。点源に感度のある検出 を行うには、その星像の形 (Point Spread Function) で重み付けをすると良いことが以前から知られている (Bijaoui & Dantel 1970)。先行研究は Tomo-e Gozen の1 フレーム/秒の画像に対し、横軸に重み付け後 のピーク、縦軸に星像のプロファイルの傾きをとると点源由来の天体が曲線を描いて分布することを明らか にした (Arima 2022)。Tomo-e Gozen の突発天体サーベイデータを用いた本研究では、点源由来の天体が 分布する領域をシーイング (点源像の FWHM) と信号雑音比のみに依存する式を使って予想することができ るようになった。本講演ではこの手法を適用した結果とともに、実行時間の議論や、重力波可視光対応天体 探査への応用可能性などについても報告する。

#### 1 研究背景

東京大学木曽観測所のシュミット望遠鏡に設置されたカメラ Tomo-e Gozen(図1)は撮像素子にCCDではなくCMOSを採用している。CMOSは読み出し時間が短いことが特徴であり、望遠鏡の広い視野と組み合わせて、高頻度のサーベイ観測を行っている(全天; 9000 deg<sup>2</sup>, 1時間間隔; 5300 deg<sup>2</sup>)。

1日に取得される画像はおよそ10万枚であり、機械学 習・既知の移動天体や変光星のカタログマッチング・ 複数回検出の条件を課すことなどによって、1日の突 発天体の候補を ≲ 100個 程度まで絞り込んでいる。 超新星の初期の情報を得るためには追観測のための 自動アラートを直ちに出すことが望ましいが、そのた めには候補天体をもう1桁減らすことが必要である。



図 1: トモエゴゼンカメラ(Tomo-e Gozen プロジェ クト ホームページより)

#### 2 手法

#### 2.1 星像の広がり(PSF)

恒星などの点光源を観測する際に、光学系や大気の 影響を受け、像が回折限界よりも広がった形をとる。 これを記述する関数を Point Spread Function(PSF) とよび、代表的なものとして Gaussian や Moffat distribution (Moffat 1969)が挙げられる。図2に示すよ うに、より実測に合うのはMoffatである。



図 2: GaussianとMoffatの比較(Racine, 1996)。 2がGaussian, 5/3がMoffatによるフィット結果に対 応。Moffatの方が実際のプロファイルに合っている ことがわかる。

#### 2.2 天体画像の「引き算」

ある銀河で超新星が起きた場合に、超新星を見つ けるにはどうするのがよいだろうか。最も単純なア イディアは

(銀河+超新星)-(平常時の銀河)=超新星

という引き算をすることである。地上望遠鏡では大 気揺らぎの影響が大きく、星像が時々刻々と変化し てゆく。このため、単純な引き算ではなく、星像の 形を合わせて引き算をしなければならない。この際 に発生する「引き残し」や宇宙線などが変動天体探 査をする上で主要な誤検出となっている。



図 3: 画像の引き算による超新星検出の例 ; SN2021cgu

#### 2.3 パラメータを用いた絞り込み

変動天体を検出する際に、その画像内で典型的な PSFを作成し、それを用いて畳み込み検出を行う。先 行研究(Arima 2022)では

- 平均的なPSFに対する類似度として「畳み込み 検出後のピーク」を横軸、
- ・ 星像のプロファイルの傾きの次元を持つものとして「ピーク/
   √見かけの面積」を縦軸

にとった平面(CPP-diagram)上において、点源由来 の検出と宇宙線および広がりを持つ光源が異なる分 布を示すことを明らかにした。



図 4: 取得画像の検出の分布の例。点源由来の検出が 曲線を描き、上側に宇宙線が、下側に広がりを持つ 光源が分布する。

これを引き算後の画像に応用すると、上側に宇宙線 が、下側に引き残しが、曲線に乗る形で変動天体が 分布すると考えた。その結果が図5である。

#### 2.4 使用したデータ

- 2021年にTomo-e Gozenカメラで取得された、超 新星が写った画像235枚(S/N ≥ 5, 望遠鏡による ブレがないもの)
- 2. 2023年7月18日に取得された、候補天体 計1842 個を含む画像 832枚 ('variable')



図 5: 差分画像の検出の分布の例; SN2021dn 検出のうち、超新星(および、saturationを起こした 星の引き残し)が「星系列」の上に来ている。

#### 3 結果

畳み込み検出に使うPSFモデルはGaussianで作成 し、シーイング(点源像のFWHM)を与えるだけで星 系列を記述する関数を求めた。領域の上端・下端は それぞれMoffatのシーイング依存パラメータを設定 することよって与えている。まずは、超新星が写っ ていると分かっている画像に対してのテストを行っ た。候補天体のうち、

- 1. saturationを起こした星の引き残し
- 2. PSFモデル作成に使った星と比べて楕円率が大 きいもの

は誤検出であるとして、さらに絞り込みを行った。結 果を表1に示す。

ここでの検出数は機械学習・カタログマッチングの 前の1画像あたりの検出数であることに留意。

表 1: 検出成功率と誤検出数の比較

手法	成功数	成功率	成功した画像中 の誤検出(median)
従来	210	100% (基準)	88
今回	156	74%	2

なお、実行時間に関しては現段階で従来の手法の10%-20%増にとどめており、十分実現可能な速度である。



図 6: シーイングのみから作成した関数で領域を絞り 込んだ例 ; SN2021dn

続いて、機械学習・移動天体/変光星のカタログマッ チングでは除外されなかった天体に適用し、より実 践的なデータで応用可能か検証した。候補天体を絞 り込む楕円率の範囲と「星系列」の幅を求め、これ をTomo-e Gozenで1日に現れた候補天体に適用した が、実際に起きている超新星の信号雑音比が全て小 さかったため、十分な結果が得られなかった。前日・ 翌日といった時間方向の情報も含め、さらなる検証 が必要である。

#### 4 今後の展望

Tomo-e Gozenで取得されたデータに対してCPPdiagramによる分類を適用することで、超新星候補 の数を1桁個/日まで絞り込むことを目標としている。 実装する場合はまずは機械学習の前後に接続する形 になるが、将来的には機械学習の学習データにこの 分類方法を組み合わせるとさらに良化すると考えて いる。

また、Tomo-e Gozenは重力波のフォローアップ観測 を行っているが、中性子星合体のように時間スケー ルの短い現象に備え、「複数回検出」の時間間隔を短 くしているため、'variable'中の誤検出をいかに少な くするかが重要になる。突発天体の自動アラート、重 力波フォローアップでの可視光対応天体の発見に役 立てられるよう、さらに精度を上げていきたい。 2023年度 第53回 天文・天体物理若手夏の学校

#### Reference

Bijaoui, & Dantel, 1970, A&A, 6, 51

Arima, 2022, unpublished Ph.D thesis, University of Tokyo.

Moffat, 1969, A&A, 3, 455

### 観測a14

### GEO-X 衛星用 MEMS X線望遠鏡のアニール時間の最 適化の研究

### 山田 裕大

# 未提出

観測a15

### 像再構成光学系のためのKirkpatrick-Baez ミラーの 開発

田中 虎次郎

# 未提出

### 観測a16

### MEMS 技術を用いた広視野X線望遠鏡 Lobster Eye 光 学系の開発

### 石川 怜

# 未提出

観測a17

### ISSに搭載する超高層大気観測用X線カメラの概要と 開発状況

### 河邉 圭寿
### ISSに搭載する超高層大気観測用X線カメラの概要と開発状況

河邉 圭寿 (近畿大学大学院 総合理工学研究科)

#### Abstract

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。 X 線検出器として、SOI-CMOS イメージセンサ「SOIPIX」を用いる。「SOIPIX」は Silicon-on-insulator (SOI) 技術により、センサ部と回路部が一体となっていることが特徴で、常温で X 線イベントを検出し、高 い X 線感度と精密撮像分光を実現する。X 線カメラには、15.3 mm × 24.6 mm サイズの大面積素子を 2 枚 並べて搭載する。観測帯域はおよそ 2–3 keV から 10 数 keV で、低エネルギー側の X 線の吸収から大気密度 を測定する。「SOIPIX」の手前にはスリットコリメータを置き、「SOIPIX」がピクセル検出器であることを 活かして X 線の到来方向を区別することで、高度ごとの大気密度を測定する。X 線カメラには他に、ADC、 FPGA などを搭載した制御回路、バックバイアス印加のための昇圧モジュールも搭載する。 現在我々は、制御回路の開発に加え、スリットコリメータと昇圧モジュールの開発も行なっている。スリッ トコリメータについては試作品を製作し、可視光や較正線源を用いて試験を行い、改良を進めている。また 昇圧モジュールについては、電圧レベルの安定性や雑音性能を調査中である。本講演では、X 線カメラの構 成の概要と、スリットコリメータおよび昇圧モジュールの開発状況について報告する。

#### 1 研究背景

地球の大気は、気象現象が起こる対流圏、オゾン 層がある成層圏があり、その上にも中間圏、熱圏・電 離圏 (80–500 km) が存在し、中間圏・熱圏・電離圏 は超高層大気と呼ばれる。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。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。

宇宙 X 線は大気を透過すると、吸収によって低エ ネルギー側の強度が減少し、その度合いは大気の密 度に比例する。先行研究では、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。低エネルギー側が大気吸収により、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。大気の変動を明らかにするため、大気 観測専用のX線観測装置で常時モニタリングを行い たい。



図 1: 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 [3]。

#### 2 研究目的

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。 X線カメラをISS 曝露部に搭載する利点として、バ ス系の開発が不要で、開発期間が短縮できることが挙 げられる。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 ピクセル検出器「SOIPIX」を搭載し、超高 層大気を透過した宇宙X線背景放射 (Cosmic X-ray Background 以降: CXB)を観測する。

観測装置の条件として、省エネ化・省スペース化 を目指さなければならない。「SOIPIX」は、世界で 唯一冷却装置無しで、高い分光力 (読み出しノイズ 10 e<sup>-</sup>)・X 線感度 (空乏層厚 100 µm)・時間分解能 (10 µsec)を実現している。高いX 線感度を持つこと で、広いエネルギー帯域のX 線を観測することがで き、大気による吸収が大きくなる高度 80 km 以下も 測定することができる。また時間分解能が高いこと で、反同時計数によるバックグラウンドの除去も可 能となる。



図 2: 本構想における超高層大気観測の概略図。

図2が本計画における超高層大気観測の概略図であ る。重要なのは、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。夜地球では宇宙 X 線背景放射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」はピクセル検 出器なので手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。

表1が本計画におけるペイロードの概要である。 サイズは MISSE 規格で決まっており、質量は5 kg 以下、電力は約10 W を予定している。また、X 線 センサは SOIPIX 素子を2枚並べ、素子1枚あたり の有感領域は13.2 mm × 21.88 mm である。

図3が本計画におけるペイロードの概略図である。 X線カメラ「SOIPIX」とコリメータ、制御回路等に よって構成されている。

表 1: ペイロードの概要				
サイズ	$6.5 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \times 29 \text{ cm}$ 以内			
質量	< 5  kg			
電力	約 10 W			
X 線センサ	SOIPIX 2 素子			
	(有感領域 13.2 mm × 21.88 mm)			





#### 3 開発状況

本計画で必要な開発要素を説明する。開発要素と して、コリメータ、制御回路、昇圧モジュール、可視 光カメラがある。コリメータは、高度ごとの大気透過 X線を観測するために用いる。制御回路は、FPGA や ADC、DAC を搭載し、SOIPIX の制御とデータ 収集を行う。昇圧モジュールは、センサ部の高圧印 加のために用い、可視光カメラは X線カメラの視野 確認に必要なものである。その中でも、本集録では コリメータおよび昇圧モジュールの開発について説 明する。

#### 3.1 コリメータの開発

図 4 は、コリメータの構造である。高さを l、ス リットのピッチを d、スリット幅を  $\Delta d$  とすると、視 野の大きさ  $\phi(^{\circ})$  と空間分解能  $\theta(^{\circ})$  は、

$$\phi = \frac{180}{\pi} \frac{d}{l} \tag{1}$$

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

と表せる。

ペイロードのサイズの上限より、ISS から高度 0 km-100 km の範囲の大気透過 X 線を観測するた



図 4: コリメータの構造。

めには、コリメータの高さは 30 mm 以内、超高層大 気の密度を 5 km(=0.1°)の精度で観測できるように 設計する必要がある。この性能を達成するため、図 5 のように、コリメータの試作品として l = 30 mm、 d = 2 mm、 $\Delta d = 50 \ \mu m$  のものを 3D-CAD ソフト を用いて設計し、3D プリンタを用いて、設計したコ リメータを樹脂で作成した。

図6に示すように、上からLED ライトを照射し、 コリメータを介して SOIPIX に可視光が届くように 調節して実験を行った。

図7は、その時の実験を行ったことにより取得し た可視光画像である。一部分だけ可視光が到達して いることが確認できた。



図 5: 3D-CAD で試作したコリメータ。 今後は SUS(ステンレス鋼) のコリメータを製作し、



図 6: 実験セットアップ。



図 7: LED を SOIPIX に照射した際に取得した可視 光画像。

X線源を用いて性能評価を行う。

2023 年度 第 53 回 天文·天体物理若手夏の学校

#### 3.2 昇圧モジュールの開発

ISS からは 28V の電圧が供給されるが、厚い空乏 層を実現し、高度 80 km 以下の密度を測定するため には、より高電圧を印加する必要がある。X 線昇圧 モジュールに求める性能は、出力電圧が安定である ことと、ノイズが低いことである。まずは、昇圧モ ジュールを用いて SOIPIX 素子にバックバイアス電 圧を印加し、その電圧値の安定性を調査した。図 8 は、昇圧モジュールで SOIPIX のセンサ部に印加し た際の、印加電圧値の時間変動を表したものである。 表 2 は、10 分ごとに電圧値を記録したものである。 電圧値の平均値は-12.6 V で、標準偏差は 0.7 V で あった。昇圧モジュールの電圧値の変動幅は 0.1 V 以 内にすることが目標である。今後は、電圧値がより 少ない時間変動になるような駆動条件を調査する。

次に、昇圧モジュールと直流安定化電源で印加し て実験を行った際の、取得した Mn Kα(5.9 keV) ス ペクトルの比較を行った。図 9 は、その実験により 取得したスペクトルと、印加電圧値、解析を行った 結果得られたエネルギー分解能 (FWHM) である。昇 圧モジュールと直流安定化電源とで、結果に大きな 違いは見られなかった。今後は、さまざまな温度や 印加電圧値で実験を行い、調査を行う。



図 8: 昇圧モジュールで SOIPIX のセンサ部に印加 した際の電圧値の時間変動。



図 9: 昇圧モジュールで SOIPIX のセンサ部に印加 した際の電圧値の時間変動。

表 2: 昇圧モジュールを SOIPIX のセンサ部に印加 した際の経過時間ごとの印加電圧値

時間 (min)	印加電圧値 (V)
0	-11.19
10	-12.03
20	-12.6
30	-12.8
40	-12.98
50	-12.04
60	-13.12
70	-13.38
80	-13.14

-index へ戻る

観測a18

## TES性能評価のための極低温環境で用いる磁気シール ドの開発

## 佐々木 康祐

### TES 性能評価のための極低温環境で用いる磁気シールドの開発

佐々木 康祐 (埼玉大学大学院 理工学研究科)

#### Abstract

X線マイクロカロリメータは、極低温下(絶対温度 100 mK 以下)で高いエネルギー分光能力と高い検 出効率をもつ検出器である。その中でも常伝導-超伝導間の急峻な抵抗変化を測定する超伝導遷移端温度計 (Transition-Edge Sensor; TES)を用いた TES 型マイクロカロリメータは、従来の検出器に比べ高い感度 (*E*/Δ*E* > 1000)を実現するため、将来 X 線天文衛星への搭載が決定している。一方で、TES 素子は垂直方 向からの磁場により感度が落ちることが確認されており、将来衛星への実装のためには、広い開口面積を確 保しつつ、極低温環境下での磁気遮蔽が重要である。本研究グループでは、X 線の入射を妨げることなく磁 場を軽減することのできる超伝導メッシュシールドの開発及びその性能評価試験を行っている。このシール ドは超伝導体の Nb を用いることにより、Meissner 効果によって磁場の侵入を防いでいる。また、ハニカム 構造をとることにより、強度を保ちながら開口部を確保している。磁場による TES の感度の劣化、磁気遮 蔽シールドの性能を評価するためには、極低温下での均一な磁場環境を構築する必要がある。そこで、極低 温下 (絶対温度 4K 領域) において広範囲に一様な磁場をかけることのできる超伝導ヘルムホルツコイルの設 計、製作を行った。また、極低温下での磁場較正試験を行い、50 mA の電流により中心位置に 38.4 µT の磁 場をかけられるコイルであること、電流に対して線形に磁場が応答することを確認した。本講演では、超伝 導ヘルムホルツコイルの設計、製作、較正試験の結果について述べる。

#### 1 Introduction

数千万度という高温プラズマでは、水素やヘリウ ムといった元素は完全に電離してしまい、鉄などの 重元素も1個ないし数個の電子を残して電離してい る状態で存在している。0.1 keV から 10 keV という 軟 X 線領域は高電離した炭素、窒素、酸素、ネオン、 マグネシウム、珪素、硫黄、鉄などの宇宙に存在す る主要な元素からのK,L 殻輝線や吸収端が存在する 非常に重要な波長帯である。高温プラズマからの各 輝線の微細構造を十分に分離できれば、そこに含ま れる重元素量を精度よく決定できるだけなく、重元 素の輝線のエネルギーシフトによるプラズマの視線 方向の運動や、微細構造線の広がりから電離した重 元素の熱運動の速度(乱流)の測定など高温プラズマ の物理状態を直接観測することが可能である。検出 器の分解能が 10 eV 程度になると、微量な元素を検 出し、輝線の微細構造を分離できるようになる。

プラズマからは異なるイオン化状態にある様々な 元素からのスペクトル線が放射されている。10 eV の分解能を実現する検出器として、もっとも一般的 な検出器は回折格子である。しかし、回折格子を用 いた分散型分光器は、回折角が X 線の波長に比例す るため、波長の短い、すなわちエネルギーの高い X 線に対してはエネルギー分解能が悪い。また、分散 された光だけがエネルギーの情報を持つために 検出 効率が 1%程度しか得られない。また、X 線は平行 光である必要があり、広がった天体には向かない。X 線マイクロカロリメータは、入射 X 線のエネルギー を素子の温度上昇として測る検出器であり、極低温 (~100 mK) において *E*/Δ*E* > 1000 という高いエ ネルギー分解能を達成できる。さらに、 100%に近 い検出効率をもち、X 線の到来方向に敏感でないた め、広がった天体の観測も可能である。

X線マイクロカロリメータとは、X線光子のエネル ギーを素子の温度上昇として測る検出器である。キャ リアがフォノンであるためキャリアを1つ作り出すた めに必要なエネルギーが小さく、統計数が圧倒的に増 えるため統計誤差が小さくなる。エネルギー分解能 はボルツマン定数  $k_{\rm B}$ 、温度 T、素子の熱容量 C とし て $\Delta E_{\rm FWHM} \simeq 2.35 \xi \sqrt{k_{\rm B}T^2C}$ と表され、 $\xi$ は温度計 の感度  $\alpha$ が大きくなると小さくなるようなパラメー タである。よって、マイクロカロリメータは極低温で 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

動作させることで、高いエネルギー分解能が達成さ れる。さらなるエネルギー分解能を達成するには温 度計の感度 α を上げる必要がある。感度を上げるに は、磁気量子型マイクロカロリメータなども挙げら れるが、応答速度や多画素化での読み出しの点から、 超伝導遷移端温度計 (Transition Edge Sensor;TES) の将来衛星への搭載が決まっている。TES は常伝導 超伝導遷移端での急激な抵抗変化を用いる温度計で ある。半導体温度計の感度が ~10 なのに対し、TES の感度は ~100 - 1000 となり、さらに高いエネル ギー分解能が達成可能である。

### 2 研究目的

図1のように、TES には素子に垂直な磁場によっ て臨界電流が小さくなることによって感度が悪化 す るという性質が知られている (Ishisaki et al. 2008)。 将来衛星では検出器の大面積化、広視野を実現させ るための開口面積の拡大が想定されるため、そこか ら入り込む磁場や地磁気、衛星搭載機器からの磁場 等によって感度が悪化することが考えられる。この 感度はエネルギー分解能や応答速度に効いてくるた め磁場を遮蔽して ~ 1µT 以下に減少させる必要が ある。そこで、我々はX線の開口面積を確保しつつ 磁場を遮蔽するようなシールドの開発を行っている。 今回は磁気遮蔽シールドの性能評価のための均一な 磁場環境を構築するため、超伝導ヘルムホルツコイ ルの製作を行う。

### 3 磁気遮蔽シールド

本研究チームでは超伝導を使って、極低温まで冷 却することでマイスナー効果によって4K以下のス テージにおいて磁場を遮蔽する磁気遮蔽シールドを 開発している。メッシュシールドは超伝導体として Nbを用いており、X線光子が入射でき、かつシー ルドの強度を保つため、ハニカム構造をとっている (図 2)。Nbは第二種超伝導体であることから、ピン 止め効果も予想されるが、高い臨界温度 $T_{\rm C} \sim 9.23$  K と臨界磁場 $H_{\rm C} \sim 1.58 \times 10^5$  A/m を有し、加速器実 験での応用実績も高いことから選定した。

安田修士論文 (2020) では 5 mm と 2.5 mm のピッ チの磁気遮蔽シールドに対して外部磁場を印加した



図 1: TES 素子に磁場を掛けたときの R-T カーブ (Ishisaki et al. 2008)。緑は 0µT、青は 6µT、マゼ ンタは 26µT の磁場を印加



図 2: 磁気遮蔽シールド (メッシュピッチ 5 mm)

ときの検出器面上にかかる磁場の電磁界シミュレー ションをおこなった。シミュレーションでのメッシュ シールドは、ピッチと厚さが異なる2種類5mm(厚 さ 0.05 mm)と2.5 mm(厚さ 0.025 mm)を想定し た。z 方向に一様な磁場をかけていて、横軸はシー ルドからの距離を表している。z=0 に磁気遮蔽メッ シュシールドが位置しており、負の方向から磁場を かけている。シミュレーションでは ピッチが5 mm の場合は約70%、2.5 mm の場合は約85%磁場を減 少させられる結果となった。(図 3)



図 3: z 方向一様磁場に対する、z 軸方向の磁界とシー ルドなしとシールドありの比 (安田修論)。青: メッシュ ピッチ 5 mm /メッシュなし 20 A/m、オレンジ: メッ シュピッチ 2.5 mm /メッシュなし 20 A/m、緑: メッ シュピッチ 5 mm /メッシュなし 80 A/m、赤: メッ シュピッチ 2.5 mm /メッシュなし 80 A/m

## 4 超伝導ヘルムホルツコイル

本研究室の極低温試験環境に適する超伝導ヘルム ホルツコイルの設計、製作を行った。ヘルムホルツコ イルは2つのコイルをコイル間の距離とコイルの半 径が一致するように配置し、それぞれ同じ向きに電 流を流すことで2つのコイルの間に均一な磁場を発 生させることができる装置である。条件として、実 際に想定される磁場から、極低温において数 µT 数 10 µT の磁場をかけることができること、他の配線 や装置との干渉なく十分に支えられることを満たす コイルボビンとジグを設計した。1つのコイルにつ き 40 巻きを 2 層巻いており、ボビンの各パラメータ は図 4 に示す。製作し試験環境へ組み込んだ様子が 図 5 である。組み込み後に他配線等の干渉、地絡の ないことを確認した。



図 4: コイルボビンのパラメータ



図 5: 製作した超伝導ヘルムホルツコイル

製作した超伝導ヘルムホルツコイルがどれだけの 磁場をつくるか確認するため、コイルの校正試験を極 低温環境で行った。磁場の測定には、ホール素子 (旭 化成エレクトロニクス製 HG-106A)を使用した。試 験に用いたホール素子は GaAs を使用しており出力 電圧の温度依存性が極低温下でも安定していることが 知られている。試験はコイルに流す電流を 0-60 mA の範囲を 5 mA 刻みで上昇、下降させておこなった。 その結果は図 6 に示す。これにより電流に対して磁場 が線形に応答していることが確認でき、コイルに流 す電流と発生する磁場の変換係数は *B/T* = 0.000742 となった。

ここで、この試験結果と計算値とを比較すると図7 のようになり、計算値(青)に比べて測定値(赤)がお よそ1/2程度の磁場しか発生していないことが分かっ た。この原因として、ホール素子の変換係数の値が 間違っていること、ホール素子の角度が試験の際コ イルの磁場に対して垂直になっておらず正しく磁場 が測定できていなかったことが予想される。ホール 素子は垂直な磁場に対して感度をもつため、コイル に対してホール素子の角度がずれていた場合(図8)、 測定される磁場は減少する。ホール素子の角度がず れていたと仮定した時の計算値と今回の試験結果の 比較が図7である。60°ずれていたときおおよそ一



図 6: 磁場較正試験の結果

致するが、動く余地を考えると現実的ではないため、 この他の原因を探る必要がある。また、線形な応答 は確認できているため、磁気シールド性能評価試験 における相対的な比較には問題なく使用できると考 えている。



図 7: 測定結果と計算値とホール素子の角度がずれて いた場合の磁場の比較

### 5 まとめと今後の展望

我々の研究チームでは TES 型 X 線マイクロカロ リメータに用いるための超伝導磁気遮蔽シールドの 開発をおこなっている。TES は素子に垂直な磁場に よって感度が悪化することが知られているため磁場 の遮蔽が重要となる。また、磁気遮蔽シールドの性 能評価、TES の磁場による感度の悪化の評価を行う



図 8: コイルとホール素子の角度のズレ

ため、極低温で均一な磁場環境を構築することが必 要である。そこで我々は極低温で動作する超伝導へ ルムホルツコイルの製作を行い、50 mA の電流によ り中心位置に 38.4 μT の磁場をかけられるコイルで あること、電流に対して線形に磁場が応答すること を確認した。計算値とのずれがあるため、原因をさ らに探る必要がある。

今後は、製作した超伝導ヘルムホルツコイルを用 いて磁気遮蔽シールドがどれだけ磁場を遮蔽するか みる性能評価試験を行う予定である。磁気遮蔽シー ルドの最適パラメータを決定することを目的に、メッ シュのピッチが 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 mm のシールドを 用いて試験を行い、その比較をする。また、実際に TES の遷移端を用いた抵抗-温度関係の変化の測定 を、それぞれのシールド及びシールドなしでの行う ことを予定している。

#### Reference

Ishisaki, Y., et al. 2008, Journal of Low Temperature Physics, 151(1):131-137.

安田仰,2020,埼玉大学修士論文

-index へ戻る

## 観測a19

## HiZ-GUNDAM 搭載候補 pnCCD 素子のノイズ評価

## 佐藤 匡駿

### Hi-Z GUNDAM 搭載候補 pnCCD 素子のノイズ評価

佐藤 匡駿 (関西学院大学大学院 理工学研究科)

#### Abstract

HiZ-GUNDAM は、宇宙最大規模の爆発現象であるガンマ線バーストを高感度かつ広視野の X 線モニ ターで発見、可視光・近赤外線望遠鏡で追観測の後、約1時間半以内に地上の大型望遠鏡による詳細な分光観 測を行うミッションである。これによって初代星からのガンマ線バーストを多数検出し、宇宙最初期の星の誕 生と終焉、さらにその時代の宇宙の物理状態の解明を目指す。我々はこのミッションに搭載する素子の候補 として PNDetector 社の CXC(Color X-Ray Camera)の暗電流と LD を算出、さらに LD の改善を行った。

#### 1 研究背景

宇宙機搭載用のX線センサーの駆動温度は-100℃ 程度であることが多く、この温度帯では暗電流はノ イズ成分の中では支配的ではない。HiZ-GUNDAM の熱設計上、センサーの駆動温度は-20℃以上が想定 されるため、暗電流が従来と比較して大きくなるこ とが考えられる。そこで、搭載候補素子のLD(ノイ ズと輝線を弁別できる下限のエネルギー)を算出する 上で素子温度0℃における暗電流を詳細に調査する 必要がある。

#### 表 1: HiZ-GUNDAM 検出器への要求

X線検出器への要求			
受光面積	$> 5 \times 5 \text{ cm}^2$		
ピクセルサイズ	< 160 µm		
観測帯域	0.4-4 keV		
フレームレート	> 10Hz		
センサー温度	> -20°C		

## 2 CXC(Color X-Ray Camera)

本研究で用いた pnCCD センサーは PNDetector 社 製の CXC(Color X-Ray Camera) である。pnCCD は 従来型の CCD センサーと異なり、横方向への電荷転 送が存在せず、縦方向のみの電荷転送方式を持ち、各 カラムごとに並列に電荷が並列に読み出される。さ らに、素子の厚さ全体に渡って空乏化されるため、検 出器全体が放射線への感度を持つようになる。



⊠ 1: CXC(Color X-Ray Camera)

#### 表 2: CXC の諸元表

Color X-ray Camera (CXC)					
素子サイズ	48μm × 48μm				
素子の厚み	450µm				
ピクセル数	264 × 264 (69,696) image area 264 × 528 (139,392) image & frame store area				
素子領域	12.7mm × 12.7mm (161mm²) image area 12.7mm × 27.3mm (321mm²) image & frame store area				
最大フレームレート	1000Hz (264 × 264 pixel)				

## 3 実験セットアップ

本研究では異なる6フレームレート(15, 20, 30, 50, 75, 100Hz) で55Feを用いたX線照射データ、バック グラウンドデータをそれぞれ取得した。任意のフレー ムレートを実現するにあたって、ファンクションジェ ネレータを用いた。DCM(Digital Control Module) は ADC、カメラのシグナルパターン、センサー温度 のコントローラが含まれる。また、DAQ rack には linux サーバーコンピュータが含まれ、ADC から取 り込んだデータの解析、保存するためのソフトウェ ア、カメラへの電力供給の駆動を行う。



図 2: 実験セットアップの模式図

### 4 X線のイベントパターン

X線光子が CCD センサーに入射する際のイベン トパターンとして大きく2つに分けられる。1つ目は 光子が検出器に入射、相互作用によって電荷を発生 させた時、電荷が単一のピクセルのみで検出される イベントパターンであり、シングルピクセルイベン トと呼ぶ。2つ目は電荷がイベント中心ピクセルの周 囲のピクセルに渡って検出されてしまうイベントパ ターンであり、マルチピクセルイベントと呼ぶ。マ ルチピクセルイベントではイベント中心の波高値が X線光子によるものであるかを判別するイベント閾 値、イベント中心からの漏れ出しが X線光子によっ て発生した電荷によるものであるかを判別するスプ リット閾値を設け、これらを超えているものについ て足し合わせることで正味の X線光子のエネルギー を計算する。



図 3: X 線のイベントパターン

て検出する装置である。しかしながら、光子が入射し ない全くの暗闇であっても微弱な電流が存在し、こ の電流を暗電流と呼ぶ。暗電流の原因として半導体 内のトラップによりバンド内に中間準位が発生して おり、検出器の温度によって電子がエネルギーを持つ ことによって伝導体に励起されてしまうことが挙げ られる。この暗電流は異なる露光時間でバックグラ ウンド画像を取得し、横軸露光時間、縦軸エネルギー でプロットしたデータに対して回帰直線の傾きを計 算することによって求められる。(James R.Janesick 2001)(Glenn F.Knoll 2014)



図 4: シリコンのエネルギーバンド図

## 6 0°Cにおける暗電流とLD

本研究では CXC の Image Area において全てのピ クセルについて暗電流を算出した。全てのピクセル からランダムに選んだ4座標の暗電流を図5に示す。 これを見ると露光時間に比例して暗電流が増加して いることがわかる。



図 5: 任意のピクセルにおける暗電流

#### 5 暗電流

半導体検出器は光子が入射することによって光電 吸収が起こり、電荷による光電流をエネルギーとし 暗電流の1次元ヒストグラム、2次元ヒストグラム から暗電流のピークは147.7e-/s/pixel であることが わかった。また、素子の左右端が明るいことから素 子全面で温度の不均一性の可能性が考えられる。上述の結果から素子の左右端は0°Cに冷却できていない可能性があるため、以降の解析では素子の左右端を排除した部分(図6の赤の部分)を用いた。



図 6: 暗電流の1次元および2次元ヒストグラム

X線イベントスペクトルは取得した生データから バックグラウンドを差し引いて作成するため、原点 を中心にノイズ成分の盛り上がりが確認できる。こ のノイズ成分を現象論的に冪乗関数でフィッティング し、フィッティング関数と縦軸のカウント数が y=1 と交差するエネルギーをノイズと輝線を弁別できる 下限のエネルギーとして LD と定義する。



図 7: X 線イベントのスペクトル

以上の手法でシングルピクセルイベント、マルチピ クセルイベントそれぞれのLDは216.25eV, 287.65eV と算出した。



図 8: 0 °C, 15Hz における LD

single pixel event	multi pixel event
216 eV	$287 \mathrm{eV}$

#### 7 LDの改善

イベントスペクトルは X 線照射データからバック グラウンドを差し引いて作成する。このため、原点 付近に現れるノイズ成分は原点を中心としてバック グラウンドレベルのゆらぎを持つ分布を見せるはず である。すなわち、本実験ではバックグラウンドの ゆらぎのピークである 13 c hの標準偏差を持つよう なポアソン分布が現れると考えられる。しかしなが ら、今回の LD に対してガウス関数でフィッティング を行うと σ = 38.9ch のゆらぎを持っており、純粋な バックグラウンドの分布から外れる成分を含んでい ると考えられる。



図 9: 0 ℃, 15Hz における LD のガウスフィッティ ング

バックグラウンド分布から外れる成分の原因とし て

1. flickering pixel(イベント閾値を超える波高値を高 頻度で出力するピクセル)

2. noisy pixel(バックグラウンドレベルのゆらぎが大 きいピクセル)

の2種類が考えられる。これら2種類のピクセルに ついてイベント判定回数とゆらぎのch数に対して閾 値を設け、閾値を超えるピクセルを排除した。閾値は Mn-K 輝線の減少割合が5%に収まる範囲内で最も多 くノイズ成分を減らせる値を現象論的に算出した。



図 10: flickering(左図) と noisy(右図)pixel のヒスト グラム



図 11: ノイズ成分の減少割合 (左図), Mn-K 輝線の 減少割合 (右図)

上述のようにして flickering 閾値を 9、noisy 閾値 を 17 と決定し、閾値を超えるピクセルについて排除 した。結果、ノイズ成分はシングルイベントについ ては大幅に、マルチイベントについてはほぼ全て減 少し、LD は 122.04eV に改善した。この値は Hi-Z の ミッションの観測帯域の要求下限エネルギーである 0.4keV を十分に満たしている。有効ピクセル数の減 少割合は 4.5%であった。



図 12: ノイズ成分と Mn-K 輝線の減少



図 13: ピクセル排除後の LD

表 4: LD の改善					
排除前	排除後				
$216 \mathrm{eV}$	122 eV				

### 8 まとめと今後の展望

本研究においてセンサー温度0℃での暗電流とLD を算出した。さらに、有効ピクセルを約95%残して LDを改善した。今後の展望として、異なる温度での 暗電流、LDからLDの温度依存性を算出し、フライ ト素子のピクセルサイズの見積もりを行う。

#### Reference

James R.Janesick 2001, SPIE PRESS

Glenn F.Knoll 2013, Ohmsha

—index へ戻る

## 観測a20

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 線天文衛星で主力検出器として用いられている X 線 CCD のデータ処理において、検出されたイ ベントが X 線によるものか、荷電粒子バックグラウンドかを判定する方法としてグレード法が用いられてい る。グレード法とは、各ピクセルで検出した波高値がしきい値を超えた場合イベントとみなし、しきい値を超 えたピクセルの配置等から X 線イベントかそれ以外の荷電粒子イベントかを識別する手法である。しかし、 このグレード法では、センサで得られる情報を一部しか使えておらず、改善の余地がある。そこで我々は検 出器に飛来した X 線光子の入射エネルギーと入射光子の座標の決定精度の向上、荷電粒子イベントと X 線 イベントの識別精度の向上を目的とし、ニューラルネットワークを使った X 線イベント判定法の開発を進め ている。本研究ではまず、ピクセル検出器に X 線光子を入射させるモンテカルロシミュレーションを行い、 シミュレーションで取得したイメージを学習データとする。そのデータで学習させたニューラルネットワー クに X 線ピクセル画像を入力し、X 線イベントのエネルギー予測を行う。本文では、ニューラルネットワー

### 1 イントロダクション

現在、X線イベントの検出に多く使われているの が CCD 検出器である。X 線 CCD 検出器は、半導 体に X 線が入射することで光電吸収により発生する 信号電荷を、各ピクセルの電極で集めることで X 線 を電気信号に変換して測定する検出器である。衛星 に搭載された X 線 CCD 検出器は、X 線を測定した 後、地上で解析されるが、これが重要な作業となる。 X線 CCD 検出器が撮像した画像には、X線イベン トだけが捉えられているわけではなく、X線以外の 荷電粒子によるバックグラウンドイベントが混ざっ ている。バックグラウンドイベントを X 線イベント として扱ってしまうと、検出器の分解能が下がって しまう。そこで X 線イベントとバックグラウンドイ ベントを見分ける手法として現在使用されているの が、グレード法という手法である。グレード法は、し きい値を超えるピクセルの配置から X 線イベントか バックグラウンドイベントかを見分ける手法である。 X 線イベントであった場合とそうでない場合の、し きい値を超えるピクセルの配置パターンから、X 線 イベントとバックグラウンドイベントを見分けてい る。(図1)

しかしこのグレード法では、検出器で得た情報を



図 1: Grade 法の一例

一部しか使えていないことで、問題がいくつか存在 する。一つはエネルギー再構築を行うときに、しき い値を超えないピクセルは使用されないことである。 これによって、検出した X 線のエネルギーが実際よ り過小評価されてしまう。もう一つが、3×3ピクセ ルの中で一番波高値が高いピクセルの中心が、検出 器に入射したX線イベントの座標となることである。 これらの問題を解決するべく、我々は深層学習を用 いたイベント判定法の開発を目指している。

## 2 イベント判定アルゴリズム

今回のアルゴリズムは教師あり学習と呼ばれ、正 解データをアルゴリズムに学習させ、観測データを 入力すると正しい値を予測するものである。機械学 習でイベント判定モデルに学習させるにあたって、学 習データが必要となる。学習データは大阪大学の小高 氏が開発した ComptonSoft を用いたシミュレーショ ンで作成した。ComptonSoft では、モンテカルロシ ミュレーションで X 線が検出器に入射した時のデー タを生成している。シミュレーションで得た X 線イ ベントのエネルギーと、入射した座標、検出したピ クセル画像をセットにしたデータを学習データとし た。

本研究の機械学習によるアルゴリズムは、ニュー ラルネットワークと呼ばれる。ニューラルネットワー クとは、データを学習することで入力した画像から 特徴を抽出し、画像を区別することができるアルゴ リズムである。具体的には、入力層で画像データを入 力し、中間層で活性化関数と呼ばれる関数で計算処 理され、出力層で各値の確率を出力し、その中から一 番高い確率の値を予測値として返すということが行 われている。今回は Python の TensorFlow モジュー ルを用いてニューラルネットワークのアルゴリズム を開発した。

#### 3 結果

1-10 keV の X 線を 1 keV 刻みでシミュレーショ ンしてデータを作り、学習済みのアルゴリズムにテ スト画像を入力し、予測を返した結果が図 2 である。

図2を見てわかるように、正しいエネルギーで確 率が一番高い値を取っており、正しい予測をしてい る。また、学習回数を増やした時の正確度の変化を 図3に示す。図3の結果のように、予測精度は上が るが、90%ほどで収束してしまうことがわかる。図4



図 2: 3,6,9 keV のシミュレーション画像を入力した 時のアルゴリズムによる予測



図 3: 学習回数を増やすことによる正確度の変化

は中間層のニューロン数を変えた時の正確度の変化 を比較した結果である。ニューロン数が多い方が少 しだけ正確度の上昇が速いことがわかるが、ほとん ど同じ値に収束する。



図 4: 中間層のニューロン数を 10 と 100 にした時の 正確度の伸びの違い

2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

### 4 まとめと今後の展望

今回、開発を進めたアルゴリズムでは、X 線イベン トのエネルギー予測精度がおよそ 90%となった。ま た、アルゴリズムの中間層の数を増やすことで学習 速度の上昇がみられた。今後は、グレード法による X 線イベントのエネルギー予測精度と、開発してい る機械学習を使ったイベント判定法による予測精度 の比較を行い、グレード法を超えるエネルギー予測 精度を目指す。また、エネルギー予測だけでなく、X 線の座標予測もできるアルゴリズムを追加すること も視野にいれる。将来的には、X 線イベントとバッ クグラウンドイベントの判定も行えるアルゴリズム に改良する。

### Reference

- Tanaka, T., Uchida, H., Nakajima, H., et al. , JATIS, 4, 011211 , 2018
- Wilkins, D. R., Allen, S. W., Miller, E. D., et al., SPIE, 12181, 121816S, 2022
- Odaka, H., Sugimoto, S., Ishikawa, S., et al. 2010, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 624, 303

-index へ戻る

観測a21

## X線分光撮像衛星XRISM搭載X線CCDの検出効率の 測定

青木 大輝

## X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載のX線 CCDの軟X線帯域の 検出効率の測定

青木 大輝 (東京理科大学大学院 創域理工学研究科 先端物理学専攻)

#### Abstract

我々は、2023 年度打ち上げ予定の X 線分光撮像衛星 (XRISM) に搭載する軟 X 撮像分光装置 (Xtend) の 焦点面に設置する X 線 CCD 検出器 (SXI) の開発を行なっている。SXI は 200  $\mu m$  の厚い空乏層を持つ裏 面照射型の X 線 CCD で、0.4 – 13 keV の帯域で高い検出効率をもつ。X 線 CCD は X 線以外に紫外線や 可視光線にも感度があるため、紫外線を遮光する目的として、SXI のフード部分には主成分が Al とポリイ ミドである CBF(Contamination Blocking Filter) を取り付けている。また、可視光線を遮光する目的とし て、X 線 CCD の入射面には主成分を Al とした OBL(Optical Blocking Layer) を蒸着している。

しかし、主に2 keV 以下の軟 X 線は CBF と OBL によって吸収される。CBF の X 線透過率は既に調べ られているので、OBL の X 線透過率が SXI の軟 X 線帯域の検出効率を決める。そして検出効率の測定精 度が、SXI で観測する星間ガスによる吸収量や天体の明るさの決定精度を決める。したがって、OBL の厚み から SXI の検出効率を決めることは地上の較正実験として非常に重要となる。

我々は OBL の厚さを求めるために、2022 年 3 月と 5 月に X 線の強度が安定している放射光施設である KEK フォトンファクトリー BL-11A において、0.4 – 1.7 keV の軟 X 線の照射実験を行った。実験に用いた CCD 素子はフライト素子と同じウエハから製作した小型の X 線 CCD である。X 線の入射角を 0°と、OBL の厚さが見かけ上厚くなる 50°の 2 つの条件で照射した。そして両者の条件で取得する X 線の強度比から OBL の組成と厚みを求める評価実験を行った。これまでに行った解析結果では、OBL の厚さが 220 nm 程 度と求めることができた。

#### 1 Introduction

XRISM は 2023 年 8 月 26 日に打ち上げが予定 されている日本で 7 番目の X 線天文衛星である。X 線望遠鏡によって、X 線を 2 度全反射させることで 焦点面に集光している。そして、集光した X 線は、 Soft X-ray Imager カメラによって検出される。我々 は、SXI カメラの開発を行なっている。



図 1: Soft X-ray Imager カメラ

## 2 Methods/Instruments and Observations

検出効率を測定するには、検出器に照射する X 線の絶対強度を知る必要がある。その方法として、検 出効率が既知のレファレンス検出器を用いて、絶対 強度を測定する。

しかし、測定中の X 線の強度が時間変動すること、 レファレンス検出器を用いるので系統誤差が生じて しまうなどの問題点が挙げられる。

そこで、X線の強度が時間変動してしまう問題点 に対する解決策として、X線の強度が安定している 放射光施設 (KEK-PF) を利用した。また、レファレ ンス検出器を用いることで系統誤差が生じる問題点 の解決策として、斜入射照射法を用いた。



図 2: BL-11A での実験環境の外観



図 3: 入射角  $\theta = 50^{\circ}$  の真空槽内の様子

測定手順として、Photon counting mode の後に Flux mode でデータ取得を行った。Photon counting mode とは、パイルアップを起こさない程度に X 線 強度を落とすことで光子を 1 個ずつ計数する方法で ある。メリットとして、光子を 1 個ずつ計数するた めスペクトルを得ることができ、非分光成分、高次 光があるかを確認することができる。デメリットと して、必要な統計量を取得するための測定時間が長 くなる点である。(1 つのエネルギーにつき、データ 取得時間は約 2 時間)



図 4: Photon counting mode での 550 eV の X 線イメージ

一方、Flux mode とは X 線のビーム Flux に応 じたピクセルの出力電荷量を計測する方法である。メ リットとして、必要な統計量を取得するための測定時 間が短くて済むという点である。(1 つのエネルギー につき、データ取得時間は約 10 分) デメリットとし て、スペクトルが得られないので、高次光や非分光



図 5: Photon counting mode での 550 eV の スペクトル

成分がある場合に、区別できないという点がある。



図 6: Flux mode での 550 eV の X 線イメージ

#### 3 Results

取得したデータから求めた各エネルギーでの相 対検出効率についてモデルフィットを行った。使用し たモデルは以下の式である。以下のモデルは OBL の 成分が Al だけと仮定した場合のモデルである。

relative QE(E) = exp 
$$\left\{ \left( 1 - \frac{1}{\cos(50^\circ)} \right) \frac{x_{\rm Al}}{\lambda_{\rm Al}(E)} \right\}$$
 (1)

表 1: 各モデルのフィッティング結果 (不確かさは 1σ)

モデル	Al [nm]	$Al_2O_3$ [nm]	$SiO_2$ [nm]
1	$230 \pm 8$	なし	20 (固定)
2	$224 \pm 15$	なし	$25 \pm 11$
3	$224 \pm 15$	$3\pm 6$	20 (固定)
4	$225 \pm 15$	$2\pm56$	$28 \pm 86$

#### 4 Discussion

モデル1の結果から、Alの厚さは統計的に有意 に決まる。しかし、モデル2の結果から $SiO_2$ の厚み は統計的に有意 ( $3\sigma$ )には決まらない。従って、SiO2の厚みは20 nm に固定した。また、モデル3,4の結 果から、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の厚みも統計的に有意に決まらない。 そのため、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の厚みな0 nm とみなす。 以上より、モデル 1(Al の厚みが 230 nm、SiO<sub>2</sub> の 厚みが 20 nm、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は無し)を採用した。

### 5 Conclusion

我々は、2022 年 3 月、5 月に高エネルギー加速 器研究機構の放射光施設 (KEK-PF) のビームライン BL-11A において、X 線の斜入射照射実験を行った。 そして、実験で得られた相対検出効率のデータから 求めた OBL(Al) の厚さは、230±8 nm と求まった。 また、絶縁層 (SiO<sub>2</sub>) の厚さは 20 nm、空房層 (Si) の 厚さは 200  $\mu$ m とした。

この結果は要求精度 (OBL の Al の厚さを 10%で 決定する)を満たしている。以上のパラメータから算 出した X 線 CCD の検出効率、SXI カメラの検出効 率を下図に示す。この結果を XRISM 衛星打ち上げ 前の SXI の CALDB に取り込んだ。



図 7: X線 CCD の検出効率



図 8: SXI カメラの検出効率

### 6 参考文献

#### Reference

- 角町 駿 2020, 東京理科大学 卒業論文
- 片多 修平 2015, 大阪大学 修士論文
- 丹波 翼 2020, 東京大学 修士論文

--index へ戻る

## 観測a22

## 機械学習を用いた XRISM 衛星搭載極低温検出器の異 常検知アルゴリズムの開発

## 柏崎 未有

## 機械学習を用いた XRISM 衛星搭載極低温検出器の 異常検知アルゴリズムの開発

柏崎 未有 (東京大学大学院 理学系研究科)

#### Abstract

安全な衛星運用を実現するため、衛星テレメトリデータの異常を早期に検知することは必須の要件であ る。2023 年打ち上げ予定の XRISM 衛星では、異常検知システム ATMOS(Automatic Telemetry Monitor Software) が採用されている。しかし ATMOS はテレメトリ時系列データの閾値判定を主とした汎用システ ムであり、データの特性に即したミッションごとの異常検知システムが相補的に必要となる。本研究では、 XRISM 衛星に搭載されたミッション機器 *Resolve* 装置の地上試験データで得られた検出器ノイズスペクト ルに対し、機械学習的な手法を適用することで、異常検知アルゴリズムの有用性を検証した。

#### 1 はじめに

安全な衛星運用を実現するため、衛星テレメトリ データの異常を早期に検知することは必須の要件であ る。現在、XRISM衛星プロジェクトで採用されている 汎用異常検知システム ATMOS (Automatic Telemetry MonitorSoftware) は、衛星テレメトリデータ(も しくはその演算)の時系列データを閾値判定するも のである。これは即時性が高い反面、複雑な判定に は向いていない。安全な衛星運用を達成するために は、相補的な即時性が低いものの複雑な判定が可能 なシステムが必要である。複雑な判定の一例として 挙げられるのが、閾値判定では分からない一次処理 したデータに対する異常の検知である。この異常を 検知するアルゴリズムを開発するにあたり、今回は 機械学習を利用することにした。

XRISM 衛星に搭載される *Resolve* 装置 (Ishisaki et al. 2022) は、X 線マイクロカロリメータ検出器 を擁した X 線分光器である。6×6 ピクセルからなる X 線検出器の熱浴を極低温 (約 50mK) に保持し、1 つずつの X 線光子入射に伴う温度上昇の時系列デー タを軌道上で処理してエネルギーを決定する。その データの特質として、(1)時間スケールや温度デー タの幅広いダイナミックレンジ、(2)周波数やエネル ギー空間で表現される検出器ノイズデータ、などが ある (Tsujimoto 2023)。周波数やエネルギー空間で 表現される検出器ノイズデータで生じる異常は、一 次処理したデータに対する異常の検知となり汎用シ ステムでは検知ができない。 そこで我々は、Resolve 装置のデータを対象に、機 械学習的手法を用いた、検出器ノイズデータに対す る異常検知アルゴリズムの開発を行った。本研究で は、2019-2022 年にフライト品を用いて実施した地 上試験データを使い、同手法の有効性を検証するこ とが目的とした。周波数空間で表現された検出器ノ イズスペクトルデータにおいて、特定の周波数帯域 で現れ分光性能を劣化させる既知のノイズ源が存在 する (Kurihara et al. 2022; Imamura et al. 2022; Hasebe et al. 2023)。そのようなノイズが出現する 時間帯を検知し、その時間帯を観測時間から除去し て、観測性能の品質を保証することを課題とした。

### 2 異常検知アルゴリズム

#### 2.1 SGD classifier

Stochastic Gradient Descent (SGD) classifier は、 確率的勾配降下法をもちいて、教師データの二つの カテゴリを類別する実数関数を求める教師あり学習 の一種である (Boisberranger et.al 2007)。類別する 実数関数とは、入力データ  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  に 対し

$$f(\boldsymbol{x}) = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_n x_n + b \qquad (1)$$

と表され、f(x)の符号によって分類される。この関数のパラメータを定めるため、教師データ $Y_{train}$ に対し、以下の式が最小となるパラメータを探索する。

$$E(\omega, b) = \frac{1}{N_{\text{train}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{train}}} L(y_i, f(y_i)) + \alpha R(\boldsymbol{\omega}) \quad (2)$$

Lは教師データに対する損失項であり、教師データ に対し分類を間違えるとスコアが増えていく。*R*(ω) は正則項であり、式が複雑になるほど値が増えるこ とで過学習を抑制する。SGD Classifier は、式(2) を最小とするパラメータ探索のため、確率的勾配降 下法を用いる。

SGD Classifier を用いる際、scikit-learn ライ ブラリ (Fabian et al. 2011; Lars et al. 2013) を用 いた。scikit-learn における、SGD Classifier の 主要なパラメータは penalty:正規化の種類、loss: 損失関数の種類、alpha:正規化の強さである。

#### 2.2 クラスタリングを用いた再構成誤差法

クラスタリングを用いた再構成誤差法は、半教師 学習を用いた異常検知アルゴリズムの一種であり、正 常なデータには一つ以上の特定の形やパターンがあ ると仮定する。そして、正常データはパターンごと に、データ空間でいくつかのクラスタ(群)を形成す るとし、正常なクラスタにも属さないデータは、異 常なデータとみなす。

再構成誤差法では、以下のような手順を踏む。(乾 et.al 2009)。まず正常な教師データ  $Y_{\text{train}} & \varepsilon k @ 0$ クラスタにクラスタリングする。このときそれぞれ のクラスタ中心を  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$  とする。任意のテ ストデータ  $z_i \in Z_{test}$  について、一番近いクラスタ 中心が  $\mu_j$  であるとき、 $z_i$  に対する再構成ベクトル  $\hat{z}_i = \mu_j$  とするこのとき元のベクトルと再構成ベク トルとの差として定義する再構成誤差  $E_{\text{clustering}}$  は

$$E_{\text{clustering}} = ||\hat{\boldsymbol{z}}_i - \boldsymbol{z}_i||^2 = ||\boldsymbol{\mu}_j - \boldsymbol{z}_i||^2 \qquad (3)$$

と表される。異常なデータは再構成誤差が大きくなり、これが閾値 *s* よりも大きいとき異常とみなす。

### 3 異常検知アルゴリズムの開発

#### 3.1 現象の背景

*Resolve* 装置で X 線を検出する際、主に約 200-300 Hz 以下 600 Hz 以下でのノイズが X 線イベントの エネルギー分解能に特に影響する。この周波数帯域 にパワーを持つノイズ源を監視し、その異常を検知 する必要がある。地上試験を通していくつかのノイ ズ源が特定されたが、ここでは検出器外部からの電 磁・微小擾乱干渉に起因する以下の2つのノイズ(そ れぞれ MTQ ノイズ、beat ノイズと呼ぶ)を対象と する。

(1)磁気トルカ (MTQ; magnetic torquer) による電磁干渉ノイズ。MTQ は XRISM 衛星に搭載される姿勢制御系のサブシステムの一つであり、127 Hzのパルス幅変調で磁場強度を調節するので、127 Hzとその高調波でのピークがノイズスペクトルに生じる(図1)。(Kurihara et al. 2022)。



図 1: MTQ ノイズが発生している時刻の 8k noise spec の一例。MTQ1,MTQ2,MTQ3 はそれぞ れ 127Hz,254 Hz,381 Hz を表す。



図 2: MTQ ノイズ、Beat ノイズが発生していない 時刻の 8k noise spec の一例

(2)機械式冷凍機による微小擾乱干渉ノイズ。 *Resolve* 装置には検出器を冷却するため、複数の冷凍 機が搭載されている。そのうちの2種類が、Stirling 冷凍機(4台)と Joule-Thomson 冷凍機(1台)と いう機械式冷凍機である (Ishisaki et.al 2022; Kanao et.al 2017)。このときそれぞれの機械式冷凍機の周波 数を $f_1, f_2$ とすると、二つの波の重ね合わせにより、 振幅が周波数  $\frac{nf_1-mf_2}{2}$  で変動する波(うなり)が生 じる。通常、フーリエ空間ではこのうなり周波数は現 れない(単に  $nf_1 \ \ mf_2$  に分解されるだけである) が、振幅に対して非線形応答があると、うなり周波 数  $\frac{nf_1-mf_2}{2}$  にもパワーが分配される。実際、*Resolve* 装置では、(n,m) = (24,7), (15,4)のときの beat ノ イズが実際に観測されている(図 3)(Imamura et al. 2022)。これらは、うなりの周波数が低周波数帯域に くるので、特に重要である。



図 3: Beat ノイズが発生している時刻の 8k noise spec の一例

#### 3.2 要件分析

*Resolve* 装置の運用では、1日に1回程度で、ノイ ズスペクトル (8k noise spec) が全ピクセルに対して 取得される。これらから、上述の2つのノイズが発 生しているかを検知するアルゴリズムを開発する。

異常検知に際し重要となる指標として、実際に異 常であったもののうちどれだけ異常と予測できたか の割合を示す「真陽性率」、実際は正常であったのに 異常と予測された「偽陽性率」がある(日本統計学会 2020)。今回は、検討したモデルで真陽性率の目標値 を 0.9 と設定し、これを超える検知を行うことがで きるのか、そして真陽性率 0.9 を超える検知を行う 場合、偽陽性率はどの程度の値になるかを検討した。

学習データとして、*Resolve* 装置の地上実験で、 2021/05/06 から 2022/06/17 までの期間(衛星初 期電気試験)で得られたデータを用いた。8k noise spec 一つのサンプルは、36 ピクセル × 4096 周波数 ビン(1.5 Hz から 6.25 kHz まで 1.5 Hz の周波数分 解能)のデータである。

#### 3.3 異常検知

#### 3.3.1 MTQ ノイズ

8k noise spec の 10 Hz から 400 Hz の帯域を、線 ノイズが強くあらわれる 4 つのピクセルのみに対し て、学習及びテストをする。このノイズは、すべて のピクセルに同時に出現するので、ピクセルを絞っ てもノイズ発生時間帯を特定するには問題ない。

8k noise spec のデータとして、MTQ が確実に駆 動している時刻の 82 サンプル、それ以外の時刻の 11597 サンプルを用意した。ここからランダム抽出 によりテストデータを構成した。テストデータは、 MTQ ノイズが立っていないデータ 115 サンプル、 MTQ を駆動時に 127 Hz とその倍波でピークが立っ ている 25 サンプルからなる。それ以外のサンプルは、 教師データとパラメータ推定用データとした。これ らのデータでは、MTQ を駆動している時間帯は既知 なので、その時に取得された 8k noise spec を異常、 それ以外で取得されたものを正常とラベル付けをし た。ただし、試験中に MTQ を駆動した時間が少な く、異常データのサンプル数が少なかったので、モ デルの最適パラメータ探索の精度や学習精度が低下 した。ゆえに今回は、SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique) (Chawla et.al 2002)  $\overleftarrow{c}$ もちいて異常サンプルを増やし、正常サンプル数と 均一な数にした。これにより、MTQ ノイズサンプル は正常サンプルの同数のサンプル数に増やした。

またそれぞれのデータを標準化させたのち、SGD Classifier のパラメータを決めるため、パラメー タ検証用データに対し、グリッドサーチを行った。 その結果、SGD Classifier のパラメータのうち、 penalty は L1、alpha を  $1 \times 10^{-7}$ 、loss を squared\_hinge とした。

以上のように構築したアルゴリズムに、検証用デー タを適用した。異常データ 25 サンプルと正常データ 115 サンプルを用いてテストした結果を混合行列と して表1に示す。真陽性率は1.0、偽陽性率は0.04 と なり、0.9 以上の真陽性率での検知が可能であること が示された。加えて、偽陽性率も十分に小さく、高 い確度で異常を検知できることが示された。

表	1:	S	GDO	Clas	sifier	の	M	ГQ	ノ	イ	ズ	検知	印の	)淮	合	行列
									1/1/1/1	5	~ 2			1		

		判断さ	れた結果
		異常	正常
実際の結果	異常	25	0
	正常	5	110

#### 3.3.2 Beat ノイズ

今回は 15 Hz 以下を学習・テストする周波数帯と した。また Beat ノイズは多種のパターンを持つので 再構成誤差法 (乾 et.al 2009) を利用することにし、 クラスタリングのアルゴリズムとしては *k*-means を 用いた。

今回用いる 8k noise spec の全サンプルは、beat ノイズが発生している時刻の 1356 サンプルとそれ 以外の時刻の 11593 サンプルである。ここからラン ダム抽出でテストデータを構成した。テストデータ は、beat ノイズが発生している 116 サンプル、発生 していないサンプル 678 サンプルである。残りを、教 師データとパラメータ (クラスタ数) 推定用データ とした。これらのデータでは、beat ノイズが発生し ている時間帯は既知なので、その時に取得された 8k noise spec を異常、それ以外で取得されたものを正 常とラベル付けした。

まず教師用データに対して標準化をした。そして、 その標準化をクラスタ数探査用、テスト用に対して 用い、標準化を行った。その後、クラスタ数推定用 データに対しクラスタリングを行い、エルボー法に よって最適なクラスタ数を探索した。その結果、ク ラスタ数を2に設定した。

結果、再構成誤差に対する閾値を真陽性率が0.9と なる点として定めたとき、偽陽性率0.35となった。 これは改善すべき課題である。

#### 4 考察

本稿では、XRISM 衛星に搭載されたミッション機 器 *Resolve* のデータに対する異常検知アルゴリズム の開発について紹介した。地上試験データを用いて 機械学習的な手法を用い、検出器ノイズスペクトル に含まれる異常ノイズスペクトルの検知アルゴリズ ムの開発を通して、同手法の有用性を検証した。

今回は異常ノイズスペクトルのうち、 MTQ ノイ ズと beat ノイズという既知の異常を検出対象とし た。MTQノイズに関しては、教師あり学習にもとづ き SGD Classifier を用いて検出を行った結果、真 陽性率 1.0、偽陽性率 0.04 での検出ができた。Beat ノイズに対しては、半教師あり学習にもとづき、ク ラスタリングを用いた再構成誤差法を用いて検出を 行った結果、真陽性率 0.9、偽陽性率 0.37 での検出 ができることが示された。

MTQ ノイズに関しては、機械学習で一般的に用 いられるモデルを使用した場合の結果であるが、実 用化を十分目指せるレベルの結果であり、機械学習 的手法が有効であることが示せた。Beat ノイズに関 しては、適切な閾値を設定することで、十分な真陽 性率での検知ができることが示されたが、同時に偽 陽性率が高くなり、誤警報が多くなることが分かっ た。ゆえに、先行研究 (乾 et.al 2009)で検討された VQPCA のような、通常用いられるモデルよりも複 雑なモデルを用いた再構成誤差法を検討し、偽陽性 率を低下させることが必要と考えられる。

#### Reference

Ishisaki, Y. et al., 2022, Proc of SPIE

- Tsujimoto Masahiro 2023, JSSIJ
- Kurihara, M. et.al. 2022, Proc. of SPIE
- Imamura, R. et al., 2022 Proc of SPIE
- Hasebe, T. et al, 2022 Proc of SPIE
- Boisberranger du Jérémie et.al., 2007, https://scikit-learn.org/stable/index.html
- Fabian Pedregosa et.al. 2011. Journal of Machine Learning Research.

Lars Buitinck et.al., 2013 arXiv preprint

- 乾稔 et.al. 2009 JSAI,
- Ishisaki Yoshitaka et.al., 2022. Proc of SPIE.
- Kanao Ken'ichi et.al, 2017. Cryogenics.
- 日本統計学会. 2020. 学術図書出版社.
- Chawla V.Nitesh, et.al. 2002 Journal of Artificial Intelligence Research.

--index へ戻る

観測a23

## 月周辺での放射線測定 MoMoTarO プロジェクト

## 前田 涼太

### 月周辺での放射線測定 MoMoTarO プロジェクト

前田 涼太 (京都大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

2023 年現在、Artemis 計画や月周回ゲートウェイといった、月面開発計画が多く立ち上がっている。この時流を受 け、我々は月面開発において必要不可欠となる月の水資源を、放射線により探索するプロジェクト Moon Moisture Targeting Observatory(MoMoTarO)を計画している。銀河宇宙線により月面で発生した高速中性子が水中を通 過した際、エネルギーを失うことによって熱中性子が生じる。この熱中性子を測定することにより、月の地中での水 資源を測定することができる。MoMoTarO では熱中性子の測定に、<sup>6</sup>Li をドープしたプラスチックシンチレータの EJ-270 を用いる。EJ-270 は、pulse-shape discrimination(PSD)能力により熱中性子、高速中性子、ガンマ線を 弁別することができる。本研究では、EJ-270 を用いた MoMoTarO の試作機を製作し、中性子源に対する弁別能力 をみるために <sup>252</sup>Cf を照射する卓上実験と、宇宙により近い環境での動作を確認するための気球実験を行った。卓上 実験からは、熱中性子の弁別を確認した。気球実験からは、大気中での熱中性子の高度プロファイルが得られ、地上 30km 圏内であれば試作機が正常に動作することが分かった。

#### 1 Introduction

現在、アメリカを中心とした Artemis 計画 (1) や、 JAXA が計画する月周回有人拠点 (ゲートウェイ) (2) など、月面開発を行う気運が高まっている。月面で 生活する人の飲料水となるなど、有人の月面開発にお いて、月の水資源は必要不可欠である。MoMoTarO プロジェクトでは、放射線検出器を用いて月面から漏 出する中性子を測定することで、水資源探査を行う。



図1:水資源による熱中性子発生の仕組み

図 1は月の地中で熱中性子が発生する仕組みの概 略図である。まず、高エネルギーの銀河宇宙線が太 陽系外から飛来する。これが、月の地中の深さ 1m 程 度で原子と核反応を起こし、0.5 MeV 以上のエネル ギーを持つ高速中性子が生じる。地中に水資源が存 在した場合、高速中性子は軽元素(水素など)によっ て散乱され、エネルギーが 0.5 eV 以下の熱中性子と なって放出される。この熱中性子を MoMoTarO で 測定する。

#### 2 測定の原理

#### 2.1 EJ-270

熱中性子を宇宙環境でのガンマ線や高速中性子な どのバックグラウンド事象と区別して高感度に測 定する必要がある。<sup>6</sup>Li を添加したプラスチックシ ンチレータ EJ-270 はそれらの弁別が可能であり、 MoMoTarO に搭載する予定である。図 2は EJ-270 の写真である。



🗵 2: EJ-270

図 3は EJ-270 内での、高速中性子と熱中性子、ガンマ線の反応の様子の概略図である。

シンチレータは、荷電粒子やガンマ線により励起 された原子内の電子が、基底状態に戻ろうとする時 2023 年度 第 53 回 天文·天体物理若手夏の学校



図 3: 各放射線と EJ-270 の反応

に放出する光を見ることで、入射した放射線のエネ ルギーを測定することのできる検出器である。

高速中性子は、陽子と弾性散乱を起こす。熱中性 子は、EJ-270 にドープされている<sup>6</sup>Li と (n,*α*) 反 応を起こして、トリチウムと *α* 線を放出する。ガン マ線は電子とコンプトン散乱を起こす。このように、 それぞれが異なる反応を示すことにより、電気信号 に差異が生じ、後に述べる波形弁別が可能となる。

2.2 pulse-shape discrimination (PSD)



EJ-270 に入射する放射線を弁別し、熱中性子の みを取り出す手法として、本実験では pulse-shape discrimination (PSD) を用いる。

図 4は、PSD の仕組みの概略図である。横軸は時間、縦軸は光の強度であり、それぞれの放射線の1パルスを示している。T<sub>total</sub>、T<sub>tail</sub> はそれぞれ、電荷量を計算するための積分時間幅である。1パルス全体の電荷量を Q<sub>total</sub>、パルスのピークからイベントの終了にかけての電荷量を Q<sub>tail</sub> とおくと、PSD は

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

とおける。図のように、放射線の種類によって PSD の値は異なる。各イベント毎にこの PSD 値を 記録することにより、放射線の弁別の指標とする。

3 MoMoTarO の試作機



図 5: MoMoTarO の試作機

MoMoTarO を製作するに先立ち、EJ-270 の性能 評価を行うための試作機を製作した。図 5が試作機 の写真である。図の点線で囲った部分に、サイズ 70 mm×70 mm×30 mm の EJ-270 がマウントされて いる。また、右下の液晶画面には、波高値と PSD の 二次元ヒストグラムを表示することができる。



図 6: MoMoTarO の試作機の回路の概略図

図 6は、試作機の回路図の概略図である。MPPC は、EJ-270 で発生したシンチレーション光を電気信 号に変える。それを、アナログ回路で増幅し、ADC でデジタル信号に変換する。そうして生じた波形 を MCU 内部で解析し、パルスの波高つまり放射 線のエネルギーに対応する波高値と、波形弁別のた めの PSD 値を microSD カードに記録する。また、 BME280 は環境センサーであり、GPS の情報ととも に microSD カードに記録される。

#### 4 <sup>252</sup>Cf 照射実験

試作機の弁別能力を測定するために、中性子源の <sup>252</sup>Cf を試作機に照射する卓上実験を行った。<sup>252</sup>Cf 2023 年度 第 53 回 天文·天体物理若手夏の学校

は、連続的なエネルギーを持つ中性子とガンマ線を 放射する線源である。

MoMoTarO の試作機内部の、EJ-270 の部分から 15 cm 離した位置に、<sup>252</sup>Cf を設置した(図 7)。この 状態で、10 分間データを取った。また、ポリエチレ ン製の厚さ 5 cm の減速材を二つ用意した。これは、 入射した高速中性子を減速させて、熱中性子へと変 えることができる物体である。これを、<sup>252</sup>Cf と試作 機の間に 2 つ設置した(図 8)状態で、10 分間データ を取った。表 1は、各実験の測定日時を示している。



図7:減速材なし

図 8: 減速材あり

測定方法	計測日時			
減速材あり	2023/06/22 13:18~13:28			
減速材なし	$2023/06/22$ 17:13 $\sim$ 17:23			
表1:各実験の測定日時				

この実験により得られた、パルス波高値と PSD の二次元ヒストグラムが図 9と図 10である。図 9は 減速材がない場合のヒストグラムであり、赤い点線 で囲った部分が高速中性子に対応する。図 10は減速 材を置いた場合のヒストグラムである。赤い点線で 囲った部分は、減速材の設置によりイベント数が上昇 しており、熱中性子に対応すると考えられる。従っ て、この EJ-270 において、パルス波高値がおよそ 100 から 250、PSD がおよそ 200 から 300 のデータ が、熱中性子として弁別されることが分かった。

#### 5 気球実験

宇宙は地上と比べ、低気圧、低温であり、宇宙線に よって放射線量が高い環境にある。そうした環境に おいても、試作機が正常に動作するかを確認するた め、より宇宙に近い環境での実験として、気球を用い



図 9: パルス波高値と PSD 値の二次元ヒストグラム (減速材なし)



図 10: パルス波高値と PSD 値の二次元ヒストグラム (減速材あり)

て、高度 30 km 以内で試作機を動作させ、大気中の 中性子を測定する実験を行った。同時に、空気シャ ワーの中性子成分を測定し、シミュレーションとの 比較や航空機での被ばく線量の推定などに活用する ことも目的としている。

この実験は、2022/10/21 の 10:20 から 12:40 まで 行われた。図 11は気球が通った経路であり、徳島県 から打ち上げた後、和歌山県の沖合に着水した。

図 12は、気球実験における、全高度でのパルス波高 値と PSD の二次元ヒストグラムである。卓上実験と 同様、パルス波高値がおよそ 100 から 250、PSD が およそ 200 から 300 のあたりに、熱中性子が多く見 られる。この中から、パルス波高値が 140 から 200、 PSD が 200 から 280 のイベントを取り出し、横軸 を時間、縦軸をイベント数として熱中性子のライト



図11: 気球の経路(出典: GOCCO.)

カーブをプロットしたものが、図 13である。下部に は、横軸をライトカーブと同スケールにとった時間 ごとの高度変化をプロットしている。



図 12: パルス波高値と PSD 値の二次元ヒストグラム (気球実験)



図 13から、高度が上がるにつれイベント数が上昇 し、15 km をピークとして徐々に減少していくこと がわかる。これは、空気シャワーに由来する結果で あると考えられる。空気シャワーとは、高エネルギー の宇宙線が地球大気に入射し、大気の原子核と相互 作用を起こして、パイオンなどの 2 次粒子が生じる 反応が連鎖的に起こることにより、多数の粒子が発 生する現象のことである。この際、中性子も放出さ れる。この 2 次粒子の平均エネルギーが、高度が下 がるにつれて小さくなり、新たな粒子が作れなくな ると空気シャワーは減衰していく (3). この空気シャ ワーのピークが 15 km 程度とされており (4)、実験 結果はその事実と一致する。

このように、試作機を用いて大気中の中性子の高 度プロファイルを得ることができた。熱中性子と考 えられるパルス波高値や PSD の値は地上での値とほ ぼ違わず、高度 30 km 以内において EJ-270 や周辺 機器が問題なく動作することが分かった。

#### 6 まとめと今後の展望

月周辺で放射線測定を行う MoMoTarO プロジェ クトに向けて製作した試作機は、高度 30 km 以内と いう地上に比べより宇宙に近い環境において、正常 に動作することが分かった。今後は、より滞在時間 を長くした実験や、より MoMoTarO の実機に近い 試作機の製作、弁別能力の改良などを行いたいと考 える。

#### Reference

- [1] Marshall et al. 2020, 2020 IEEE Aerospace Conference
- [2] Narita et al. 2019, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会 講演集
- [3] 日本天文学会."空気シャワー". 天文学辞典.
   https://astro-dic.jp/air-shower/,(参照 2023-07-28)
- [4] R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)

--index へ戻る

## 観測a24

## Boltzmann シミュレーションにおける衝突項計算の GPU を用いた高速化

## 山菅 昇太郎

## Boltzmann シミュレーションにおける衝突項計算の GPUを用いた高速化

山菅 昇太郎 (筑波大学大学院 物理学学位プログラム)

#### Abstract

従来、宇宙の構造形成を説明する理論的なダークマターのモデルの一つとして CDM モデルが使われてき た。このモデルは速度分散が極めて小さくダークマター粒子同士の散乱が無視できる無衝突なダークマター モデルであり、現在の観測される宇宙大規模構造の様々な観測量をうまく説明することに成功してきた。し かし近年では、銀河よりも小さなスケールでは CDM モデルによって観測を完全に説明できない点があるこ とがわかっている。この観測との食い違いを解消するために新しく提唱されたダークマターモデルとして、 Self Interacting Dark Matter(以下、SIDM)と呼ばれるダークマター粒子同士の衝突・散乱を取り入れた ダークマターモデルがある (Spergel, D. N., 2000)。SIDM の数値シミュレーションでは、主に N 体シミュ レーションによって研究が行われていた。しかし N 体シミュレーションで衝突・散乱の効果を取り扱おうと する場合、その性質からショットノイズが乗りやすい。一方で、ダークマターの分布関数を有限体積法的に 取り扱い、その発展を Boltzmann 方程式によりシミュレーションする方法では、原理上ショットノイズが 発生せず、高い精度で計算することができる。しかし、速度空間での5重積分を計算に含む衝突項を現実的 な時間で計算するためには高速化が必須である。高速に精度よく衝突項を計算する手法として、Gamba et al.(2017) による衝突項の数値計算手法がある。しかし、この方法で CPU による計算コードの実装を行って も空間メッシュあたりの衝突項計算にかかる時間は 0.2s-1.0s ほどであり、大規模なシミュレーションを現 実的に行える計算時間ではない。本研究では高い演算性能を持つ GPU を用いて、計算の並列化を利用した コードを開発することで高速化を試みた。結果、1 空間メッシュの衝突項評価にかかる時間を 1ms まで短縮 することに成功し、CPU での実装と比較して数百倍の高速化効果が得られた。

#### 1 衝突項計算の数値解

#### 1.1 Boltzmann 方程式

自己重力系における Boltzmann 方程式は f(x, v, t)を位相空間における物質分布を表す分布関数として

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \boldsymbol{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}} - \nabla \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{v}} = Q[f]$$
(1)

で表される。ここで、 $\phi(\mathbf{x},t)$ は重力ポテンシャルである。また、右辺が衝突項と呼ばれる項で、

$$Q[f](\boldsymbol{v}_1) = \int_{\mathbb{R}^3} \int_{\mathbb{S}^2} [f(\boldsymbol{v}_1')f(\boldsymbol{v}_2') - f(\boldsymbol{v}_1)f(\boldsymbol{v}_2)] \\ \cdot |\boldsymbol{v}_2 - \boldsymbol{v}_1| \frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\Omega} \,\mathrm{d}\Omega \,\mathrm{d}^3 \boldsymbol{v}_2$$
(2)

で表される。ただし、 $v_1, v_2 \ge v'_1, v'_2$ はそれぞれ衝 突前後の 2 体の速度で後者は前者についての関数と なっている。また、 $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ は衝突の微分散乱断面積で ある。

#### 1.2 衝突項の数値計算手法

衝突項を速度空間で離散化して計算すると、運動 量保存や力学的エネルギー保存に由来する拘束条件  $v_1+v_2 = v'_1+v'_2, v_1^2+v_2^2 = (v'_1)^2+(v'_2)^2$ が存在す るため、離散化誤差が大きくなり精度よく積分がで きない。そこで、スペクトル法を用いて波数空間で衝 突項を計算することで精度を向上させることができ る (Pareschi & Russo 2000)。<sup>1</sup>波数空間上での衝突項 は次のようになる。物理的には総和の中の $B(k_1, k_2)$ が分布関数の増加に寄与する項、 $B(k_2, k_2)$ が減少に 寄与する項である。

$$\hat{Q}(\mathbf{k}) = \sum_{\mathbf{k}_1 = \mathbf{k} - \mathbf{k}_2} \sum_{\mathbf{k}_2} \hat{f}(\mathbf{k}_1) \hat{f}(\mathbf{k}_2) (B(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) - B(\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_2)),$$
(3)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>デルタ関数を波数空間に移すと一様な分布となるように、離 散点間隔に対して積分領域が非常に狭い場合は非積分関数を波数 空間に移すことで離散点間隔に対して滑らかな関数とすることが できる

ここで $\hat{f}(\mathbf{k})$  は速度分布関数のフーリエ成分である。 しかし、この計算をそのまま行うと速度空間での 1 次元方向の分解能を N としたときの計算量が  $O(N^6)$ となるため、非常に時間がかかる。そこで波数空 間の衝突項を畳み込みの形に変形し、高速フーリ 工変換 (FFT) を利用して計算することで計算量を  $O(MN^4 \log_2 N)$  に減少させる事ができる。M は立 体角積分を評価する際の分割数で、 $(M \ll N)$ であ る (Gamba et al. 2017)。また、散乱時の二体の入れ 替えに関する対称性を利用することで、計算中の立 体角積分の領域を半分に削減することができる。こ れにより、計算コストに加え、作業に必要なメモリ を半分にすることが可能である。

# 2 衝突項計算の GPU による高速 化

#### 2.1 GPU について

GPU(Graphics Processing Unit) は、画像・映像 の処理に最適化されたアーキテクチャをもつ演算装 置である。汎用的な計算を目的とする中央演算処理 装置(CPU)とは異なり、主に 3D グラフィックスを 高速にレンダリングする目的で設計されているため、 CPUと比べ並列処理可能な演算を多数同時に効率よ く計算できる。また、演算を行う上でのメモリアク セスに対するボトルネックを最小にするため、GPU ボード上には高速な専用メモリとキャッシュ、コンス タントメモリ等が用意されており、これらを適切に 使用することで演算速度を向上させることができる。

この特性を利用し高速化が可能である科学技術計算 を、GPU上で行う技術を GPGPU(General-purpose computing on Graphics Processing Unit)と呼ぶ。主 に科学計算や深層学習などの高速化に利用されてい る。一方で、GPUの利用には CPU による制御が必 要であり、また GPU上でのデータ操作は GPU ボー ドに用意された専用のメモリ領域で行われる。その ため、GPU で計算した情報を CPU 側で利用する際 は、CPU が利用するメモリにデータを転送する必要 がある。この特性から、CPU での計算時間と GPU での計算時間の差に対して転送時間が支配的になる 場合は、GPU を用いても CPU上での計算と比較し て高速化できない場合もある。言い換えると、並列 処理可能な演算が非常に大量に必要な計算であれば GPU を用いて効率的に高速化することが可能であ る。GPU では、個々の並列計算可能な処理をスレッ ドと呼ばれる単位に分割して行うことで処理速度を 劇的に向上させている。

#### 2.2 実装と高速化効果の測定

本研究では、前述のアルゴリズムで実装した衝突 項の計算コードを NVIDIA 社の GPU A100 を用い て高速化した。数値シミュレーションコードの開発 には NVIDIA 社の開発プラットホームである CUDA を用いて高速化した。衝突項計算で必要な FFT と 畳み込みは、CUDA の FFT 並列処理ライブラリで ある cuFFT を用いて実装した。また、積分の総和演 算、衝突項の効果を足し上げる処理を並列化するこ とで高速化を試みた。後者では並列に実行されてい るスレッドから同時に同じアドレスへ書き込みが発 生する可能性があるため、CUDA のアトミック演算 を利用した。加えて、GPUの高い演算性能を最大限 に利用するために、複数の空間メッシュを同時に並 列処理するように実装を行った。CPU で実装した際 との実行時間の比較を表1に示す。計算は Euler 法 により 25 ステップ行った。CPU での計算と比べて、 数百倍の演算性能が得られていることがわかる。

表 1: 1 空間 (32<sup>3</sup> メッシュ) あたりの1ステップ計算 に要した時間

	2	
Processor	並列空間メッシュ数	wall time
	(nsize)	[msec/step/nsize]
GPU	8	8.29
GPU	512	1.15
CPU	1	1126.4

#### 2.3 さらなる高速化

CUDA 上では BF16 と呼ばれる浮動小数点フォー マットを利用することができる。これは通常の 16bit 浮動小数点である FP16 の指数部を大きくとったフ ォーマットになっており、必要なメモリ領域が FP32 の半分で、FP16 よりも高精度な計算が可能である利 点がある。また、1.2 節で述べた散乱の対称性を利用 して立体角積分の領域を半分にする方法は、計算量 だけでなく計算に必要なメモリ領域も半分に削減す ることができる。これらを利用することで、GPUメ モリ上に乗せられる情報量を増やすことができ、結 果として GPU 上での計算の並列度をより高めること ができる。並列空間数を64メッシュ、立体角積分の 分割数を 50 とした際に、それぞれの方法で一ステッ プの計算にかかる時間を表2に示す。Base は前節と 同じ通常の GPU コード、Symm は散乱の対称性を 利用したコード、Symm+BF16は散乱の対称性に加 えて BF16 による実装をおこなったコードの実行時 間である。全ての計算で空間メッシュは64、立体角 分割数は 50 としている。Base よりも対称性を利用 したコードが高速であることがわかる。対称性を利 用したコードに BF16 を適用したものは、計算時間 としては Symm 単体よりも遅い結果のように見える が、実際には Symm + BF16 の手法では計算に必要 なメモリ量が Symm の半分となっているため、空間 メッシュ数を Symm で取りうる最大値の二倍に設定 することができる。これにより、GPUの性能を最大 限に利用した場合は Symm 単体よりも高速に計算す ることができる。

表 2: 64 空間メッシュ(32<sup>3</sup> メッシュ), M=50 で 1 ス テップ計算に要した時間

Method	計算時間
	[msec/step/nsize ]
Base	8.43
Symm	5.88
Symm+BF16	7.31

#### 3 まとめと今後の課題

本研究ではダークマターの分布関数に基づく Boltzmann 方程式の衝突項計算を GPU上で並列に実行す るコードを作成し、CPU での計算に対して数倍から 数百倍の性能向上に成功した。1 空間、1 ステップあ たりの衝突項計算時間は空間メッシュ数 n = 512、速 度空間のメッシュ数  $32^3$ 、分割数 R = 16、M = 6 と したときにおよそ 1msec であり、十分に実用的な時 間で衝突項計算を行えるようになった。

今後はこれらのさらなる最適化を試みるとともに、 この計算を取り入れた Boltzmann 方程式の数値シ ミュレーションを実行することを目標とする。

#### Reference

Pareschi & Russo, SIAM J. Num. Anal., (2000), 37, 1217

Gamba et al. SIAM J. Sci. Comput., (2017), 39, B658

Spergel, D. N., & Steinhardt, P. J. 2000, Phys. Rev. Lett., 84, 3760
--index へ戻る

### 観測a25

TimePix3 搭載の半導体検出器を用いたミューオンの 飛跡の三次元再構成と α 線に対する基礎性能評価

伊藤 尚輝

#### TimePix3 搭載の半導体検出器を用いた ミューオンの飛跡の3次元再構成

伊藤 尚輝 (東京理科大学大学院 創域理工学研究科)

#### Abstract

TimePix 検出器はピクセル幅が 55 µm のピクセルを 256×256 個を持つ半導体センサーと、欧州の CERN が開発した TimePix と呼ばれる特定用途向け集積回路 (ASIC) で構成されているハイブリッド型の半導体検 出器である。TimePix シリーズの 1 つである TimePix3 は、1.56 ns の時間分解能を持ち、ToT(Time-over-Threshold) モードで入射放射線のエネルギー情報を取得し、ToA(Time-of-Arrival) モードで到来時間を取 得することができる。また、TimePix 検出器は 3 次元的に荷電粒子の飛跡とエネルギー情報を識別でき、X 線や γ 線のイメージングだけではなく、NXB(Non Xray Background) の原因となる宇宙線の荷電粒子のエ ネルギー・到来方向の測定や高いフラックスの状況下での測定に使うことができる。小さく、軽量なため、超 小型衛星を用いた宇宙線観測や国際宇宙ステーションでの環境計測への応用が期待されている。 そして、この TimePix の宇宙での利用に向けて、荷電粒子に対する応答のエネルギー依存性、入射角度依存 性について知る必要がある。今回私は、地上に降ってくる放射線の 1 つである大気ミューオンを測定し、大 気ミューオンのセンサー中での飛跡に対して TimeWalk の補正を用いた 3 次元再構成を行ない、TimeWalk の補正が飛来した粒子の到来方向を決めるのに重要であることであることを実証した。

#### 1 X $k_{\gamma}$ 線天文学と半導体検出器

X 線 γ 線天文学は天体の X 線、γ 線の画像、時 間変動、スペクトル、偏光などの情報から天体の大 きさ、温度など様々な様々な物理量を求めることで 超高温、高密度などの極限環境下での天体の物理状 態、運動、さらには天体や宇宙の天体や宇宙の進化 過程を解明することを目的としている。X 線 γ 天 文学の抱えるいくつかの課題の1つとして、「衛星 に搭載された検出器で検出される NXB(Non X-ray Background)の除去」がある。

NXB は、天体が放射する X 線や γ 線ではなく, 擬似 X 線・γ 線として検出されるものである。主 な原因は、検出器由来のノイズ、宇宙線である荷電 粒子の直接検出、または地球の大気や衛星を構成す る物質と相互作用をすることによって X 線や γ 線 が発生することである。このことから、荷電粒子の 到来方向・エネルギー・種類を直接観測し解析する ことが、NXB の正確なモデル化に不可欠になる。

この課題を解決することが期待されている検出 器の1つが「TimePix」と呼ばれるハイブリット型 半導体ピクセル検出器である。TimePix は、時間 分解能に非常に優れ、荷電粒子のトラッキングが可 能である。次章以降、この「TimePix」についての 紹介を行う。

#### 2 TimePix

#### 2.1 TimePixの概要

TimePix は欧州の CERN にて素粒子実験での利 用を目的として開発されたハイブリッド型半導体 ピクセル検出器である。主な特徴は以下の通りで ある。

- 1. センサー層と読み出し回路層が互いに独立
- センサー部には 256 × 256 個のピクセルがあ り、各ピクセル幅は 55 μm
- 3. USB インターフェースで駆動が可能
- 4. 「時間」を用いてエネルギー、到来時刻の記録 を行っており、TimePix3の放射線の到来時刻 の記録には 1.65 ns の時間分解能がある

以下の図1は、TimePixを使った検出器の外観、 図2は検出器全体の内、センサー部分にフォーカス した模式図を示している。



図 1: TimePix 検出器の外観



図 2: センサー部分の模式図

#### 2.2 放射線のエネルギーと到来時刻の 測定原理

また、特徴の4で記述した通り、TimePix はエ ネルギーを時間に変換してデータを記録すること がポイントになる。測定モードとして、ToT(Time over Threshold)と ToA(Time of Arrival)がある。 その概念について説明する。

- ToT(Time over Threshold) 放射線のエネルギーを計測する。放射線のエ ネルギーを放射線による信号がエネルギー閾 値を越えている時間としている。エネルギー が大きいほど信号の波高値は大きくなるため、 エネルギー閾値を越えている時間が長くなる。 時間計測は 40 MHz のクロック信号で行われ ており、25 nsの時間分解能を持つ。
- ToA(Time of Arrival)

放射線の到来時間を計測する。放射線による 信号がエネルギー閾値を越えた時間を到来時 間としてみなしている。通常の40 MHzのク ロック信号に加え、放射線による信号が、エネ ルギー閾値を越えた瞬間に発動する640 MHz のクロック信号を用いることで、1.65 ns の時 間分解能で到来時間を計測することができる。



図 3: ToT と ToA の概念図

#### 2.3 TimeWalk

次に、放射線計測時に発生する TimePix 特有の 現象である TimeWalk について説明する。



図 4: TimeWalk の概念図

TimeWalk とは、放射線の信号の波高値によって 発生する ToA のずれのことである。図4に示してい るように、30keV に相当する放射線の信号と、5keV に相当する放射線の信号を比較すると、信号の立ち 上がり時刻が同じでも、エネルギー閾値を越えるタ イミングが異なるため、ToA にずれが生じている ことがわかる。

この ToA のずれは正確に放射線の到来時間を知 るためにも、補正をすることが重要になる。第3,4 章では、実際にこの TimwWalk の補正を行うため の関数を作成し、実際のデータに適応させた。 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

#### 3 実験内容・目的

今回、TimeWalkの補正を行うことで、センサー 内を通過した大気ミューオンの飛跡の3次元イメー ジがどのような変化を見せるのかを調べることを 目的として、以下の3つのことを行なった。

- 1. TimeWalk の補正関数の作成
- 2. 大気ミューオンの測定
- 大気ミューオンのデータに対する TimeWalk の補正関数の適用

#### 3.1 TimeWalk の補正関数の作成

TimeWalk の補正関数の作成手順を以下に示す。

- 1. TimePix3 検出器を用いて <sup>133</sup>Ba の測定を行 なった。
- <sup>133</sup>Ba は約 31keV の X 線を放射するため、 31keV 付近に輝線ピークが立つ。そこで、総 エネルギーが 28keV~34keV かつ最もエネル ギーの大きなピクセルのエネルギーが 15keV ~22keV であるような 2~4 ピクセルイベン トを抽出した。
- 2 で抽出したイベント毎に、最もエネル ギーの大きなピクセルの ToA を基準と して他のピクセルの相対的な ToA の値、 「dToA(TimeWalk)」を計算した。
- 図5に、例として1つの3ピクセルイベントの 各ピクセルのエネルギーを示す2次元イメージ、各ピクセルのdToAを示す2次元イメージを示した。

最後に横軸をエネルギー縦軸を dToA として、エ ネルギーに対する dToA の分布をプロットした 2次 元イメージを作成した。各エネルギーの dToA の中 央値を代表点としてフィッティングを行い、Time-Walk の補正関数を求めた。(図 6)



図 5: 各ピクセルのエネルギー (上図) と dToA(下 図) を示す 2 次元イメージ



図 6: エネルギーに対する dToA の分布と Time-Walk の補正関数の結果

#### 3.2 大気ミューオンの測定

大気ミューオンの測定では、何も放射線源がない 空間に TimePix3 検出器を設置し、30 分間のデー タ取得を行った。

図7に実際に TimePix3 検出器で取得した大気 ミューオンのイメージを示す。



80 70 60 Energy [keV] . 50 . 120 40 100 dToA [ns] 30 80 60 20 40 10 35 30 25 20 <sup>xpos [pix]</sup> 20 0 55 50 45 40 35 30 ypos [pix]

図 7: TimePix3 検出器で取得した大気ミューオン のイメージ

図 8: ミューオンの飛跡の 3 次元イメージ (Time-Walk の補正関数の適用前)



図 9: ミューオンの飛跡の 3 次元イメージ (Time-Walk の補正関数の適用後)

#### Reference

Benedikt et al. 2017, Eur Phyys. J . C, 77:421

M.Urban et al. 2017, Contrib.Astron.Obs.Skalnate Pleso,47,151-156

#### 3.3 大気ミューオンのデータに対する TimeWalkの補正関数の適用

3.1 と 3.2 の結果を用いて、ある 1 つのミューオ ンの飛跡に対して、TimeWalk の補正関数 (図 6) を 適用した。

X 軸を各ピクセルの xpos [pix]、Y 軸を各ピクセル の ypos [pix]、Z 軸を dToA [ns]、プロット点の大 きさと色をエネルギーとして、3 次元イメージを作 成した。(プロット点が大きく、青に近い色ほどエ ネルギーが大きい)以下の図 8 と図 9 に TimeWalk の補正関数を補正する前と補正した後のミューオン の飛跡の 3 次元イメージを示した。

図9から、TimeWalkの補正を行うことによって ミューオンの飛跡はより直線的なものになり、より 正確な到来方向を知ることができると言える。

#### 4 結論・まとめ

TimeWalk 補正を行うことは、ミューオンを含め、高エネルギーの荷電粒子の到来方向を知る上で不可欠なものだと言える。今後、荷電粒子の高い エネルギーの測定についても評価を行い、TimePix の性能の優れた点と、課題点をさらに明らかにして いこうと考えている。 -index へ戻る

観測b01

# ブラックホール解明に向けた86GHz帯低雑音受信機の開発

### 亀山 晃

#### ブラックホール解明に向けた 86GHz 帯低雑音受信機の開発

亀山 晃 (大阪公立大学大学院 電波天文学研究室)

#### Abstract

EAVN は、日本を初めとする東アジア各国の約 20 局の電波望遠鏡を連携させた観測網であり、小笠原 – ウ ルムチ間で最大直径 5,100 km に及ぶ世界最大級の電波望遠鏡観測網である。EAVN で近年特に精力的に開 発整備が進められている 86 GHz 帯は M87をはじめとする近傍の活動銀河ジェット天体において、降着円盤 に迫るスケールでジェットの付け根を観測するのに最適な周波数領域と考えられている。この周波数領域で モニター可能な高感度・高解像度 VLBI アレイの構築を EAVN で目指している。これにより、ジェット生成 における最重要パラメータ(初速度、加速度、磁場、スピン)を決定し、駆動理論が確かめられる (1)。

これを受け、我々は水沢と石垣の VERA20 m 望遠鏡に搭載する 86 GHz 帯低雑音受信機の開発を行って いる。搭載する受信機は、RF 系の冷却 HEMT アンプまでを冷却可能にした 67–116 GHz 帯の円偏波受信 機を検討している。本研究では受信機の常温部分である LO、IF 系の 67–116 GHz をダウンコンバートする 手法として、以下の 2 種類の方法を検討している。1) HPF を用いた single side band (SSB) 受信機の開発、 2) 2 side band (2SB) Mixer の開発 (2)。1) では既に、水沢 VERA20 m 望遠鏡に 86 GHz 帯片円偏波常温 受信機の搭載を行っている。それを用いて、能率測定や KVN との VLBI 試験観測を進めている。また、2) では、パワーディバイダーと 90° ハイブリッドカプラーの開発行っており、67–116 GHz 帯域で反射損失、 Isolation ともに -25 dB の性能を目指している。本公演では、現在開発を進めている極低温冷凍機を用いた 両円偏波低雑音受信機の開発進捗についても述べる。

#### 1 Introduction

多くの銀河の中心部には、太陽の数百万倍から数 +億倍の質量をもつ巨大なブラックホール (BH) が存 在すると知られている (3)(4)。ブラックホール自体は 輝かないが、吸い込まれる物質の重力エネルギーを 燃料として、その周辺ではさまざまな活動現象が見 られる。これらの現場を直接観測することは BH本 体の性質や活動性、さらには銀河との宇宙論的共進 化を解明することにつながるため、天文学の一大分 野として活発に研究が進められている。一部の巨大 BH は物質を吸い込むと同時に強力な「噴出」もして いることが知られている.「ジェット」と呼ばれるこ の現象は、電離したガス流 (プラズマ) が細く絞られ た形状で、しかも相対論的速度(光速の99%を超え ることもある) で数千から数万光年にもわたって宇宙 空間を突き進む宇宙最大級の高エネルギー現象であ る[図1]。

活動銀河ジェットは膨大な力学的エネルギーによっ て母銀河や銀河間空間にも影響を与え、その解明は 宇宙進化の理解においても重要である。ジェット駆動 は、2000年代の数値実験の進展により、理論的には



図 1: M87 の可視光画像 (左図) と予言されるジェッ ト構造 (右図)

「磁場駆動型モデル」が最有力候補とされている (5)。 本モデルによると、回転する BH 近傍で増幅された 磁場がジェットを駆動し、 磁気エネルギーを運動エ ネルギーに転換することで BH 近傍約 10~1000 シュ バルツシルト半径 (Rs) の距離にかけて物質の収束と 加速が予言されている。よってあらゆる装置の中で 最高分解能を誇る超長基線電波干渉計 (VLBI)でこ の領域を直接撮像することがジェット生成機構解明 に向けて重要である。また、BH の中心核を探るため の偏波観測では、ファラデー回転度量 (RM) が重要 になってくる。これまでの VLBI の RM の測定では、 狭い帯域での偏波観測が行われていたため RM の不 定性が大きい問題であった。そこで、広帯域偏波観 測を実現できるようにすることで、RM の不定性が 減少し、これまで VLBI 観測で困難であった BHの 中心核の環境が見えてくる。そのために、近年開発 が進んでいる広帯域円偏波分離器を使用することで、 67-116 GHz 帯円偏波受信機の開発が可能である。 水沢・石垣観測局で86 GHz帯の観測が可能かどうか を確認するために、86 GHz 帯常温受信機の開発およ び、試験観測が行われている [図 2]。86 GHz 帯での 観測実現性については、水沢で検討チームが立ち上 げられており、過去 10 年分の 22 / 43 GHz 帯で実測 した大気・気象データに基づき、水沢・石垣ともに 夏期以外であれば多くの期間で 86 GHz 観測は可能 であることが示唆されている (水沢・石垣の信号検出 は、広帯域記録や野辺山局の参加により更に強固に なる)。この検証を行うために、86 GHz 常温受信機 の開発および搭載を行い、予想される望遠鏡の能率 (~20%)と同程度の結果が得られている [図 3]。



図 2: 常温受信機のブロックダイアグラム



図 3: 常温受信機による Sio maser (Orion-KL) 解析 結果

#### 2 冷却受信機の検討

搭載する受信機は、Low Noise Factory 社の冷却 HEMT アンプを用いた 67–116 GHz 帯の円偏波受 信機 (6) を検討している。また、受信機を冷却する Dewar の設計も進めており、冷凍機は、~55 K ま で冷却可能な SUNPOWER の Cryotel と Radiation Shield に使用する Twinbird の SC–UERF を検 討している [図 4]。



図 4: Dewar 内のコンポーネント (左図) と冷凍機 (右図)

#### 2.1 HPF を用いた SSB 受信機の開発

冷却受信機の IF 系は2 通りの方法を検討してい る。ここでは High Pass Filter (HPF) を用いた Single Side Band (SSB) 受信機の方式を示す。HPF を用 いた SSB 受信機のブロックダイアグラムを [図 5] に 示す。



図 5: HPF を用いた SSB 受信機のブロックダイアグ ラム

HPF は、83 GHz よりも高周波側が透過できる構 造になっている。よって、LO 周波数を 80 GHz あた りにすることで SSB 方式で 86 GHz が受信可能であ る [図 6]。



図 6: 使用する HPF の性能

#### 2.2 2SB Mixer 方式

2 Side Band (2SB) 受信は、heterodyne 方式による 受信機の中での受信モードの一つである。2 SB 方式 は、Double Side Band (DSB) mixer を2 個と2 SB ユ ニット等を用いる事で、Upper Side Band (USB) と Lower Side Band (LSB) 信号を別々に分離して同時に 出力できる方式である [図 7]。



図 7: 2SB システムのフローチャート (左図) と概念 図 (右図)

この方式ではその特性から、広い周波数帯が受信 可能である事や、時間経過により変動するgain、時 間経過による大気状態や受信機雑音温度の変動が同 じ状況 (条件)のまま観測できるメリットがある。ま た、LHCPと RHCPの両 Side Bandを一度に 受信 出来るので観測効率が良い。しかも導波管型回路で 分離するので機械的な可動部分が無く、再現性の問 題や時間経過による劣化の問題も無いことがメリ ットに挙げられる。また、近年開発されている常温 Mixerの IF では、25 GHz を超える IF を出力するこ とから 67-116 GHz の信号を一度の観測で取得でき る可能性がある [図 8]。



図 8: 2SB システムを用いた受信機のブロックダイ アグラム

しかし、この方式の困難な点としては、USBと LSBにもれ込みなく分けることである。これに は、Dividerや Hybrid Couplerの位相差や強度の 性能が肝である。そこで、私は Power Dividerと LO Hybrid Coupler の開発を進めている。これらの コンポーネントでは、位相差や等分配が重要になっ てくる。そこで開発にあたり、下記の目標を設定し ている。

表 1: 目標値 (67-116 GHz 間)

		目標値 -25 dB -3 dB -25 dB	
	反射損失	-25 dB	
Power Divider	挿入損失	-3  dB	
	アイソレーション	-25  dB	
	反射損失	-25 dB	
Hybrid Coupler	位相差	$90 \pm 0.5 \text{ degree}$	
	挿入損失	-3  dB	

目標値を踏まえて、設計した Power Divider のシ ミュレーション結果を [図 9] に示す。設計した Divider は、Magic-T型を採用している。Magic-T型 導波管は、4つの端子を持つ4開口素子のひとつで、 E面T分岐導波管 (図 9 の中央図)とH面T分岐導波 管 (図 9 の右図)が組み合わされた構造になっている。 マジックT型導波管のポート1からTE 10 モードで マイクロ波を入力すると、ポート 2 とポート 3 には 同相で等電力に分配されますが、ポート 4 に向かう マイクロ波は、伝播方向に電界が向いたTMモード になる。よって、カットオフとなるので、ポート 4 に は伝送しない構造になっている。この構造に、ステッ プやリッジ構造を導波管内に加えることで、広帯域 のアイソレーションを実現しようとしている。 68-112 GHz の周波数帯域で、反射損失・アイソレー

ションが-20 dBm 以下、挿入損失が-3±0.1 dBm の 結果が得られた。



図 9: 設計した Power Divider とシミュレーション 結果

次に、設計した 90° Hybrid Coupler のシミュレー ション結果を図 10 に示す。Hybrid Coupler の構成と しては、ブランチ数を 9 個に設定して、ブランチの 間隔を  $1/4 \lambda$  の長さにすることで Port3 と Port4 の 位相差を $\pi/2$ になるようにした。

70-120 GHzの周波数帯域で、反射損失が-21 dBm以下、Port3と Port4の位相差が 90±0.5 deg、強度比が-3±1 dBmの結果が得 られた。

#### 3 まとめと今後の展望

今回、86 GHz 帯でモニター可能な高感度・高解 像度 VLBI アレイの構築を EAVN で実現させるた めに、本研究では受信機の常温部分である LO、 IF 系の 67-116 GHz をダウンコンバートする手 法として、2種類の方法 (HPF を用いた SSB受 信機の開発、2SB Mixer の開発) について述べた。 結果として、70-120 GHz の間で、90 ° Hybrid coupler:反射損失が-21 dBm、Port3と Port4の



図 10: 設計した 90° Hybrid Coupler とシミュレー ション結果

位相差が 90±0.5 deg、強度比が-3±1 dBm、 Power Divider:反射損失・アイソレーションが-20 dBm以下、挿入損失が-3±0.1 dBmを達成 した。

#### Reference

- [1] 秦和弘,超高解像度電波観測で探る巨大ブラックホールジェット,天文月報,第110巻第11号771ページ,2017年
- [2] P.Yagoubov et.al., "Wideband 67-116 GHz receiver development for ALMA Band 2", Astronomy Astrophysics, vol.634 A46, 2020
- [3] Ford H.C.et al., APJ435, L27, 1994
- [4] Miyoshi M.et al., Nature 373, 127, 1995
- [5] McKinney,2006.;Tchekhovskoy.et al.,2011.;Kino.et al.,2015.;Nakamura.et al.,2018.
- [6] S.Masui et.al., "Development of new wideband heterodyne receiver system for the Osaka 1.85 m mmsubmm telescope; Receover development and the fiest light of simultaneous observation in 230 GHz and 345 GHz bands with an SIS-mixer with 4-21 GHz IF output", ASJ73,4, page1100-1115, 2021

-index へ戻る

観測b02

### 野辺山45m 望遠鏡7ビーム受信機(7BEE)用 logger シス テムの開発

中川 凌

#### 野辺山 45 m 望遠鏡 7 ビーム受信機 (7BEE) 用 logger システムの開発

中川 凌 (大阪公立大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

野辺山 45 m 電波望遠鏡は長野県の国立天文台野辺山宇宙電波観測所が運用している電波望遠鏡で、ミリ波 を観測できる電波望遠鏡では世界最大級であり、高分解能の観測を可能とする。本望遠鏡には 11 種類の受信 機が搭載されており、20–120 GHz 程度の帯域に放射を持つ様々な分子の輝線が観測可能である。7BEE(7 BEam Equipment)はこの45m望遠鏡に搭載されている受信機の一つで、観測の時間効率・観測感度に特 化した 7 ビーム受信機である。この度開発した logger システムは受信機状態モニター(以下、モニター)と ログ出力機能を携えており、モニターはこの 7BEE の温度、真空度、各電源の ON/OFF 及び電圧・電流値、 各 PATT(Programmable ATTenuator;可変減衰器)の設定値(減衰量)、各 SG(Signal Generator;信 号発生器)の ON/OFF 及び出力周波数を観測画面上に一定時間ごとに表示するものであり、ログ出力機能 はそれらの情報を一定時間ごとにデータとしてテキスト出力するものである。モニターの開発した主な目的 は「観測所でのデータの可視化」である。7BEE は 7 ビーム受信機のため構成機器が多く(例えば PATT は 7 ビーム×2 偏波分なので 14 個)、3 帯域に分離して観測する(スイッチで帯域を切り替える)ため、制御 は複雑だ。よってエラーの原因の特定や復帰も通常の受信機より難しく、各機器の状態をひと目で確認でき るようにしておかなければならない。また、7 つのビームを活かした広域観測の手法をとるためには、全て のビームが1つも欠けることなく正常に動作していなければならず、常にその状態をモニタリングして保証 しておく必要がある。ログ出力機能を開発した目的は「受信機状態データの集約・保存」である。観測時間 外に機器トラブルが発生しても、保存されたログから過去の各機器状態と日時を確認することで、問題の発 生日時と原因の特定に役立つ。今後は本機能を用いて受信機の正常状態を保証しつつ、目的の CO 広域観測 を進めたい。

#### 1 Introduction

星は水素分子を主成分とする高密度なガス雲 (分子 雲コア)から生まれる。しかし、分子雲コア内で星形 成がどのように開始するかは未だ解明されていない 点が多い。これまでの観測から、図1に示すように 分子雲コアにおける重水素および軽水素化合物の分 子同士の存在比 (重水素比) が原始星形成前から原始 星形成にかけて上昇し、原始星形成後には減少する ということがわかっている。

これは原始星形成前後で

- 応(発熱反応)のみ進行):  $H_3^+ + HD \longrightarrow H_2D^+ + H_2 + Q$
- 原始星形成後(高温領域):  $H_2D^+ + CO \longrightarrow HCO^+ + HD$

の反応が起こるためであり、この関係を利用して、



図 1: 原始星形成前後における D/H 比の変化

• 原始星形成前 (低温領域:熱Qが発生する順反 重水素比を調べることにより分子雲コアの年代を推定 する手法が提案されている (Tatematsu et al. 2017)。

#### 2 7BEE (7 BEam Equipment)

#### 2.1 野辺山 45 m 電波望遠鏡

長野県の国立天文台野辺山宇宙電波観測所内に設 置されている電波望遠鏡(図 2)。



図 2: 野辺山 45m 電波望遠鏡

45 m というアンテナロ径はミリ波を観測できる 電波望遠鏡では世界最大級で、高分解能の観測が可 能。7BEE を含む 11 種類の受信機が搭載されており、 20-120 GHz 程度の帯域に放射を持つ様々な分子の 輝線が観測可能である。

#### 2.2 受信機概要

長野県にある世界最大級のミリ波望遠鏡である野 辺山 45 m 電波望遠鏡では、星形成の極初期段階にあ る分子雲コアを観測し、星形成の初期状態を明らか にすることを目的とし新たな受信機 7BEE (7 BEam Equipment)の開発プロジェクトが進められてきた。 7BEE は上空の7点を同時に観測することが可能な マルチビーム受信機であるほか、重水素化合物およ び軽水素化合物に加え CO 同位体を同時観測するこ とが可能で、観測可能な周波数が導波管型周波数分 離フィルターにより 72–116 GHz 内のそれぞれに対 応する 3 帯域

- 72-82 GHz (EL Band): 重水素化合物
- 86-96 GHz (EU Band): 軽水素化合物
- 109-116 GHz (CO Band): CO 同位体

に分かれている。また、直交偏波分離器 (OMT; OrthoMode Transducer) により両偏波 (2 偏波) 受信 が可能なため、7 ビーム 3 帯域 2 偏波受信機となって いる (米山翔 2023) 故に一度に扱うデータも大量な ものとなる (図 3)。



図 3: 7BEE の CAD 図

#### 2.3 マルチビーム受信機

焦点面に多数のレンズ(受信部)を並べ、天球上 の複数点からの信号を同時に観測することができる 受信機のこと。従来の電波望遠鏡では、アンテナの 焦点面には1点のみ観測可能な受信機を1台のみ配 置することが多かったが、広域観測において時間効 率が低かった。その問題を解決するために開発され たものがこのマルチビーム受信機で、図4のように ビームの塊を傾けてスキャンを行うことで効率良く 観測を行うことができ、必要な観測時間が短縮され る。その意味では、現代の電波望遠鏡の最先端とい えよう。



図 4: マルチビーム受信機による広域観測手法 なお、図4のような広域観測手法に対し、中心ビー ムが観測領域の全範囲をカバーするように駆動させ ることで観測感度を向上させることも可能である。

#### 3 Logger System

#### 3.1 開発目的

モニターの開発した主な目的は「観測所でのデー タの可視化」である。7BEEは7ビーム受信機のため 構成機器が多く(例えば PATT は7ビーム×2 偏波 分なので14個)、3帯域に分離して観測する(スイッ チで帯域を切り替える)ため、制御は複雑だ。よっ てエラーの原因の特定や復帰も通常の受信機より難 しく、各機器の状態をひと目で確認できるようにし ておかなければならない。また、7 つのビームを活 かした広域観測の手法をとるためには、全てのビー ムが1つも欠けることなく正常に動作していなけれ ばならず、常にその状態をモニタリングして保証し ておく必要がある。ログ出力機能を開発した目的は 「受信機状態データの集約・保存」である。観測時間 外に機器トラブルが発生しても、保存されたログか ら過去の各機器状態と日時を確認することで、問題 の発生日時と原因の特定に役立つ。

#### 3.2 機能概要

受信機状態モニター(以下、モニター)は 7BEE の温度、真空度、各電源の ON/OFF 及び電圧・電流 値、各 PATT (Programmable ATTenuator;可変減 衰器)の設定値(減衰量)、各 SG (Signal Generator; 信号発生器)の ON/OFF 及び出力周波数を観測画 面上に一定時間ごとに以下の図 5 のように示すよう に表示するものであり、ログ出力機能はそれらの情 報を一定時間ごとにデータとしてテキスト出力する ものである。

#### 3.3 実際の処理の流れと今後

7BEE を構成する各機器からデータを取得し、モ ニターに表示させ、ログに書き出すまでの流れを以 下の図 6 に示す。

図6にあるように、このシステムは2つのPython モジュールを動作させることで正常に機能する。ま







ず「各情報読み出しモジュール」でソケット通信に て各機器から情報を一定時間ごとに読み出し、情報 をファイルに書き出す。その後「モニター表示・ロ グ出力モジュール」でデータを情報ファイルから読 み出し、まとめてモニター表示及びログ出力を行う。 表示と出力はどちらも並列して一定時間ごとに行わ れ、実行時間間隔は別々に設定されている。今後は 本モニターによって受信機の正常状態を保証しつつ、 目的の CO 広域観測等を進めたい。また、利便性向 上のため、モニターの UI を改善し各ステータス情報 を見やすくした上、受信機温度の上昇などといった 場合は警告表示を行い、異常動作がひと目で分かる ようにしたい。

#### 4 Summary & Future Works

本研究では使用機器が多いため制御が容易ではない7BEE 用の制御システムとして、受信機状態を監視・保存する logger システムの開発を行った。今後はモニター内の情報の視認性向上、及びステータス

2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

異常時の警告表示に関するアップデートを行うとと もに、本システムを活用しつつ実際に 7BEE を用い た科学観測を進めたい。

#### Reference

 [Tatematsu et al. 2017] Ken'ichi Tatematsu et al. 2017, ApJS<br/>, ${\bf 228},\,12$ 

[米山翔 2023] 米山翔 2023, 修士論文

-index へ戻る

観測b03

### 強度干渉計実験と画像合成の検討

### 小関 知宏

#### 強度干渉計実験と画像合成の検討

小関知宏 (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 D1)

#### Abstract

我々のグループでは南極新ドームふじ基地でテラヘルツ領域の観測計画を進めている。この計画では南極新 ドームふじ基地に口径 30cm の望遠鏡をそれぞれ 2 台設置し、強度干渉計での観測を目指している。南極高 地では電離窒素 [NII]205μm、2 階電離酸素 [OIII]88μm、[OIII]52μm の輝線を含む帯域に大気の窓が存在し ており、大質量星形成活動を知る手掛かりとなる。我々の研究を進めている 2 素子強度干渉計はヘテロダイ ン受信機と比較して量子雑音による制限を受けないため高感度での観測が可能である。2 素子強度干渉計の 実証実験のために実験室に周波数 500GHz、口径 76.2mm、基線長 10 – 50cm の光学システムを製作した。 本講演では本光学システムおよび強度干渉計実験の光学試験について報告する。強度干渉計実験では実験室 内で強度干渉計を用いた画像合成を目指している。強度干渉計での画像合成には直接検出器信号による強度 の相互相関をとることで得られる遅延時間を導入することで (u,v) 平面上を埋めることが必要である。しか し、強度相関から振幅の複素ビジビリティを正確に求められるかどうかが課題であり、検討を進めている。

#### 1 Introduction

原子輝線のうち電離ガス領域からの炭素、窒素、酸 素の輝線は1THz以上のテラヘルツ領域で放射され ている。これらの原子輝線は、大質量星形成領域や 活動銀河核にある原子ガスの物理状態を探る重要な 指標となる。テラヘルツの領域では大気中の水蒸気 による吸収により地上からの観測が難しく宇宙から の観測が一般的である。そのため、主鏡の大きさに 制限があり高角度分解能での観測が実現していない。 我々の研究グループは、大気中の水蒸気量が非常に 少ない南極からテラヘルツ領域の高角度分解能の観 測を干渉計で行うことを目指している。

我々の研究グループは、中国紫金山天文台と協力 して南極ドーム A で大気透過スペクトル測定を行っ た (図 1)。その結果、電離窒素、2 階電離酸素の輝 線を含む帯域に大気の窓が存在しており、テラヘル ツ領域の観測が地上から観測可能であることを確認 した。



図 1: 南極における大気の透過率 [1]

#### 2 直接検出器を用いた観測

1THz 以上の領域を観測する方法として SIS 光子 検出器を用いた強度干渉計を提案している。強度干 渉計では検出器として直接検出器である SIS 光子検 出器を搭載することが可能である。SIS 光子検出器 はヘテロダイン受信機と異なり位相測定に伴う量子 雑音が感度の制限がなく、光子1つ1つを時間分解 して測定可能である。そして、光子を1つ1つを分 解して観測可能な場合、背景放射限界の高感度観測 が可能となる。さらに、強度干渉計は原理的に強度 の相関では位相情報を用いることができないが遅延 時間を用いれば画像合成が可能である。

## 3 製作した強度干渉計の光学シス <sup>用いた。</sup> テム <sup>100</sup> □

南極での観測は、干渉計として口径 30cm 望遠鏡 2 台に 500GHz 帯 SIS ミクサと 1.5THz 帯の SIS 光 子検出器を搭載したヘテロダイン干渉計および強度 干渉計を採用する。我々は、実験室内で 500-600GHz 帯の SIS 光子検出器を用いてテラヘルツ強度干渉を 用いた強度相関と遅延時間測定の強度干渉計実験を 行う。実験室で行う強度干渉計実験の光学システム を図に示す。



図 2: 強度干渉計の光路図

本光学系では、片側の光路で軸外し放物面鏡1枚、 平面鏡4枚必要である。そして、本研究で製作する 強度干渉計は2素子干渉計であるため、鏡像対象の 光学系が必要であり、合計軸外し放物面鏡2枚、平 面鏡8枚必要である。また、移動ステージ上に載ら ず動かない平面鏡計6枚を3枚ずつ左右に固定する ための枠組を設計し、国立天文台先端技術センター の金属3Dプリンターを用いて作成した。

干渉計は、2素子強度干渉計であり、周波数 500- **4** 600 GHz、口径 76.2 mm、基線長 10 – 50 cm である。

素子は 500-600 GHz に感度を持った SIS 光子検 出器を搭載する。光学窓には、学窓には、AR コー ティングを施した Yoshinaga フィルター、BPP(Black Polypropylene)、UHMWPE(Ultra High Molecular Weight Polyethylene)を作成して用いる。これらの 光学フィルターを組み合わせた場合には、強度干渉 計実験で用いることで 500 GHz で 60 % 以上の透過 率を達成可能である

また、Si レンズの反射防止には、ポリエステルを



図 3: 光学窓の透過率

これらを実験室で組み上げたものが下図である。



図 4: 製作した光学系

#### 4 強度干渉計を用いた画像合成の 検討

#### 4.1 遅延時間の測定

強度干渉計では、電波の2乗である強度を取得す る。そのため、ヘテロダイン受信機と異なり位相情 報を取得できず画像合成ができない。テラヘルツ領 域での強度干渉計で画像合成が可能かどうかを検証 するため、野辺山電波ヘリオグラフを用いたマイク ロ波領域での実験を行った。図5は、17 GHz で受信 した太陽電波の相互相関を示したもので、電界振幅 の相互相関と電界の2乗(強度)の相互相関を示し ている。



図 5: ヘリオグラフで観測された遅延時間 [2]

この結果より遅延時間を求めることができ UV 平 面上の位置を決定することができる。

#### 4.2 画像合成の検討

ヘテロダイン受信機をもちいた干渉計と直接検出 器を用いた強度干渉計の違いはビジビリティの値に も表れる。一様円盤を観測したと仮定した場合、ヘ テロダイン受信機を用いた干渉計で観測した場合に はビジビリティは

$$\gamma = \frac{2J_1(kar_2)}{kar_2} \tag{1}$$

となる。同様の観測を、直接検出器を用いた強度干 渉計ではビジビリティに絶対値が付いた状態で観測 される。

$$|\gamma| = \left|\frac{2J_1(kar_2)}{kar_2}\right| \tag{2}$$

このため、強度干渉計で画像合成を行うためには絶 対値となったビジビリティの情報を正確に符号情報 を復元する必要がある。

この符号の問題は、これまで3つの光検出器で同 時観測を用いればで可能であるという事が示唆され ている [3]。この方法を、もとに現在2素子干渉計で も画像合成ができないか検討を進めている。

#### 5 まとめと今後の展望

我々の研究室では、南極でテラヘルツ領域の強度 干渉計観測を目指している。強度干渉計を用いた画 像合成を行うため実験室で、2 素子強度干渉計の開発 を進めている。本研究では実験室内に周波数 500-600 GHz、口径 76.2mm、基線長 10 – 50 cm の 2 素子干 渉計を構築した。

今後は、この光学系の校正および素子を搭載し、遅 延時間測定及び強度干渉計での画像合成を行う。

#### Reference

- [1]Hiroshi Matsuo, Sheng-Cai Shi, Scott Paine, Qi-Jun Yao, and Zhen-Hui Lin. "Terahertz Atmospheric Windows for High Angular Resolution Terahertz Astronomy from Dome A". Advances in Polar Science 30, 76, 2019
- [2]Hajime Ezawa, Hiroshi Matsuo, Kiyoto Shibasaki, Kazumasa Iwai, Masumi Shimojo, Noriyuki Shinohara, Mareki Honma, and Yasuhiro Murata. "Towards the Intensity In terferometry at Terahertz Wavelength" .26TH INTERNATIONAL SYMPO-SIUM ON SPACE TERAHERTZ TECHNOLOGY, CAMBRIDGE, MA, 16-18 MARCH, 2015.
- [3]Takuso Sato, Shusou Wadaka, Jiro Yamamoto, and Junichi Ishi. Applied Optics 17, 2047, 1978.

-----index へ戻る

### 観測b04

### 超小型衛星 VERTECS ミッションと姿勢制御ユニット のシミュレーション

田中 颯

#### 超小型衛星 VERTECS と姿勢制御ユニットのシミュレーション

田中 颯 (東京工業大学大学院 理学院物理学系物理学コース)

#### Abstract

超小型天文衛星 VERTECS(Visible Extragalactic background RadiaTion Exploration by Cube Sat) は、 銀河系全ての放射の視線積分である宇宙背景放射を可視光において観測し、天体形成史の解明に挑むミッショ ンである。VERTECS は 6U サイズ (約 10cm×20cm×30cm) であり、九州工業大学が今までに開発してき た CubeSat のバスシステムをベースとするバス部と 3U サイズの可視光望遠鏡から構成される。本ミッショ ンにおける姿勢制御系の制約として重要なことの一つに、長時間露光における 10 秒角/1 分間の姿勢安定性 が求められている。露光時間中に星像が動くことによって星周辺の多数の画素が汚染されてしまい、宇宙背 景放射の測定のノイズとなり背景放射の測定が困難になってしまうため、高い姿勢安定性での観測が要求さ れている。本公演では、VERTECS プロジェクトの概要と、AOCS が行う姿勢制御の概要、AOCS の姿勢 制御シミュレーションの手法について紹介する。

#### 1 科学的背景

Extragalactic Background Light(EBL) とは初期 宇宙から現在までに放出された全放射の積算のこと であり、我々の銀河系外の外から届く微弱な光であ る。可視光から近赤外域の背景放射には銀河を含め る天体形成史を紐解くために重要な情報が含まれて いると考えられている。過去に行われた近赤外領域 の EBL を観測するための観測ロケット実験 CIBER の結果によると、近赤外領域における背景光の明る さおよび空間ゆらぎが既知の銀河の積算光よりも数 倍大きいという結果が示された (図1)。この背景光の 超過成分として近傍宇宙の銀河ハロー浮遊星や宇宙 初期のブラックホールなどが考えられているが未だ 解明はされていない。VERTECS ミッションの目標 として、EBL の可視光スペクトルを連続的な波長か つ高い精度で測定し、暗い空から前景放射を差し引く ことによって超過成分の原因解明を行うこと、EBL の表面輝度の空間揺らぎを可視光域で測定すること が挙げられている。

#### 2 衛星の構成

VERTECS ミッションでは 6U サイズ (約 10cm×20cm×30cm)のCubeSatを採用する。その うち 3Uの体積をミッションペイロード機器が占め、





残りの 3U の体積部分をバスシステムが占める。バ スシステムには九州工業大学が開発してきたものを 採用している。本ミッションでは超小型衛星のバス システムの共通化を目的としている。このバスシ ステムを共通化することによって、超小型衛星ミッ ションの巨大化、長期化によって起こっている問題 を解決することができる。また、このバスシステム に加えて 1U サイズの姿勢制御ユニット (AOCS) を 搭載する。

#### 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校



図 2: 衛星の構成

#### 3 衛星の姿勢制御

今回のミッションでは、姿勢制御の条件としてに 対して絶対姿勢精度として 0.1 度、姿勢安定精度とし て 10 秒角/1 分間の高精度な要求を課している。こ れを実現するために 1U サイズの姿勢制御ユニット (AOCS: Attitude Orbital Control System)を使用 する。AOCS ユニットは主に電磁石を用いた磁気ト ルカ-(MTQ)やリアクションホイール (RW)、ジャイ ロセンサー、太陽センサー、スタートラッカーで構 成される。この AOCS を用いて衛星の高精度な三軸 制御を実現できる。

今回の衛星の姿勢制御は大まかに

- 1. INITIAL モード
- 2. B-DOT モード
- 3. Rough Sun Pointing  $\mathbf{F} \mathbf{F}$
- 4. Rough Three Axis  $\mathcal{F} \mathcal{F}$
- 5. Fine Three Axis  $\mathcal{E} \mathcal{F}$

で行う。INITIAL モードとは、特にホイールやアク チュエータなどを動かさず衛星にデタンブリングを かけていない状態であり、その状態からまずは B-dot



図 3: AOCS ユニットの構造

モードでデタンブリングを行う。B-dot モードとは、 地磁場を捕捉し、MTQ をもちいて磁場に衛星の回転 エネルギーを消散させることによって衛星を慣性空 間に対して静止させるための制御モードである。そ の後太陽の位置を太陽センサーによって捕捉し衛生 の太陽電池パドルが太陽の方向を向くように制御す る。そのあとスタートラッカーや RW などを用いて 姿勢の精度を高めていくことによって姿勢制御を行っ ていく。

## 4 AOCSの姿勢制御シミュレーション

AOCS ユニットを衛星に搭載するにあたって、 AOCS を動作させるためのソフトウェアが正常 に機能するかどうか、それぞれのコンポーネン トが正常に動くかどうかのシミュレーションを行 う必要がある。そのシミュレーションを行うため に、東京大学の ISSL(中須賀・船瀬研究室) で開 発されている C2A(Command Centric Architecture)  $\geq$  S2E(Spacecraft Simulation Environment), WINGS(Web-based INterface Ground-station Software)を使用する。C2Aは衛星に搭載するソフトウェ アのフレームワークであり、このフレームワークの中 で各衛星のアプリケーションを実装することができ るシステムであり、S2Eは、宇宙機の数値シミュレー ションを行える環境をソフトウェア上で構成するシ ミュレーターである。WINGS は地上局におけるテレ メトリ・コマンドを処理することができる Web ベース のソフトウェアである。C2A を用いて VERTECS に 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

使用する AOCS のソフトウェアを構成し、S2E を用 いて VERTECS の姿勢や軌道、外乱などを再現する ことによってコンピュータ上で AOCS のソフトウェア のシミュレーションをすることが可能である (SILS: Software In the Loop Simulator)。さらに WINGS を組み合わせることによってテレコマベースでのシ ミュレーションを行うことも可能である。また、実 機の AOCS と S2E を連携させることによって、実 際に使用する AOCS のハードウェアの試験を実施す ることが可能である (HILS: Hardware In the Loop Simulator)。

#### 5 今後の展望

SILS や HILS のようなシミュレータを用いて衛星 の姿勢制御シミュレーションを行うことによって、問 題なく AOCS ユニットを動作させることができるか どうかの試験をおこない、VERTECS のミッション 要求を満たす運用を行えるかどうかの計算を行う。ま た、それぞれのソフトウェアをより使用しやすいも のとすることで今後の超小型衛星ミッションの姿勢 制御シミュレーションをより簡単かつ正確に行える ようにすることを目標とする。

#### Reference

- Hashimoto Tatsuaki et al 2022, Joint Conference on 33rd ISTS, 10th NSAT & 14th IAA LCPM
- 佐野圭 中川貴雄 超小型衛星シンポジウム 2023 https://aerospacebiz.jaxa.jp/jaxasmash/cubesatlv2023/

-----index へ戻る

### 観測b05

### 補償光学で用いる4ビームレーザーガイド星の伝搬モ デルの開発

### 小鹿 哲雅

#### 補償光学で用いる4ビームレーザーガイド星の伝搬モデルの開発

小鹿 哲雅 (関西学院大学 理工学部 物理学科 B4)

#### Abstract

ULTIMATE-START(Akiyama et al. 2020)は東北大学と国立天文台で開発しているすばる望遠鏡用のレー ザートモグラフィー補償光学装置である。この装置で4つの人工の星(レーザーガイド星)を参照して波面 を測定する事により、地球大気の乱れを精密に測定し、可視〜近赤外域で回折限界に迫る高解像度を実現す る。本研究では、計画に必要な4つのレーザーガイド星を生成する光学系を操作することと、レーザー光 が上空へ伝搬する様子のモデルを作成し、レーザーガイド星の光源としての性質を求めた。結果、レーザー ガイド星の生成光学系を操作して自由自在に4つのレーザーガイド星を生成することが可能になった。さら に、観測との比較から、作成したシミュレーションは観測を再現可能であること確認した。

#### 1 Introduction



図 1: 補償光学の原理。レーザーガイド星を増やすこ とで、観測天体の光路に存在する大気揺らぎをより 多く測定することが可能になる。

補償光学は、自然のガイド星 (Natural Guide Star; NGS) あるいはレーザー光によって人工的に作られ るレーザーガイド星 (Laser Guide Star; LGS) の光 を用いて、地球大気による光波面の乱れをリアルタ イムに測定し、可変形鏡で補正を行う。LGS は上空 90 km ほどのナトリウム層に生成されるため、その 光路の外側の大気揺らぎを測定できず、1 つの LGS だけでは天体の光路全体を補償することができない



図 2: 運用中の LGS システム。波長 589 nm のレー ザーで上空 90 km に漂う Na 原子を励起する。既に 運用中の LGS システムのビームを 4 分割して 4 つの LGS で運用することで補償光学の性能向上を目指す。

(図 1)。すばる望遠鏡では、図 2 のように副鏡裏に 設置した装置で LGS を 1 つから 4 つへ増やして天 体の光路上の全ての大気揺らぎを測定することによ り、補償性能の向上を目指している (Minowa et al. 2023)。本研究では、4 つの LGS の配置を自由自在 に操作可能にすること、生成される LGS のスポット サイズやふらつきを評価することのために、LGS 生 成光学系の最適化、地上からナトリウム層へ大気揺 らぎを通過するレーザー光の伝搬シミュレーション、 ナトリウム層から波面センサーへ大気揺らぎを通過 するレーザー光の伝搬シミュレーションを行った。

#### 2 Methods



図 3:4 ビーム LGS の生成光学系。ビームスプリッ ターで4分割した後、黒色の破線で囲んだ8枚のミ ラーで打ち出し角度を操作する。



図 4: 自作の光線追跡プログラムで再現した4ビーム LGS の生成光学系。ビームスプリッターで4分割し たレーザー光を4色で表している。

#### 2.1 光学系の光線追跡と最適化

4ビーム LGS の生成光学系は設計済みである。図 3に示したように、レーザー光をビームスプリッター で4分割後、8枚のミラーを操作することで打ち出 し角度を設定する。図4に示すように、本研究では Python で自作した光線追跡プログラムを用いて 4 ビーム LGS の生成光学系の光線追跡モデルを作成 し、打ち上げるレーザー光の角度に対しどのように 8枚のミラーの角度を設定するか求めた。自作の光 線追跡プログラムは市販のソフトウェア (CODE V. Zemax)と同様の結果が得られている。そのため、光 学素子から光学素子への光路を位置ベクトルと方向 ベクトルから計算する光線追跡や、反射や屈折の計 算を光線1本1本について3次元で行うことが可能 である。したがって、レーザー光の中心を考えた主 光線に限らず、レーザー光のビームウェストだけ幅 をもった複数本の光線を計算することが可能であり、 入力したレーザー光が光学系でどのようにケラれる のかを知ることが可能である。8枚のミラーの設定 角度は、光学系設計時に得ていた設定 (LGS 配置直 径 10", 20", 30", 40") でのミラーの法線ベクトルを 各成分について3次関数で内挿することで得た。

#### 2.2 LGS 伝搬シミュレーション

図5に示すように、Python ライブラリ poppy を 使用して、ある強度マップを初期値として大気7層 の間をフレネル回折で伝搬するモデルを作成した。 初期値の強度マップには光線追跡で得た光学系のケ ラれを反映した。伝搬に用いる、マウナケアの典型 的な大気揺らぎを再現する7層の位相スクリーン (Oya et al. 2014) は Matlab® の Toolbox である OOMAO(Conan& Correia 2014) で再現した。



図 5: (左) 光学系のケラれを反映した開口関数、 (中央) マウナケアの大気揺らぎを再現した位相スク リーン、(右) フレネル回折を計算して得た上空 90 km でのレーザーガイド星の強度分布

#### 2.3 観測との比較

すばる望遠鏡で得た観測データの 32 × 32 分割さ れたスポットの重心位置の動きの平均と、時系列を 考慮した LGS 伝搬シミュレーションの重心位置の動 きのパワースペクトル密度を比較して、LGS のふら つき (Jitter) についてシミュレーションの妥当性を 検証した (表 1、図 6)。

表 1: 額	見測データ内容
観測日	2022/11/10
制御	オープンループ制御
サンプリング	400  Hz



図 6: 観測した 32 × 32 シャックハルトマン波面セン サー像。スポットの重心位置の動きの平均をシミュ レーションと比較した。

#### 3 Results

#### 3.1 光学系の光線追跡と最適化

4ビーム LGS の生成光学系の8枚のミラー角度を 操作することで、図7に示す通り、4つのレーザーガ イド星を1つずつ任意の角度で打ち上げられるよう になった。LGS の配置直径を10"~40"で変化させる と、図8のように、ケラれとガウシアンのピークの 位置関係が変化する。LGS 配置を直径25"付近に設 定すると、生成光学系の最後にレーザー打ち上げ望 遠鏡の副鏡でレーザー光の中心がケラレることが分 かる。このケラれを初期値として、LGS 伝搬シミュ レーションへ反映させた。



図 7: 光学系を操作して上空 90 km に生成される LGS の配置。LGS は1つずつ設定角度を調節可能である。



図 8: 1 つのレーザーに注目した、LGS 生成光学系 でケラれた開口関数。設定する LGS の配置により、 ケラれとピークの位置関係が変化する。

#### 3.2 LGS 伝搬シミュレーション

光学系の光線追跡で得たケラレを考慮し、生成す る LGS の配置直径を変化させて、光学系の設定が上 空 90 km での LGS 強度や大きさに与える影響を評 価した結果を図 9 にまとめた。

従来、レーザーガイド星の大きさは経験的に

$$\theta_{\nu-\vec{\nu}-\vec{\nu}\vec{\lambda}\vec{\lambda}}^2 = \theta_{\Box ff}^2 + \theta_{\dot{\nu}-\vec{\lambda}\vec{\nu}\vec{\lambda}}^2 \tag{1}$$

と見積もられていたが、本研究によりフレネル回折 を計算して正確に見積もることができた。

すばる望遠鏡のエレベーションを変化させ、伝搬 距離を変化させた際に LGS のビームウェストがどの ような大きさになるかシミュレーションした結果を 図 10 に示した。回折の影響のみ考慮した大きさ (黒 色) と、エレベーション 30 deg(青色), 60 deg(緑色), 90 deg(赤色) で示した、式 (1) を考慮した大きさの 間に、シミュレーションで求めた大きさがプロット された。



図 9: LGS 配置の設定のみを変更した際の LGS の広 がり方の変化。エンサークルドエナジー EE 50; 青 色, EE 80: オレンジ色。



図 10: フレネル回折を計算した、伝搬距離と LGS の ビームウェストの関係。エレベーションを変化せて 伝搬距離が変化した LGS のビームウェストをプロッ トした。

#### 3.3 観測との比較

LGS のシミュレーションと観測でそれぞれパワー スペクトル密度を計算して、LGS のふらつき (Jitter) を比較したものを図 11 に示した。すばる望遠鏡のエ レベーション、大気の状態、レーザー送信望遠鏡の 設定など、実世界でのパラメータを正確に設定する ことで、LGS のふらつき (Jitter) を物理光学伝搬で シミュレーションできた。また、観測データとの比 較から、作成したシミュレーションの妥当性が確認 できた。



図 11: LGS の重心位置の時間変化のパワースペクト ル密度 (PSD)。LGS 観測 (オレンジ色) は、マウナ ケアの典型的なシーイング条件でのシミュレーショ ンの幅 (good; 緑色, median; 青色, bad; 赤色) の中に 存在した。黒色は NGS 観測である。

#### 4 Discussion

LGS の観測データは、地上から上空方向と、上空 から地上方向の2回大気揺らぎを通過している。対し て、NGS の観測データは上空から地上方向の1回の み大気揺らぎを通過している。図11でLGSとNGS の観測データのPSD 強度を比較すると、全周波数で LGS のPSD が数桁大きな強度である。したがって、 作成したLGS 伝搬シミュレーションは地上から上空 方向への伝搬のみであるが、観測と比較可能である と考えた。

#### 5 Conclusion

4つのLGSを生成する光学系の光線追跡モデルを 作成し、LGS配置を自由自在に操作可能になった。 また、光学系や大気の状態を正確に設定することで、 観測を再現するシミュレーションを実現した。

#### Reference

Akiyama et al.(2020), Proc. SPIE 114481O

Minowa et al.(2023), 日本天文学会 2023 年春季年会 V217b

Conan, & Correia 2014, Proc. SPIE 9148, 91486C

Oya et al. (2014), Proc. SPIE 9148

-index へ戻る

観測b06

### ねじり振り子を用いた精密力測定における熱雑音除去 法の提案

大熊 悠介

### 未提出

-index へ戻る

観測b07

### pnCCD素子の軟X線評価システムの構築

### 藤本 健二郎

#### pnCCD素子の軟X線評価システムの構築

藤本 健二郎 (関西学院大学大学院 理工学研究科)

#### Abstract

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst:GRB) はわずか数秒の間に  $10^{51-54}$  erg ものエネルギーをガンマ線 として放出する宇宙最大の天体で、初期宇宙の解明につながる重要な天体現象である。HiZ-GUNDAM ミッ ションは GRB を発見し、自律制御によりいち早く近赤外線残光を観測することで、初期宇宙の探査を目的 としている。我々は、衛星に搭載する広視野 X 線モニターの開発を行っている。ミッション要求を満たす X 線検出器として pnCCD に着目し、小型素子を搭載した Color X-ray Camera(CXC) を用いて様々な性能の 評価を行っている。本研究では、ミッション要求である 0.4-4 keV 帯域の pnCCD 素子性能を評価するため に、実験室で複数の単色軟 X 線を照射できるシステムを構築した。本システムでは、X 線発生装置からの 1 次 X 線を 2 次ターゲットに照射し、2 次ターゲットからの蛍光 X 線を検出器に照射する。オックスフォード 社製のタングステンを陽極ターゲットとするマイクロフォーカス X 線発生装置を 1 次 X 線とし、2 次ター ゲットにテフロン (C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>)を用い、1 次 X 線光軸に対して 45 度で設置した。2 次ターゲットから検出器ま での距離を短くし、テフロンの一部に Al、Ti 箔を貼り付けることで、F-K $\alpha$ (0.67 keV)、Al-K $\alpha$ (1.5 keV)、 Ti-K $\alpha$ (4.5 keV) などの複数の輝線を同時に評価できるシステムとした。本講演では、構築システムの詳細と 予備実験による強度評価および pnCCD での照射実験について発表する。

#### 1 研究背景

我々はHiZ GUNDAM ミッションの衛星に搭載す る広視野 X 線モニターの開発を行なっている。HiZ GUNDAM はガンマ線バースト (GRB) を観測し、自 立制御で近赤外線残光を追観測することで、初期宇 宙の探査を目的としている。GRB は突発天体で、そ の現象も数秒と短いため、広視野かつ高速読み出し が可能な X 線検出器が要求されている (表 1)。数あ る検出器の中で、裏面照射型で低エネルギーに感度 が高いこと、読み出し速度が早いこと、放射線耐性 が高いことなどの理由から、pnCCD が候補に挙がっ ている。我々は小型素子が搭載された PNDetector 社 製の Color X-ray Camera(CXC) を用いて様々な基 礎性能評価をしている。本研究では、ミッション要 求である 0.4 - 4 keV 帯域の pnCCD 素子性能を評価 するため、実験室で複数の単色軟 X 線を照射できる システムを構築した。

#### 2 pnCCD

本研究では、小型 pnCCD 素子が搭載された PN-Detector 社製の Color X-ray Camera(CXC) を用い

表 1: ミッシ	/ヨン要求
受光面積	$>5 \times 5 cm^2$
ピクセルサイズ	<160µm
観測帯域	0.4 - 4 keV
露光時間	<100 msec

て評価実験を行った。素子の概観を図1に示す。Image Area の中央から電荷を Frame Stroe Area に転 送し、左右2個ずつある読み出し ASIC(CAMEX) で 電荷を読み出すことで高速読み出しを可能にしてい る。また、pnCCD は検出器の厚さ全体にわたって空 乏化され、検出器全体が放射線に対して感度を持つ ようになる。



図 1: pnCCD の概観

素子は筐体 (Camera Head) に格納されており、真 空・冷却環境下にある。評価実験では、Camera Head

Pixel size	$48\mu m \times 48\mu m$		
Device thickness	$450 \mu { m m}$		
Irradiation type	Back Illuminated		
Readout type	Frame Transfer		
Total pixel number	$264 \times 528$		
Active area	$12.7\mathrm{mm}$ $\times$ $12.7\mathrm{mm}$		
Readout ASIC	$132 \text{ ch} \times 4$		
Frame rate	15 Hz / 100 - 1000 Hz		

の Be 窓を外し、素子に直接 X 線が照射される。

表 2: CXC の仕様

3

**SDD** 

SDD(Silicon Drift Device) はエネルギー分散型 X 線検出器で、本研究では、Amptek 社製の SDD を使 用し、構築したシステムで検出される X 線の強度評 価試験で用いた。強度評価試験では、Be 窓を介して X線が照射される。



図 2: SDD の概観

表 3: SDD の仕様				
Device thickness	$500 \mu m$			
Active area	$25mm^2$			
Be window	$12.5\mu m$			

#### 4 システム構築

システムでは、オックスフォード社製の X 線発生装 5)。また、Cr-Ka、Fe-Ka、Ni-Ka はステンレス配 置からWを1次ターゲットとした1次X線を2次 管によるものである。 ターゲットに照射し、2次ターゲットからの蛍光 X

線を検出器に照射する。2次ターゲットはテフロン (C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>)を用い、その一部に Al、Ti 箔を貼り付けた 2次ターゲットを、1次X線光軸に対して45度で設 置した。



図 3: 実験セットアップの概観と概略図

このシステムによって、0.67 - 4.5 keV の複数の単 色軟 X 線を同時に検出することができる。

表 4: 2 次ターゲットの X 線のエネルギー

輝線	エネルギー [keV]
$\text{F-K}\alpha$	0.67
Al-K $\alpha$	1.5
$Ti-K\alpha$	4.5

#### 強度評価実験の結果 5

図4にSDDを用いた強度評価実験の2次X線の スペクトル、表5に実験のデータ取得条件を示す。 Al-K $\alpha$  や Ti-K $\alpha$  に比べ、F-K $\alpha$  の強度は小さいが、 2次X線を検出することができた。

F-Kα の強度が小さいのは、SDD の Be 窓によっ 図3に実験セットアップの概観と概略図を示す。本 て吸収され、約1.27%しか透過しないからである(図





図 5: 厚さ 12.5µm の Be 窓の透過率曲線

Be 窓の透過率、検出器面積 (Active area) の違いを 考慮して、CXC でのカウントレートを見積もる (表 6)。表 6 の補正カウント数は Be 窓の吸収を考慮した 場合の輝線の強度である。pnCCD でのカウントレー トより、pnCCD で 0.67 – 4.5 keV の輝線を検出可能 であることが分かった。

表 6: SDD と pnCCD でのカウントレート

輝線	F-Kα(0.67 keV)	Al-Kα (1.5 keV)	Ti-Kα (4.5 keV)
カウント数 [counts]	397	$2.06 \times 10^{5}$	$2.53 \times 10^{5}$
Be窓の透過率 [%]	1.27	66.1	98.6
補正カウント数 [counts]	$3.12 \times 10^{4}$	$3.12 \times 10^{5}$	$2.58 \times 10^{5}$
SDDでのカウントレート[counts/s]	19.9	199	164
pnCCDでのカウントレート [counts/s]	128	$1.28 \times 10^{3}$	$1.05 \times 10^{3}$

#### 6 照射実験の結果

図 6 に CXC を用いた強度評価実験の 2 次 X 線の スペクトル、表 7 に実験のデータ取得条件を示す。

表 7:	照射実験のテ	ゴータ取得条件
------	--------	---------

フレームモード	Full Frame		
フレームレート	15 Hz		
ゲイン	gainMax/2		
取得フレーム枚数	20,000		
X線発生装置の管電圧	10 kV		



図 6: pnCCD を用いた照射実験の 2 次 X 線スペク トル

図 6 から、pnCCD で 0.67 - 4.5 keV の複数の X 線を検出することができた。

#### 7 まとめと今後の課題

本研究において、複数の単色軟 X 線を同時に評価 できるシステムを構築し、pnCCD で 0.67 - 4.5 keV の X 線を検出することができた。今後の展望として は、ステンレス由来の X 線を減らし、1 keV 以下の 低エネルギーの X 線の強度を上げることや 0.4 keV 付近の X 線の評価を行う。

#### Reference

- 藤井健 2022 関西学院大学修士論文「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」
- 吉田明弘 2023 関西学院大学修士論文「HiZ-GUNDAM ミッション搭載用 pnCCD 素子の基礎 性能評価」

-index へ戻る

観測b08

### Coloer-Xray-Camera を用いた pnCCD 素子の基礎性能 評価

### 杉本 葵

#### Color-Xray-camera を用いた pnCCD の基礎性能評価

杉本 葵 (関西学院大学大学院 理工学研究科)

#### Abstract

我々は X 線衛星搭載を念頭に置いた、X 線検出器開発を行っている。pnCCD は、広エネルギー帯域に感 度があること、エネルギー分解能、時間分解能が良いことから、今後の宇宙機搭載用の素子としても期待で きる。そこで、小型の pnCCD 素子を搭載した PNDetector 社の Color-Xray-Camera(CXC) に対し、素子 温度-20°C における暗電流及び X 線検出下限エネルギーの評価を行った。

#### 1 はじめに

X線 CCD は、1993 年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星「あすか」に初めて搭載されて以来全て の X線天文衛星に搭載され、X線天文分野における 標準検出器となっている。中でも pnCCD は 1999 年 に打ち上げられた X線天文衛星 XMM-Newton のた めに開発された裏面照射型の CCD で、空間的・分 光的に感度の高い分光 X線撮像素子である。またフ レームストア型により読み出し時間の短縮も実現さ れた。

#### 2 Color-Xray-Camera(CXC)

実験には pnCCD 素子を搭載した、PNDetecter 社 製の Color-Xray-Camera(CXC)を使用した。搭載さ れている pnCCD は ROSITA 向けに開発されたフ レームストア型 pnCCD である。この pnCCD は表1 の横方向のみに電荷が転送され、各カラムごとに電荷 が読み出される。また、素子両端の ASIC(CAMEX) により Imaging Area 中央から反対方向に半分ずつ 読み出すことで、高速読み出しが可能となる。素子 の仕様を表1に、素子の駆動概念図を図1に示す。



図 1:素子の駆動概念図

表 1: CXC 素子の仕様

素子厚	450			
素子サイズ	$48 \mu \mathrm{m} \times 48 \mu \mathrm{m}$			
照射型	裏面照射型			
読み出し方式	フレーム転送方式			
ピクセル数	Image Area:264 $\times$ 264			
撮像領域	$12.7\mathrm{mm}  imes 12.7\mathrm{mm}$			
読み出し ASIC	$132 \mathrm{ch} \times 4$			
運転温度	$-20^{\circ}\mathrm{C}$			

#### 3 実験方法

図2に実験セットアップ、表2にデータ取得条件 を示す。



図 2: 実験セットアップ

表 2: データ取得条件

Frame rate	15Hz	20Hz	30Hz	50Hz	75Hz	100Hz
Frame number (X線照射)	2000	2000	4000	6000	8000	10000
Frame number (バックグラウンド)	500	500	500	500	500	500

カメラヘッドは真空・冷却環境下にあり、 Be 窓 (50um 厚) を介して X 線を照射する。

ファンクションジェネレータを用いて信号を作成し、
外部トリガーモードで Frame rate を 15Hz-100Hz ま で変え、データを取得した。また、各 Frame rate に 対し、線源を設置せずに 500 枚ずつデータを取得し、 これをバックグラウンドデータとした。

#### 4 イベントスペクトル

図 3 に生フレームデータを示す (15Hz で 2000 枚 撮ったうちの 1000 枚目)。シングルイベントの他、複 数のピクセルにまたがったマルチピクセルイベント が見られる。

X線イベントスペクトルはこれらの生データからバッ クグラウンドを引いて作成する。



図 3: 15Hz におけるイベントスペクトル

図 4 に Mn-Ka 輝線付近のイベント分布を示す。 輝線の幅はカラム毎のゲインのばらつきによるもの で、以降の解析はカラム毎にゲイン補正をかけた上 で行った。



図 4: 15Hz におけるイベントスペクトル

#### 5 暗電流

検出器には、線源を設置せず光子が入射しない暗 闇であっても微弱な電流が存在し、これがイベント



図 5: あるピクセルの暗電流

であるかのように検出されてしまう。この電流を暗 電流と呼ぶ。

得られたイベントスペクトルから、次の式でエレ クトロンを求められる。

electron=(波高値×ゲイン)/(Si の電離エネルギー) 図 5 は (x,y)=(50,50) のピクセルにおいてエレク トロンを縦軸、露光時間を横軸としたグラフで、こ の傾きが暗電流である。





図6にピクセル毎に求めた暗電流を素子全体のマッ プに示す。読み出し口付近で暗電流が大きくなる傾 向にあることが分かる。また、読み出し口付近以外 にも暗電流が大きい部分が点在し、暗電流が大きく なるピクセルが素子全体に存在することが分かった。 暗電流の最頻値は15.1e/s であった。

#### 6 X線検出下限エネルギー(LD)

以降の解析は他温度との比較を考え、素子全体で はなく、x=100-190 の領域で行った。 X線イベントスペクトルは生データからバックグラ ウンドを引いて作成するため、低エネルギー付近は ノイズによりカウント数が増える。このノイズ成分 を冪乗関数でフィッティングし、カウント数が1とな るエネルギーを、ノイズと X 線に起因する電荷 (イ ベント)を区別できる下限エネルギー (LD)とする。 図7は図4の低エネルギー側を拡大したもので、LD は108.4eV と求められた。

ノイズ成分は単なるバックグラウンドのエネルギー 分布だけでは表現できず、ノイズ成分のX線のイベ ント判定回数が多いピクセル(flickering pixel)と バックグラウンドの揺らぎが大きいピクセル(noisy pixel)が影響していると考えられる。

そこで flickering pixel と noisy pixel に閾値を与え、 それより大きい値を持つピクセルを取り除いて LD を再算出した。



図 7: (上)LD

(下)flickering 閾値 9, noisy 閾値 11 のときの LD

図 8、図 9 にイベント判定回数とバックグラウン ドの標準偏差 (ゆらぎ) のヒストグラムを示す。少な くとも図 9 の標準偏差の大きい側の山は取り除くこ とにした上で、MnK 輝線のイベント数をなるべく減 らさず、LD が改善する閾値を探した。 flickering pixel の閾値を 9、noisy pixel の閾値を 11 としたとき、LD は 74.8eV に改善した。このときの 輝線部分のイベント数の減少量は7.2%であった。



図 8: イベント判定回数



図 9: バックグラウンドの標準偏差

#### 7 まとめ

小型の pnCCD において、-20°C の駆動条件にお ける暗電流と LD を調査した。結果、ピクセル毎に求 めた暗電流の最頻値は 15.1e/s であり、LD は 74.8eV と求められ、低暗電流・低 LD であることが確かめ られた。

#### Reference

- 藤井健 2022, 関西学院大学修士論文「HiZ-GUNDAM ミッ ション用 CMOS イメージセンサの X 線分光性能評価」
- 吉田明弘 2023, 関西学院大学修士論文「HiZ-GUNDAM ミッション搭載用 pnCCD 素子の基礎性能評価」

-index へ戻る



## pnCCD素子における軟X線性能評価

## 畠中 大介

### pnCCD素子における軟X線性能評価

畠中 大介 (関西学院大学大学院 理工学研究科)

#### Abstract

我々は、HiZ-GUNDAM 衛星搭載用 X 線撮像検出器の開発を行っている。HiZ-GUNDAM 計画では、特に ガンマ線バーストの観測をすることで初期宇宙の歴史を探査することを目的としている。ガンマ線バースト は大質量星の終焉に起こる爆発現象で、数秒の間ガンマ線で輝き、その後短い時間で近赤外線や可視光線、 X 線で輝く残光を伴う現象である。ミッションでは低エネルギー帯域の X 線に対し 50%以上の検出効率が 要求されており、完全空乏化した背面照射型である pnCCD 素子が焦点面検出器の候補として挙げられて いる。本研究では PNDetector 社製の Color-Xray-Camera(CXC)を用いて、0.4-4.0keV 帯域の基礎性能評 価を行った。CXC で採用されている pnCCD 素子は、受光面積が 12.7mm × 12.7mm でピクセルサイズが  $48\mu m \times 48\mu m$  と衛星搭載素子よりも小型である。電荷読み出し口は 528channel あり、それを 4 つのアナ ログ ASIC で分割して読み出している。実験では X 線発生装置と二次ターゲットを用いて、複数の X 線輝 線と連続成分からなるスペクトルを取得した。得られたスペクトルには F-K $\alpha$ (0.67keV),Al-K $\alpha$ (1.5keV),Ti-K $\alpha$ (4.5keV),Cr-K $\alpha$ (5.4keV),Fe-K $\alpha$ の輝線が見られた。この 5 本の輝線から F-K $\alpha$ ~Fe-K $\alpha$ 帯域でのゲイン の線形性およびエネルギー分解能のエネルギー依存性を評価した。

#### 1 研究背景

我々は、HiZ-GUNDAM 衛星搭載用の広視野 X 線 モニターの開発を行っている。HiZ-GUNDAM 計画 では、特に大質量星の終焉に起こるガンマ線バース トの観測をすることで初期宇宙の歴史を探査するこ とを目的としている。



図 1: HiZ-GUNDAM 衛星

ミッションでは 0.4-4.0keV の低エネルギー帯域の X 線に対して 50%以上の検出効率が要求されており、 完全空乏化した背面照射型である pnCCD 素子が焦 点面検出器の候補として挙げられている。本研究で は、衛星搭載用の素子サイズより小型の素子を有す る PNDetector 社製の Color-Xray-Camra(CXC) を 用いて基礎性能評価を行なった。

#### 2 Color X-ray Camera(CXC)

本研究ではミッション要求エネルギー帯域付近の X線に対して性能評価を行うべく PNDetector 社製 の Color X-ray Camera(CXC)を用いて pnCCD 素子 の基礎性能評価を行った。CXC の pnCCD 素子の諸 元を表1に示す。

表	1:	CXC	の	pnCCD	素子	の諸元
---	----	-----	---	-------	----	-----

項目	仕様
Irradiation type	Back illumination
Pixelsize	$48\mu\mathrm{m} \times 48\mu\mathrm{m}$
$\operatorname{Number} \operatorname{of} \operatorname{pixels}$	$264\times264$
Active area	$12.7\mathrm{mm}\times12.7\mathrm{mm}$
Frame rate	$\rm Upto1000 Hz$
Imaging type	Full Frame
${\rm Depletion}{\rm depth}$	$450 \mu \mathrm{m}$



図 2: pnCCD 外観図



図 3: pnCCD 概略図

衛星搭載用素子は受光面積 5cm×5cm, ピクセルサ イズ 160µm となっているのに対して CXC に内蔵さ れた pnCCD 素子は受光面積 12.7mm × 12.7mm ピ クセルサイズ 48μm × 48μm と衛星搭載素子よりも 小型である。

pnCCDの外観は図2のようになっており、図3の 矢印の通り、電荷転送は撮像領域中央から両端に向 かって行われる。電荷読み出し口が計 528channel あ り、それを素子両端に2つずつ接続されている4つ の CAMEX と呼ばれるアナログ ASIC が分割して読 み出しを行なっている。

#### 実験セットアップ及びデータ取得 3 条件

以下に CXC 駆動に際しての実験セットアップその 概略図を示す。



図 4: 実験セットアップ概略図

X線発生装置から出た一次X線を通路途中に設置 したターゲットに照射することで発生する二次 X 線 を pnCCD で検出する。X 線発生装置と CXC はステ ンレスで出来た4股フランジで繋がっており、内部 全体を –10<sup>3</sup>Pa 程度の真空状態にして実験を行なっ ていった。

ており、駆動温度-20°C、フレームレート 15Hz(15Frames/sec) の状態で、20.000 フレー データの取得を行なった。

表 2: データ	取得条件
項目	条件
Framemode	Full frame
Frame rate	15 Hz
Gain	$\operatorname{GainMax}/2$
Device temp	$-20^{\circ}\mathrm{C}$
${\rm Number of frames}$	20,000 frames
Back ground	500 frames

設置した 2 次ターゲットにより F-K $\alpha$ (0.67keV), Al-Ka(1.49keV),Ti-Ka(4.51keV) の輝線スペクトル を取得した。

データ解析 4





図5は読み出し channel 毎に取得したイベント散 布図であり、特に Ti-K α付近に注目したものになっ ている。2章の図3でも示した通り、528channelあ る電荷読み出し口が 132channel ずつに分けられ 4 つの CAMEX で分割され読み出しを行なっている。 図 5(上図) から CAMEX 毎に異なった特徴があり、 gain(Energy/channel) にばらつきがあることが分か る。また、同じ CAMEX 内でも読み出し channel 毎 データ取得の条件は表 2 に示す通りとなっ にも少なからず gain のばらつきがあることが確認で きる。このばらつきが原因でイベントの一次元ヒス トグラムを作成した際に得られる輝線の幅が大きく ムのデータ取得と 500 フレームのバックグラウンド なってしまいエネルギー分解能の値が大きくなって しまう。

ヒストグラムを作成したところターゲットから 得られた二次X線F-K $\alpha$ (0.67keV),Al-K $\alpha$ (1.49keV), Ti-K $\alpha$ (4.51keV) に加えて、Cr-K $\alpha$ (5.41keV), Fe-K $\alpha$ (6.40keV) の5つの輝線スペクトルを取得した。 この5輝線のピークチャンネルを求め較正直線を引 くことで、各読み出し channel 毎に gain を算出した。 較正直線グラフを以下図6に示す。



図 6: 読み出し channel 毎の較正直線

それぞれの読み出し channel で得られた gain をそ れぞれの波高値に掛け合わせることで gain のずれを 補正し、較正直線作成に用いた各輝線のピーク位置 をおおよそ揃えることが出来た (図 5 下図)。

#### 5 結果

データ解析の結果得られたイベントのスペク トルを図 7 に示す。ターゲット由来ではない Cr-Kα(5.41keV),Fe-Kα(6.40keV)の2つの輝線は、X線 発生装置と CXC を繋ぐ4 股フランジがステンレス で出来ており、その壁面に X 線が当たることで放射 されたものである。



図 7: 取得したイベントのヒストグラム

5つの輝線に対してガウス関数でフィッティングを 行い得られた値とそこから算出したエネルギー分解 能の値を表 3, 表 4 にまとめた。

表 3: ガ	ウスフィッ	ティン	ング値
--------	-------	-----	-----

輝線	$\mathrm{Energy/eV}$	$\mathrm{Peak/eV}$	$\sigma/{ m eV}$
$F-K\alpha$	670	$660.3\pm0.3$	$31.81 \pm 0.34$
Al-K $\alpha$	1480	$1476\pm0.1$	$36.49\pm0.14$
${\rm Ti}\text{-}{\rm K}\alpha$	4510	$4501\pm0.1$	$53.90\pm0.10$
$\mathrm{Cr}\text{-}\mathrm{K}\alpha$	5410	$5404\pm0.2$	$58.58\pm0.21$
$\text{Fe-K}\alpha$	6400	$6393\pm0.2$	$63.02\pm0.20$

衣	4:	陣線(	<b>ルエネルキー分解能</b>
		輝線	FWHM/eV

	1
$F-K\alpha$	$74.9\pm0.8$
Al-K $\alpha$	$85.9\pm0.3$
$\mathrm{Ti}\text{-}\mathrm{K}\alpha$	$126.9\pm0.2$
$\mathrm{Cr}\text{-}\mathrm{K}\alpha$	$137.9\pm0.4$
$\text{Fe-K}\alpha$	$128.4\pm0.5$

各輝線におけるエネルギー分解能 (FWHM) の値 は、FWHM =  $2\sigma\sqrt{2\ln 2}$ として算出している。ミッシ ョン帯域下限に近いエネルギーを持つ F-K $\alpha$ (0.67keV) 輝線では 74.9 ± 0.8keV のエネルギー分解能であっ た。

シリコン半導体検出器である pnCCD での測定に おいて、得られたエネルギー分解能がどの程度輝線 エネルギーに依存しているのかを表したグラフを図 8 に示す。



図 8: エネルギー分解能のエネルギー依存性

入射 X 線のエネルギーが *E*、シリコンの平均電離エ ネルギーが *W*、発生する電子の統計的ゆらぎを δ*N*、 物質に固有のファノ因子を F、統計的ゆらぎ以外の ノイズを δN<sub>noise</sub> とするとエネルギー分解能 FWHM 分解能の高いエネルギー依存性及び高いエネルギー は次のように表される。

$$FWHM = 2.35W \sqrt{\delta N^2 + \delta N_{noise}^2}$$
$$= 2.35W \sqrt{\frac{F}{W}E + \delta N_{noise}^2}$$

W = 3.65 eV, F = 0.1とした式をフィッティング関 数としてフィッティングを行なったところ、結果とし 0.67keV-6.40keV 帯域で得られた輝線のエネルギー 分解能に対して高いエネルギー依存性が見られた。

また、補正後得られた輝線のピークエネルギーを用 Reference いて描いたエネルギー線形性のグラフを図9に示す。



図 9: エネルギー線形性

図の上側は、表3の一列目に載せた各輝線エネル ギーの理論値と今回得られたスペクトルのピークエ ネルギーを比較しており、下側の図は測定値の理論 値からのずれを表したものになっている。グラフか ら確認できる通り、高いエネルギー線形性を持って いることが分かる。

#### まとめ 6

今回の研究では、HiZ-GUNDAM ミッション衛星 焦点面検出器として候補に挙げられた pnCCD 素子 について、CXCを用いて性能評価を行なっていった。 CXC 駆動温度-20°C,フレームレート 15Hz の条件 のもと 20.000 フレームのデータ取得し解析を行った 結果、0.67keV でエネルギー分解能が 74.9 ± 0.8keV であった。

また、0.67keV-6.40keV 帯域においてエネルギー 線形性もつということが確かめられた。

#### 参考文献の書き方 7

著者が一人の場合 (著者 A 2013)。 著者が二人の場合 (著者 B & 著者 C 2014)。 著者が三人の場合 (著者 D et al. 2015)。

著者 A 2013, 発行元 1 著者 B, & 著者 C 2014, 発行元 2 著者 D, 著者 E, & 著者 F 2015, 発行元 3 -index へ戻る

## 観測b10

X線分光撮像衛星XRISM搭載CCD検出器における撮 像モード間のX線検出率の比較

伊藤 耶馬斗

# X 線分光撮像衛星 XRSIM 搭載 CCD 検出器における 撮像モード間の X 線検出率の比較

伊藤 耶馬斗 (近畿大学大学院 総合理工学研究科)

#### Abstract

X 線分光撮像衛星 XRISM に搭載する軟 X 線撮像装置 Xtend は、X 線望遠鏡 (XMA) と X 線 CCD 検出器 (SXI) からなる。SXI は、4 秒の露光で CCD 全面を読み出す Normal mode に加え、明るい天体を観測す る際には、CCD の 8 分の 1 領域を 0.5 秒の露光で読み出す 1/8 Window mode で駆動する。我々は SXI の フライト品による地上試験データを用いて、これら 2 つの撮像モードによる X 線検出率を調査した。その 結果、Normal mode の方が 1/8 Window mode より X 線検出率が最大 4%低いことがわかった。一方、非 X 線イベントの割合は、Normal mode の方が 1/8 Window mode より最大 3%高かった。Normal mode で は、1 回の撮像時間中に複数の X 線光子が隣接するピクセルに入射し、非 X 線イベント (パイルアップイ ベント) と判定された可能性がある。実際 Normal mode で、非 X 線と判定されたイベントの周囲 5×5 ピ クセルのスペクトルを解析すると、X 線イベントの整数倍の波高値を持つピークが見られ、パイルアップイ ベントとして判定されていることが確認できた。

#### 1 X線分光撮像衛星 XRISM

X線分光撮像衛星 XRISM 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8月26日に打ち上げを予 定している。XRISM 衛星は X 線マイクロカロリメー ター「Resolve」と広視野 X 線 CCD カメラ「Xtend」 の2つの機器を搭載している。XRISMの目的は運用 から1ヶ月で運用中止となってしまった前機「ひとみ」 が行っていた超高分解能 X 線分光撮像ミッションの 再開である。XRISM の外観を図1に示す。Xtend は X線望遠鏡である X-RayMirrorAssembly (XMA)と X線CCD カメラ Soft X-Ray Imager (SXI) の2つ の機器からなり、0.4-13 keV のエネルギー帯域で 38 分平方の視野を持つ。これにより大きく広がった X 線放射を観測する上での活躍が期待される。SXI で は 4 つの Charge Coupled Device(CCD) を  $2 \times 2$ の 格子状に配置している (図 2)。X 線 CCD は P チャ ンネルの裏面照射型を採用している。



図 1: X 線分光撮像衛星 XRSIM(JAXA 提供)



図 2: 格子状に並べられた SXI の CCD

#### 1.1 SXIの撮像モード

SXIは観測する天体の明るさに合わせて撮像モー ドを選択することでができ、大きく2つのモードが 存在する。主に Normal mode は大きく広がった天体 に対して、1/8 Window mode は明るい天体に対し ての撮像に使用する。

- 1. Full Window No Burst
  - CCD の全面を読み出すモードである。1回の撮像あたりの露光時間は4秒であり通常の観測の場合はこのモードを使用する。本集録では Normal mode と表記する。
- 2. 1/8 Window No Burst
  - CCD の縦 1/8 の領域のみで読み出すモードである。1 回の撮像あたりの露光時間は0.5 秒である。Normal mode に比べ視野は狭いものの、露光時間が短いため後述のパイルアップを減らすことが出来る。本集録では 1/8 window mode と表記する。

#### 1.2 SXIのイベント抽出

X線 CCD は半導体内に X線が入射すると光電 吸収により電荷を生成し、半導体内に電場をかけて 電荷を収集する。電極に到達するまでに電子雲は熱 拡散し広がりを持っている。この広がりが1ピクセ ル以内に収まっていた場合、そのピクセルの電荷の 量を測定することで入射した X 線 のエネルギーを 測定することができる。しかし隣接するピクセルに 電子雲が広がった場合、その電荷を足し合わせる必 要がある。また実際の宇宙での測定では X 線以外に も荷電粒子 (宇宙線)の イベントが存在する。高い エネルギーを持っている粒子は空乏層を透過して中 性領域で光電吸収を起こす場合がある。中性領域の 電場は弱いため電子雲の移動が遅くなり結果として 電子雲は大きく広がる。そのため荷電粒子はデータ 処理の段階で処理する必要がある。そこでイベント の電荷の分布から X線イベントか非 X線イベントか を分類して識別する Grade 判定法を用いている (表  $1)_{\circ}$ 

表 <u>1: Grade 判定法によるイベントの</u>分類

		Garde
X 線イ~	ミント	$0,\!2,\!3,\!4,\!6,\!8$
非 X 線イ	ベント	1,5,7,9,10,11

#### 1.3 SXI におけるパイルアップ

SXIでは同一ピクセルまたは近傍ピクセル領域 に1回の露光時間に複数の光子が入射することがあ る。このような現象をパイルアップと呼び、観測天 体が明るいほど発生しやすくなる。パイルアップは イベント抽出で判別出来ず複数の光子を一つの光子 としてカウントするため観測天体のフラックスを過 小評価したり入射した光子のエネルギーを高エネル ギー側にシフトさせてしまう。また複数の光子から 生成された電子雲が重なるためにイベント抽出時に 複数のX線イベントを1つの非X線イベントと誤っ て判定してしまうことがある。

#### 2 研究目的

#### 2.1 SXIの撮像モード毎のX線検出率

2021年9月にJAXA 筑波宇宙センターにてフライ トモデル素子の冷却試験が行われた。CCD の温度を  $-110^{\circ}$ C に冷却し、 $^{55}$ Fe からの X 線を長時間素子に 照射することでデータを取得を行った (図 3)。この 試験で取得した Normal mode と 1/8 Window mode での撮像データにおける X 線検出率を比較した。そ の結果、Normal mode の方が 1/8 Window mode よ り X 線検出率が最大 4%低いことがわかった。一方、 非 X 線イベントの割合は、Normal mode の方が 1/8 Window mode より最大 3%高かった (表 2)。

表 2: Normal mode に対する 1/8 Window mode の イベント検出率の比較

「「「「「「「「「」」」」「「」」」					
イベント検出率の差 ((win/normal)-1)					
	全イベント	X 線	非X線		
CCD1AB	1.3~%	4.1~%	-2.7~%		
CCD1CD	2.7~%	$4.5 \ \%$	-1.7~%		
CCD2AB	0.8~%	2.1~%	-1.3~%		
CCD2CD	0.4 %	2.9~%	-2.4~%		



図 3: フライト品の素子を用いた地上試験の様子 (提 供 JAXA)

#### 2.2 本研究の目的

2.1 で述べた撮像モード間の X 線検出率に差が生 じる現象の原因を究明する。

#### 3 X線検出率の差の原因調査

#### 3.1 各 Grade のイベント割合の比較

X 線検出率の差の原因を探るため各撮像モードの Grade ごとのイベント割合を比較した (図 4)。その 結果、どの Grade においても Normal mode の方が 1/8 Window mode よりも X 線イベントの割合が減 少し、非 X 線イベントの割合が増加していることが 確認できた。



図 4: (a)Normal mode と (b)1/8 Window mode に おけるイベント割合の比較

#### 3.2 イベントヒストグラムの比較

イベントのヒストグラム比較のために各撮像モード で取得したデータのうち X 線イベントである Grade

0、非 X 線イベントである Grade10 のイベントを抽 出した。Grade 0 の場合電子雲の広がりはイベント中 心ピクセル領域のみに収まるが Grade 10 の場合は電 子雲の広がりがイベント中心から 5×5 ピクセル領域 まで広がる。よって解析条件を揃えるためにイベント の波高値をピクセルのイベント中心から5×5 ピクセ ルの波高値の足し合わせて算出し、波高値とイベン トのカウント数のヒストグラムを比較した(図5、図 6)。その結果、Normal mode は 1/8 Window mode と比べて Grade10 のイベント数が増加していること がわかり、各 Gradeの波高値を比べると Grade0の ピークは 1000 ch 付近にあるのに対し Grade10 は 約2倍の2000 ch 付近にあることがわかった。また Grade0 でも波高値 2000 ch 付近にピークがあり露光 時間が短くなると 2000 ch 付近のイベントが減少す ることもわかった。これは X 線イベント光子が同一 露光時間に2つ入射したことにより電子雲の分布が 大きくなり Grade10 に移行するあるいは、電子雲の 分布は変化しなかったが2つの光子が同時に入射し ているために波高値が整数倍の位置にピークができ ているためであると考えられる。



図 5: Normal mode における Grade0, 10 の 5×5 ピ クセルのスペクトル比較



図 6: 1/8 Window mode における Grade0, 10 の 5×5 ピクセルのスペクトル比較

#### 3.3 シミュレーションデータとの比較

前節の結果から 同一露光時間中に複数個の光子が 入射していることで X 線検出率低下が発生している 可能性が予想された。そこで、CCD 検出器の光子検 出とフレーム読み出し、データ処理を再現したパイ ルアップシミュレーター (Tamba et al. 2022)を用い て露光時間を 0.5 秒ずつ 0.5 秒から 6 秒まで変化させ てシミュレートし、得られた全イベントの各 Grade の割合を実データと比較し X 線、非 X 線イベント割 合の変動を調べた。結果として露光時間が長くなる ほど実データとシミュレーションデータどちらにお いても非 X 線イベントの割合が増加し、露光時間が 短いほど X 線イベントの割合が増加した (図 7、図 8)。



図 7: シミュレーションデータと実データにおける露 光時間ごとの Grade0 イベントの割合の比較



図 8: シミュレーションデータと実データにおける露 光時間ごとの Grade10 イベントの割合の比較

#### 4 結論

撮像モード毎に見られる X 線検出率の差は全イベ ントの Grade 割合の差から、露光時間の長い Normal mode では、1 回の撮像時間中に、複数の X 線光子が 隣接するピクセルに入射し、非 X 線イベント(パイ ルアップイベント)と判定されていることが予想さ れた。そこで Normal mode で、非 X 線と判定され たイベントの周囲 5×5 ピクセルのスペクトルを解析 すると、X 線イベントの整数倍の波高値を持つピー クが見られ、パイルアップシミュレーターを用いた 結果からも露光時間が増えるたびに X 線検出率が低 下する結果が得られた。したがって、Normal mode において X 線検出率が 1/8 Win mode より低下する 原因は、パイルアップイベントが発生し複数の X 線 イベントを非 X 線イベントとして判定しているため であることが確認できた。

#### Reference

Tamba., et al., 2022, Simulation-based spectral analysis of X-ray CCD data affected by photon pile-up, PASJ, 74, 364T. -index へ戻る

観測b11

## X線分光撮像衛星XRISM 搭載CCD 検出器における Goffsetの原因究明

## 青木 悠馬

#### X 線分光撮像衛星 XRISM 搭載 CCD 検出器における Goffset の原因 究明

青木 悠馬 (近畿大学大学院 総合理工学研究科)

#### Abstract

我々は 2023 年度打ち上げ予定の X 線天文衛星 XRISM に搭載する X 線 CCD 検出器 SXI の開発を行って いる (K. Mori et al. 2022)。CCD に X 線が入射することにより発生する電子雲は広がりをもち、複数のピ クセルにまたがる場合がある。SXI 用 CCD 素子では、1 ピクセルイベントよりも複数ピクセルにまたがっ たイベントの方が波高値が高くなるという現象があり、その波高値の差を Goffset と呼んでいる。Goffset は SXI のエネルギー決定精度の低下の原因となっている。我々は、CCD における電子雲の広がりを幾何学的な モデルで再現するシミュレーションを行い、Goffset の主な原因が読み出しノイズであることを解明した。そ の後、我々は地上試験データとシミュレーションの両方を使い、Goffset のノイズ依存性と X 線エネルギー 依存性を詳細に調査した。その結果、ノイズが小さいときは charge sharing の影響が大きいこと、ノイズ依 存性は特に低エネルギー側において顕著にみられることがわかった。

#### 1 Introduction

X線分光撮像衛星 XRISM は 2023 年度打ち上げ予 定のX線天文衛星であり、X線CCDカメラ"Xtend" を搭載する (M. Tashiro et al. 2020)。Xtend は X 線 望遠鏡 (XMA; X-ray Mirror Assembly) と軟 X 線撮 像検出器 (SXI; Soft X-ray Imager) からなり、SXI 用 CCD 素子は完全空乏裏面照射型で 200 µm の空乏層 を持つ。X線が CCD の空乏層に入射すると、入射 X 線のエネルギーに比例した数の電子正孔対が生じ、こ れを電子雲と呼ぶ。発生した電子の数をカウントする ことで、X線のエネルギーを求めることができる。ピ クセルの中央付近に X 線が入射した場合、電子雲の ほとんどは一つのピクセルの中に収まる (Grade 0)。 しかしピクセルの境界付近に入射した場合、複数の ピクセルで電荷が共有され (charge shareing)、複数 ピクセルイベント (Grade 2, 3, 4, 6) と判定されるこ とがある。イベントをピクセルパターンで分類する 方法を Grade 法といい、これにより X 線と非 X 線 イベントを分類することが可能である。

#### 2 フライト素子における Goffset

2021 年にフライト素子の地上キャリブレーション 試験を実施した。試験では <sup>55</sup>Fe および <sup>241</sup>Am からの 輝線を照射した。さらに X 線発生装置で発生させた 連続 X 線を 3 つのターゲット (LiF, Al, SiO<sub>2</sub>) に入射 させ、発生した輝線を素子に照射した。X 線発生装 置の詳細は Reference を参照されたい (T. Yoneyama et al. 2020)。フライト素子のうち、本研究では CTI が最小かつエネルギー分解能が最も高い CCD2AB の データを対象とする。

図1は、FK $\alpha$ 線、MnK $\alpha$ 線のGrade 0と6の スペクトルであり、その中心値にオフセットが存在 する。このオフセットを"Goffset"と呼ぶ。さらに Goffset にエネルギー依存性があることを確認した (図2)。ここで PHA[Gn] は Grade n のスペクトル 中心値を表し、Goffset は PHA[G6]–PHA[Gn] (n = 0,2,3,4)と定義する。高エネルギー (~ 1000 ch) に おける Grade 0 の Goffset は PHA[G6] の1 %程度 である。しかし低エネルギー (~ 120 ch) において は、Goffset が PHA[G6] の~ 11 %まで急激に増加 する。さらに比較のため、CCD2ABと同素子で読み 出し回路が異なる CCD2CD の Goffset を同様に算出 した。その結果、CCD2ABと同素子であるのにも関 わらず、低エネルギー側で大きな差 (~ 3 ch) が生じ ることを確認した (図 2)。

Goffset の原因の一つと考えられるのは、信号電荷 が複数のピクセルに共有される"charge shareing"で ある。SXIでは、隣接するピクセルの波高値 (PH) が split threshold を上回ったとき、その PH がイベン トの信号値 (PHA) に加算されるが、下回ったときは 加算されない。すなわち、split threshold を下回る ピクセルが多いほど、PHA に加算されないピクセル が多くなる。特に Grade 0 はこのようなイベントが 多く存在すると考えられる。また、図 2 から予想さ れる Goffset の原因は、CCD の読み出しノイズであ る。同素子で取得したデータでも、読み出し回路が 異なると Goffset が異なる。さらに、S/N 比が大き い低エネルギー側で Goffset が急激に増大している のも、ノイズの寄与を示している。そこで本研究で は Goffset の原因を解明することを目的とする。我々 はこれら 2 要因を考慮した単純なシミュレータを構 築し、シミュレーションを行なった。

#### 3 シミュレーションとその結果

シミュレーションの方法は次のとおりである。電子 雲はポテンシャルの底に収集され、標準偏差 $\sigma$ の2次 元ガウス分布で広がると考える。電子雲に含まれる電 子の数はファノ揺らぎをもつ初期波高値 (PHA<sub>0</sub>) で与 えられるものとし、Siのファノ因子はF = 0.115とし た。電子雲はピクセルのランダムな位置に配置され、 イベント中心を含む  $3 \times 3$  のピクセルの PH を求める。 PH には、中心値が 0 で標準偏差が N のガウス分布に 従う読み出しノイズを加算する。イベントの Grade を決定したのち、各 Grade のスペクトル (図 3) を Gaussian でフィットし、PHA[Gn] (n = 0, 2, 3, 4, 6) を求める。そして PHA[G6]-PHA[Gn] を計算する ことで Goffset を算出する。

表1のパラメータでシミュレーションをおこなっ た結果が図3および図4である。ノイズの加算によ り Goffset が大きくなる、すなわち Goffset にノイ ズ依存性があること、さらにノイズがない場合でも Goffset が存在することがわかった。

表 1: シミュレーションのパラメ	ータ
-------------------	----

Parameter	Value
ファノ因子 <i>F</i>	0.115
電子雲の大きさ $\sigma$	0.11 pixel
初期波高值 $PHA_0$	100 - 1000 ch
ノイズ N	$0-10~{ m ch}$
Spilt threshold	$15 \mathrm{ch}$

#### 4 議論

ここでは、charge shareing の効果と読み出しノイ ズがどのように Goffset に影響するのかを議論する。 ノイズが低いとき (N < 4 ch) は、charge shareing の効果が支配的となる。N = 0 ch のシミュレーショ ンで取得したスペクトル (図 4a, b) より、PHA[G6] は PHA<sub>0</sub> とほとんど等しいこと、PHA[G0] は PHA<sub>0</sub> よりも数 ch だけ低いことがわかる。電荷を共有す るピクセルの PH が split threshold 以下になった場 合、PH は信号値に加算されない。そのため PHA が PHA<sub>0</sub> よりも低くなると考えられる。PHA<sub>0</sub> が大き いほど sharing charge が多くなるため、Goffset は PHA<sub>0</sub> に比例して増加する。

図4が示すように、PHA<sub>0</sub>の大小に関わらず、Goffset はノイズの増加とともに大きくなる。N = 6 ch のとき、PHA[G0] は PHA<sub>0</sub> より少し低い程度であ るが (図 3c)、PHA[G6] は PHA<sub>0</sub> より大きくなる (図 3d)。ここで N = 0 ch のときの Grade 0 のイベン トを考える。ノイズは Gauss 分布に従うため、正や 負に揺らぐ場合がある。隣接ピクセルのノイズが負 に揺らいだ場合、Grade は 0 のままであり、さらに PHA はほとんど変化しない。しかし隣接ピクセルの ノイズが正に揺らいだ場合、複数ピクセルイベント と判定されることがある。すなわち、Grade 0 イベ ントには負に揺らいだノイズが加わったものが選択 的に集まり、Grade 6 には正に揺らいだノイズが加 わったものが選択的に集まる。これがノイズによる Gofset の増加である。

図 5 は PHA<sub>0</sub> が 120 ch と 1000 ch のときの各 Grade のイベント数の割合 (Grade 分岐比) を示す。 PHA<sub>0</sub> が 120 ch のとき、~ 50%は Grade 0 のイベ ントであり、Grade 6 は僅か~5 %である。対して PHA<sub>0</sub> が 1000 ch のときは、Grade 0 は~ 25 %、 Grade 6 は~ 20 % となる。

以上より、Goffset が低エネルギー側で急増するの は、主に2つの要因が考えられる。まず PHA<sub>0</sub> が大 きい場合、正に揺らいだノイズと charge shareing の 効果がお互いに打ち消し合う。そのため、PHA<sub>0</sub> と PHA[G0] の差は大きくならない。しかし PHA<sub>0</sub> が 小さい場合、隣接するピクセルとの charge shareing の効果が小さいため、正のノイズが直接 PHA に加 算されることになる。2つ目は、PHA<sub>0</sub> が小さいと き、全イベントに対する Grade 6 の割合が少ない。



図 1: XRISM の CCD2AB で取得した X 線スペクトル。(a) は F Ka 線、(b) は Mn Ka 線である。黒と赤 はそれぞれ Grade 0、Grade 6 のスペクトルを表す。



図 2: CCD2AB(赤) と CCD2CD(黒) の Goffset 比較 (Grade 0)。

そのため、正のノイズにより Grade 6 に変更された Grade 0 イベントの割合が高くなる。このようなイ ベントの寄与により、Goffset が大きくなる。

#### 5 まとめ

我々はシミュレーションにより、Goffset の原因が 隣接ピクセルによる charge shareing、ノイズである ことを確認した。Goffset が生じるメカニズムは以下 のとおりである。

- N = 6 ch のシミュレーションは、フライト素子の Goffset およびスペクトルをよく再現した。
- ノイズを加えないとき (N = 0)、PHA と Goffset には正の相関が見られた。これは隣接ピクセル との charge shareing の効果であると考えられ る。波高値が split threshold 以下のピクセルは、 その値が PHA に加算されない。PHA<sub>0</sub> が大き いほど、この効果は大きくなる。

- ノイズが増加すると Goffset が大きくなる。これは負のノイズが加わったイベントは Grade 0に、正のノイズが加わったイベントは Grade 6に選択的に集まることに起因する。
- PHA<sub>0</sub>が低いほど Goffset は急激に増加するが、 これは次のような理由で起こると考えられる。 PHA<sub>0</sub>の大きい Grade 0 イベントに正のノイズ が加わったとき、Grade がより高いものへ変化 する。また charge shareing の効果が正のノイズ と相殺する。対して PHA<sub>0</sub>の小さいイベントで は、隣接するピクセルとの charge shareing の効 果が小さいため、正のノイズが直接 PHA に加 算されることになる。また PHA<sub>0</sub> が小さいとき、 全イベントに対する Grade 6 の割合が小さい。 そのため、正のノイズにより Grade 6 に変更さ れた Grade 0 イベントの割合が高い。

#### Reference

- M. Tashiro et al. Status of x-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM), 2020, Proc. SPIE, 11444, 1144422.
- 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.
- T. Yoneyama et al. Screening and selection of XRISM/Xtend flight model CCD, 2020, NIMA 985, 164676.



図 3: シミュレーションで取得したスペクトル。ノイズの加算とともにスペクトルの幅、Goffset が大きく なることがわかる。



図 4: シミュレーションデータの Goffset。実線はシミュレーションデータで、バツ印は CCD データである。



図 5: シミュレーションの Grade 分岐比 (全イベントに対する各 Grade の割合)。バツ印は CCD2AB のデー タである。

-index へ戻る

## 観測b12

## 超伝導遷移端型X線マイクロカロリメータの多画素化 に向けたHydra typeの解析

## 古山 泰成

## 超伝導遷移端型 X 線マイクロカロリメータの多画素化に向けた Hydra typeの解析

古山 泰成 (立教大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

ダークバリオンの検出を目的とした検出器のひとつとして、高いエネルギー分解能を持つ TES 型 X 線マイ クロカロリメータが有力候補となっている。これは入射した X 線が吸収体で落としたエネルギーを素子の温 度上昇として検出するもので、温度計の役割を果たしているのが Transition Edge Sensor(TES) である。し かしながら、この TES カロリメータで従来の半導体検出器のようなメガピクセル化を実現することは容易 ではなく、自身の発熱によりアレイの配置数に上限が存在する。そこで考案されたのが、複数の吸収体を 1 つの温度計 (TES) で読み出す方式、通称 hydra type TES である。本研究では、この hydra type TES の 実証実験として 4 つの吸収体を 1 つの TES で読み出すことから始め、<sup>55</sup>Fe 線源を用いて得られた信号を解 析し、X 線イベントのピクセル弁別や、各ピクセルのエネルギー分解能の評価をおこなった。

#### 1 Introduction

宇宙を構成するバリオンのうち、未検出である ものをダークバリオンと呼ぶ。このダークバリオ ンの一部は、数値シミュレーションにより 10<sup>5</sup> – 10<sup>7</sup> K の中高温銀河間物質 (Warm-Hot Intergalactic Medium; WHIM) として分布することが示唆さ れている (Fukugita et al. 1998)。広範囲の WHIM の詳細な観測には高いエネルギー分解能かつ広視野 の撮像能力を持つ X 線観測機器が求められる。この 有力な候補として高いエネルギー分解能を持つ TES カロリメータが期待されており、その多画素化に向 けた Hydra type TES カロリメータの実証実験が行 われた。

#### 2 Methods/Instruments

TES型X線マイクロカロリメータは、X線吸収体、 温度計、熱リンク、熱浴からなるX線検出器で、X線 が吸収体で光電効果によって落としたエネルギーを 素子の温度上昇として捉える。この温度測定に用いる のが超伝導遷移端型温度計 (Transition Edge Sensor; TES)で、超伝導と常伝導の間の急峻な抵抗変化を 高感度な温度計として利用する。感度として、 $\alpha \equiv d(\ln R)/d(\ln T)$ が用いられ、およそ100 – 1000 程度 の値である。ただし、Rは抵抗値、T は温度である (図 1)。熱雑音の少ない 100 mK 程度の極低音で動



図 1: 超伝導遷移端の例。これは Mo/Cu2 層超伝導 薄膜の 96 mK 付近における超伝導転移である (Irwin & Hilton 2005)。

作し、X 線入射によって上昇した吸収体温度はその 後熱リンクを通じて熱浴へと逃げる。X 線パルス信 号の減衰時定数は数 100  $\mu$ s で、エネルギー分解能は フォノン揺らぎから  $\Delta E \sim \sqrt{k_B C T^2 / \alpha}$  と決まり、 数 eV のオーダーである。しかし広視野観測を念頭に おくと、従来の半導体検出器のようなメガピクセル 化は容易ではなく、自身の発熱によりアレイの配置 数に上限が存在することが知られている。この解決 策として、多数の吸収体を 1 つの温度計 (TES) で読 み出す方式 (通称 hydra type TES) が考案され、ま ずは 4 つの吸収体での実証実験が行われた (図 2)。4 つの吸収体はすべて Au 薄膜の熱リンクで接続され ており (図 2 左)、Pix.1 の下に TES が設置されてい る。ピクセルごとに熱の移動時間すなわち信号の立 ち上がり時間が異なるため、波形弁別により X 線の 入射した位置を特定することができる。



図 2: 実際に製作された 4 画素 hydra type TES。右 図は 4 つの吸収体で、左下から Pix.1、左上が Pix.2、 右上が Pix.3、右下が Pix.4 である。左図は吸収体の 下に設置された Au 薄膜の熱リンクである。TES(温 度計) は Pix.1 の下に設置されている。



図 4: X 線信号の立ち上がり時間と減衰時間の分布。 4 つの集団に分かれていることがわかる。

処理を施して補正されたパルスハイトを求めたのち、 Mn-K<sub> $\alpha$ </sub>の 5.9 keV、および Mn-K<sub> $\beta$ </sub>の 6.3 keV と原 点の計 3 点を用いてピクセルごとにエネルギー較正 をおこなった。結果、ピクセルごとに得られた Mn-K<sub> $\alpha$ </sub> 輝線を図 5 に示す。Pix.1 ではおよそ 10 eV 間隔



図 5: Mn-K<sub> $\alpha$ </sub> 輝線 (5.9 keV)。

の微細構造が見えたため、すべて Foigt 関数を用い てフィットした。分解能はピクセルごとにそれぞれ、 12 eV,16 eV,20 eV,37 eV@5.9 keV(FWHM) であ ることがわかった。

#### 3 Results

<sup>55</sup>Fe 線源を用いて得られた信号を図 3 に示す。X 線が入射したピクセルに対応して信号の立ち上がり 時間が有意に異なっていることが確認できた。これ をもとに、立ち上がり時間と減衰時間の分布から X 線イベントのピクセル分類をおこなった (図 4)。TES に近いほど信号の立ち上がり時間は速いと予想され るので、最も速いイベントから Pix.1, 2, 3, 4 と分 類した。続いて、X 線のエネルギーは信号のパルス ハイトに対応する。各イベントに対し最適フィルタ



図 3: 実際に観測された X 線信号。4 種類の波形が 観測された。

2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

#### 4 Discussion

分解能に関して、今回解析をおこなったデータの 統計が少ないために、分解能の不確かさが比較的大 きい。さらに、分解能の上限値であるベースライン 分解能が Pix.1 で約 5 eV と出ており、解析でおこ なったデータの補正の方法や結果に修正の余地があ る。また、信号の立ち上がり時間がピクセルごとに ばらつきを持っており、TES から遠ざかるほどその ばらつきは大きくなっている。この現象は現段階で 説明することができていない。

#### 5 Conclusion

多数の吸収体を1つの温度計で読み出す hydra type TES の実証実験として、<sup>55</sup>Fe 線源を用いてその性能 評価をおこなった。得られた X 線信号の立ち上がり 時間はピクセルごとに有意に異なっていることがわ かり、各ピクセルのエネルギー分解能は FWHM で 12 eV, 16 eV, 20 eV, 37 eV@5.9 keV であることがわ かった。今後はより統計の良いデータを用い、同様 の解析に通す予定である。

#### Reference

K.D. Irwin, & G.C. Hilton 2005

M. Fukugita, C.J. Hogan, & P.J.E. Peebles 1998, ApJ

--index へ戻る

## 観測b13

ISSに搭載予定のX線検出器による超高層大気の観測 計画と荷電粒子バックグラウンドの推定

## 岸本 拓海

### ISS に搭載予定の X 線検出器による超高層大気の観測計画と荷電粒子バッ クグラウンドの推定

岸本 拓海 (近畿大学大学院 総合理工学研究科)

#### Abstract

超高層大気 (10-500 km) の密度は、地球温暖化などの気候変動の影響で長期変動する。一方、太陽の影響に よる短期の準周期変動 (年変動、日変動) や、磁気嵐や地上での地震・火山等の影響による突発変動も発生 する。Katsuda et al. 2021 では、大気密度に応じて低エネルギー側の X 線が吸収される現象を用いて、各 高度での透過 X 線の吸収率から大気密度の鉛直分布を測定した。我々はこの手法を用いて大気密度の変動を モニタリングするため、国際宇宙ステーション (ISS) の曝露部への搭載を目指した超高層大気の観測専用の X 線観測装置の開発を行なっている。本プロジェクトは宇宙 X 線背景放射の大気透過を用いて超高層大気の 密度変動を観測する。宇宙 X 線背景放射は全天に淡く広がった放射のため、Cut-off rigidity に依存する荷 電粒子バックグラウンドが観測実現性を左右する。我々は、ISS に取り付けられた全天 X 線監視装置 MAXI と X 線観測装置 NICER のデータを用い、ISS 上の荷電粒子バックグラウンドの Cut-off rigidity 依存性を 調査した。本講演では計画の概要と、ISS における荷電粒子バックグラウンドの調査結果を報告する。

#### 1 Introduction

地球大気は対流圏 (0-10 km) 成層圏 (10-50 km)、 中間圏 (50-80 km)、熱圏・電離層 (80-500 km) の4 層に分類され、中間圏、熱圏、電離層はまとめて超高 層大気と呼ばれる。対流圏で CO<sub>2</sub> が増加した場合、 CO<sub>2</sub> が熱圏から熱を奪い取り、超高層大気は冷却& 低密度化する [Manabe & Wetherald et al. (1967)]。 すなわち、対流圏などの気候変動が超高層大気の長 期的な密度変化として現れる。また、太陽の影響に よる短期の準周期変動 (年変動、日変動) に加え、磁 気嵐や地上での地震・火山等で生じた大気波動による 突発変動も発生する。これらの変動を見るために超 高層大気の長期的な観測データを解析したいが、高 度 100 km 付近の超高層大気は人工衛星や気球によ るその場観測が不可能であるため、大気中の中で最 もデータが不足している。そこで我々は、国際宇宙ス テーション (International Space Station; 以降 ISS) の曝露部 (MISSE モジュール) に我々が開発してい る SOI-CMOS イメージセンサ (SOIPIX) を取り付 け、超高層大気の膨張収縮を観測する計画を立てて いる。本プロジェクトは宇宙 X 線の大気透過を利用 して高度 100 km 付近での大気密度の鉛直分布とア ルゴン組成の時間変化を測定し、下層大気の変動成 分を調査すること、また太陽 X 線の大気反射を観測 し、高度 100 km 付近の大気の膨張収縮と太陽活動 の関係を調査することを目的としている。以下では、 本プロジェクトにおける X 線の観測方法とその実現 に向けた荷電粒子バックグラウンドの推定について 議論する。

### 2 夜地球における超高層大気の密 度変化の観測

Katsuda et al. (2021) では X 線天文衛星を用いて、 天体が地平線に沈む時、大気を透過した X 線が受け た吸収から大気密度を測定した。X 線が大気に入射 する場合、大気の密度によって X 線が受ける吸収が 異なる (図 1 参照)。図 2 に高度別に見たかに星雲の X 線スペクトル [Katsuda et al. (2021)] を示す。X 線 が透過する大気の高度が大きくなるほど、X 線がよ り吸収を受け、低エネルギー X 線のフラックスが減 少していることがわかる。

先行研究で用いられた天体は「かに星雲」であっ た。ISS から見た「かに星雲」の位置は、刻一刻と変 化するため、本プロジェクトの観測対象として適切で はない。長期間の観測データの取得を目的としてい る本プロジェクトでは、宇宙 X 線背景放射 (Cosmic X-ray Background; 以降 CXB)の大気透過を観測す



図 1: 先行研究で行われた、夜地球における超高層大 気の観測。



図 2: 高度別に見たかに星雲のスペクトル。Katsuda et al. (2021)

る(図3参照)。CXB は宇宙のあらゆる方向から降 り注ぐ X 線バックグラウンドであり、その起源は活 動銀河核と言われている。CXB のスペクトルは光子 指数 1.4 のべき関数で 40 keV 以上に折れ曲がりがあ る。観測計画の実現性を議論するために CXB の値 と後述する NXB の推定値を比較して、ISS 軌道上で の観測が可能かどうかを事前に調べておくことが重 要である。



図 3: 本研究で行う、夜地球における超高層大気の 観測。

# 3 昼地球における太陽 X 線の大気 反射成分の観測

太陽 X 線が大気に入射した場合、散乱や光電吸収 が起きる。光電吸収が起きた場合は蛍光 X 線が観 測できる。この X 線を長期間観測することで、高度 100 km 付近の大気の膨張収縮と太陽活動の関係を調 査する。太陽活動は約 11 年の周期で活発化を繰り返 している。次に太陽活動が極大期になると予想され るのが 2025 年である。太陽活動の極大期と観測開始 の時期が重なれば、大気の膨張収縮と太陽活動の関 係がより顕著に観測できるはずである。



図 4: 本研究で行う、昼地球における太陽 X 線の反 射成分の観測。

#### 4 研究目的

本プロジェクトでは CXB を観測対象としている が、非 X 線バックグラウンド(Non X-ray Background; 以降 NXB)成分が顕著な場合は観測が不 可能である。そこで本研究では、実際に ISS 軌道上 で運用を行なった検出器が取得したデータを用いて、 どの程度の NXB が検出されるかを推定し、CXB と 比較した。また、その結果を用いて、本プロジェク トの観測計画の実現性を議論する。

### 5 ISS 軌道上における荷電粒子バッ クグラウンド

宇宙から地球に降り注ぐ粒子には一次宇宙線と二 次宇宙線がある。大気に侵入した一次宇宙線は、μ 粒子、π中間子、中性子、光子などを生成し、二次 宇宙線へと変化する。荷電粒子は地磁気にトラップ されるため、その多くは1000 km 以下には侵入でき ず、GeV を超える高エネルギー宇宙線のみが衛星軌 道や、500 km 以下の ISS 軌道まで侵入できる。地磁

気にこれらの荷電粒子がトラップされ、帯状になっ ている領域をバン・アレン帯という。地磁気の軸が 地球の自転に対して傾いているため、バン・アレン 帯が ISS 軌道の高度 400 km 以下に侵入し、荷電粒 子が急激に増加する領域がある。この領域は南大西 洋異常帯 (South Atlantic Anomaly; 以降 SAA) と 呼ばれ、荷電粒子バックグラウンドが桁で増加する。 また、北極・南極に近い高緯度領域でもバックグラ ウンドの桁での変動が見られる。

一次宇宙線の強度は磁気限界硬度(Cut-off Rigidity; 以降 COR)の大きさで決まる。COR とは、宇 宙線が地球大気へ入射する際の地球磁場のシールド 能力を表す値である。COR が大きい領域には高エネ ルギーの粒子しが侵入できないため、一次宇宙線の 強度が低い。つまり、COR が大きい領域では荷電粒 子バックグラウンドも小さくなる。



図 5: すざく衛星が観測した 2005 年時点の軌道上 での COR の大きさの分布 。単位は GV である。 Suzuki et al. (2018)

#### NICER のデータを用いた 6 NXBとCXBのfluxの推定

本研究では、ISS 曝露部にすでに搭載されている X 線観測装置の実測データを用いて、ISS 軌道上で の NXB の推定を行った。本研究の解析で使用した データは「NICER」のものである。NICER は 2017 年にNASA によって打ち上げられ、その実態はシリ コンドリフト検出器を多数並べたものである。我々 の超高層大気観測に用いる SOIPIX とは、バックグ ラウンド棄却の原理など相違点も多いが、ここでは、 NICER の NXB レベルが SOIPIX で観測する場合と 同程度と仮定し、SOIPIX で CXB の観測が可能か 果から求められたスペクトルを SOIPIX の有効面積

を検証した。NICER の有効面積は 9.52 cm<sup>2</sup> である が、SOIPIX の有効面積は 4.6 cm<sup>2</sup> である。そのた め、NICER の NXB のスペクトルを SOIPIX の有効 面積にスケーリングする。

本プロジェクトの観測装置で期待される CXB の スペクトルに関しては、あすか衛星を用いて得られ た下記の結果を用いた (Kushino et al. 2002)。

$$CXB = 8.2 \times 10^{-7} \times \left[\frac{E}{\text{keV}}\right]^{-1.4}$$
(1)  
[photon/cm<sup>2</sup>/s/arcmin<sup>2</sup>/keV]

である。本プロジェクトで使用する SOIPIX の視野 である 30 平方度、有効面積 4.6 cm<sup>2</sup> を用いると、

$$CXB = 4.07 \times 10^{-1} \times \left[\frac{E}{\text{keV}}\right]^{-1.4} \times \left(\frac{\text{deg}^2}{30 \text{ deg}^2}\right) \left(\frac{\text{cm}^2}{4.6 \text{ cm}^2}\right) \quad \text{[photon/s/keV]}$$
(2)

となる。

図 6 に NICER によって検出された NXB を SOIPIX の有効面積にスケーリングした場合のスペ クトルと、SOIPIX の視野と有効面積を考慮した場 合の CXB のスペクトルを示す。#1、2、3、4 はの COR の違いである。#1、2 の COR は 1 GV、#3 の COR は 2 GV、#4 の COR は 10 GV である。

#### 議論 7

NXB の推定の結果、CXB の観測が現実的に可能 かを考察する。COR が 10 GV の場合 NXB が CXB よりも低くなる。この範囲では問題なく CXB を観 測することができる。一方で COR が 1-2 GV の場合 は、NXB が CXB より大きくなるため、観測は困難 である。

図 6 より、NXB は COR の値に反比例しているた め、COR 値が低い SAA や高緯度では CXB が埋も れてしまうことが分かる。この領域では NXB のカ ウントレートは短時間かつ急激に何桁も変動するこ とがある。

今回の結果として示した図6は、NICERの観測結



図 6: NICER の NXB のスペクトルと CXB を SOIPIX の有効面積にスケールしたもの (データ点) 。#1、2 の COR は 1 GV、#3 の COR は 2 GV、#4 の COR は 10 GV である。実線は SOIPIX の視野と 有効面積を考慮した CXB のスペクトル。

や視野を用いてスケーリングした場合のものである。 しかし、同じピクセル検出器である CCD を搭載し た MAXI/SSC の NXB のカウントレートのほうが、 SOIPIX の NXB に近いかもしれない。

#### 8 まとめ

本研究では NICER で観測された NXB を用いて、 ISS 軌道上の NXB を推定した。また、CXB はあす か衛星の観測によって得られた式を用いた。その結 果、COR が 10 GV の場合は CXB が観測可能であ ると分かった。一方で、COR が小さい場所では一次 宇宙線の強度が大きいため、NXB が増加する。その ため、SAA や高緯度では NXB に CXB が埋もれて しまうことが分かる。

今後は同じピクセル検出器である CCD を搭載した、MAXI/SSC のデータの解析を行う。

#### Reference

- Manabe & Wetherald et al., 1967, Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity, JAS, 24, 241.
- Roble & Dickinson et al., 1989, How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere?, GRL, 16, 1441.

- Katsuda et al., 2021, New Measurement of the Vertical Atmospheric Density Profile from Occultations of the Crab Nebula with X-Ray Astronomy Satellite Suzaku and Hitomi, JGR: Space Phys, 126, 4.
- Kushino et al., 2002, Study of the X-Ray Background Spectrum and Its Large-Scale Fluctuation with ASCA, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 54, Pages 327–352
- 鈴木寛大「『ひとみ』硬X線イメージャの軌道上バックグ ラウンド評価」東京大学大学院理学系研究科馬場・中 澤研究室,修士論文,2018年

-index へ戻る

観測b14

## 湾曲Si結晶を用いたBragg反射型偏光計の作成及び性 能評価

瀬口 剛弘

# 未提出

-index へ戻る

## 観測b15

## 銀河団中心銀河 H1821+643 の Chandra X線衛星の詳 細解析

藤井 麟太郎

#### 銀河団中心銀河 H1821+643 の Chandra X 線衛星の詳細解析

藤井 麟太郎 (立教大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

H1821+643 は低赤方偏移 (z=0.299) の銀河団に属する銀河であると同時に、中心に光度の大きな活動銀河 核を持つ天体である。先行研究では、AGN によって形成された X 線空洞と思われる表面輝度の低下を発見し たが、その空洞が X 線で見えているのかどうか解析が難しい。そこで、Richardson-Lucy deconvolution (RL 法)を用いることで構造が鮮明化できないか考えた。RL 法とは、既知の Point Spread Function (PSF, 点拡 がり関数)と衛星が実際に観測、撮像した画像からベイズ推定によって真の画像を推定するという手法であ る。しかし、X 線観測衛星 Chandra に搭載されている CCD 検出器は他の検出器と比較して時間分解能が 悪いため、明るい天体を観測するときに複数の入射 X 線光子の撮像領域が重なり合うことでイベントの抽出 がうまくされない"Pileup"が発生する。Pileup などの効果を考慮するために RL 法の他に Blind-RL 法を導 入した。基本的な考え方は RL 法と同じではあるが、Blind-RL 法は PSF の推定も同時に行う。本発表では Blind-RL 法が RL 法とどう変わるのか、Pileup の強い H1821+643 の他に Pileup の弱い天体と Pileup が ない天体に適用することで、RL 法と Blind-RL 法のそれぞれの手法について議論を行う。

#### 1 Introduction

H1821+643 は銀河団の中心に存在する銀河 (銀河 団中心銀河) でクエーサーと呼ばれる活動銀河核を含 む。中心にある超大質量ブラックホールは 300 億太 陽質量と最も大規模なものの1つであると推定され る。また、低赤方偏移 (z=0.299) で現在も成長段階 にいる H1821+643 は銀河団における銀河の形成過 程を調べることのできる稀有な天体とされている。

超大質量ブラックホールは我々が存在している天 の川銀河のような大きな銀河や、銀河団の中心にあ る銀河をはじめとするあらゆる巨大銀河の中に存在 する。そこでの5000万度にも及ぶ超高温のプラズマ から強い X 線が放射され、時間と共に熱を放出して いく。やがてプラズマが冷えると星が形成されるが しかし、ブラックホールが周囲のガスを再加熱して 星の形成を妨げる。これは、ブラックホールの中心 から熱せられた物質がジェットとして噴射されるこ とによって起こる。このジェットは周りのガスを押し のけることで空洞を形成することが知られているが、 H1821+643 にも空洞と思われる表面輝度の低下が先 行研究から見られている。しかし、実際のところ X 線で見えているのか解析が難しい。

本研究では、ChandraX 線衛星で観測されたデー タを使い、撮像画像からはわからない空間的な拡がり を鮮明化することを大きな目標としている。しかし、 宇宙 X 線観測においては望遠鏡や検出器の応答が畳 み込まれているため、それらを考慮しないと実際の空 間的な拡がりを推定することはできない。1つの手法 として、Richardson-Lucy deconvolution(RL法)が あり、既知の PSF と衛星が撮像した画像からベイズ 推定を繰り返し計算することで真の画像を推定する。 しかし、Chandra 衛星に搭載されている CCD 検出 器で明るい天体を観測すると Pileup が発生してしま うことがわかっている。本研究では、この Pileup の 効果を考慮することを視野に、Pileup の強度が異な る天体をそれぞれ用意し解析を行った。

#### 2 Methods/Instruments and Observations

#### 2.1 ChandraX 線衛星と使用するデータ

ChandraX 線衛星は、1999 年 7 月 23 日に NASA によって打ち上げられた人工衛星である。Chandra には、高解像度 X 線 CCD カメラ (ACIS)、高分解 能カメラ (HRC)、高エネルギー用の透過 4 型回折 格子 (HETG)、低エネルギー用の透過型回折格子 (LETG)、X 線反射鏡 (HRMA) が搭載されている。 また、Chandra の望遠鏡はウォルター I 型 X 線望遠 鏡が採用されている。これは、X 線が滑らかな金属 面すれすれに入射すると全反射を起こすことを利用 したもので、回転放物面と回転双局面の反射基盤を バームクーヘン状に配置した構造となっている。以 下にその構造を示す。特に Chandra の望遠鏡は角度 分解能が 0.5 秒角と X 線観測衛星の中で最も良い性 能を誇っている。



図 1: ウォルター I 型望遠鏡の構造

今回使用した Chandra のデータは、ACIS で観測 されたデータのうち、2008 年の同時期に観測された Observation ID 9398, 9845, 9846, 9848 で、以下の 表の通りである。

表 1: 本研究で使用する ChandraX 線衛星のデータ

ObsID	Exposure Time(ks)	Observation Date
9398	33.7	2008/4/21
9845	24.2	2008/4/14
9846	18.1	2008/4/20
9848	11.0	2008/4/23



図 2: ObsID を結合した H1821+643 のイメージ

#### 2.2 CCD $\mathcal{O}$ grade $\mathcal{E}$ Pileup

CCD 検出器で X 線の観測を行う際に、入射して くる光子が X 線由来のイベントなのか、バックグラ ウンド由来のイベントなのかを判定する「グレード 法」が用いられている。CCD 検出器が初めて搭載さ れた「あすか」衛星で採用されているグレード法は、 grade0~7 に分けられ、grade0, 2, 3, 4, 6 が X 線由 来のイベント (good event) として判定され、grade1, 5, 7 がバックグラウンドのイベント (bad event) とし て処理される。

Pileup とは、検出器の同じ領域に入射した 2 つ以 上の光子が 1 つのイベントとして処理されてしまう ことを言う。例えば、2keV の光子と 5keV の光子が 入射した際に合わせて 7keV のイベントとされてし まい、スペクトルが高エネルギー側にシフトしてし まう。また、複数のピクセルに跨って入射した 2keV と 5keV の光子がまとめて 7keV のバックグラウンド イベントとして除去されてしまい光子の過小評価に 繋がるといったことが起きる。

#### 2.3 Point Spread Function(PSF, 点拡 がり関数)

PSF は、恒星などの点源を撮像した時の拡がり具 合を表した関数である。Chandra で観測したときの PSF は検出器の形状や、焦点面への配置などによっ て影響を受けてしまうため、理論的に計算すること は難しい。そのため、本研究では実測に基づいたシ ミュレーションにより生成する。Chandra の PSF は 光軸から離れるほど大きくなり、光軸との傾きに応じ て PSF の楕円形の傾きが変化する。また、入射エネ ルギーが大きいほど PSF が大きくなる傾向にある。

#### 2.4 Richardson-Lucy deconvolution(RL法)

Richardson-Lucy deconvolution(RL 法) は、既知 の PSF と衛星の観測画像から真の画像 (実際の空間 の拡がり)を推定する手法である。観測画像やその分 布や既知の PSF をベイズ推定を用いて繰り返し計算 することで真の画像を推定する。理論式は以下の通 りである。

$$W_{i,r+1} = W_{i,r} \sum_{k} \frac{P_{i,k}H_k}{\sum_j P_{j,k}W_{j,r}} \quad r = 0, 1, 2, \dots$$
(1)

各添字のi, j, kは画像のピクセル座標を指している。 W は真の画像、H は撮像画像、r は反復回数としている。また、真の画像 $W_j$ が撮像画像 $H_k$ で観測されるときの確率を $P(H_k|W_j) = P_{j,k}$ でこれをPSFとしている。

#### 2.5 Blind-RL法

基本的には RL 法と同様の概念が用いられるが Blind-RL 法では PSF の推定も同時に行う。数学的 に、撮像画像は真の画像と PSF の畳み込みで表現する ことができ、任意の  $f \ge g$  は交換律から  $f \otimes g = g \otimes f$ が成り立つ。つまり、真の画像と PSF の対応が反対 になっていても数学的に問題はない。この性質を利 用すると、真の画像がわかっている場合には PSF の 推定を行うことができる。つまり、Blind-RL 法では 真の画像と PSF の初期値を与えて、反復回数ごとに RL 法により真の画像と PSF を交互に同時に推定す る。理論式は以下の通りである。

$$P_{r+1} = P_r(x) \left\{ \left[ \frac{H(x)}{P_r(x) \otimes W_r(x)} \right] \otimes W_r(-x) \right\}$$
(2)

$$W_{r+1} = W_r(x) \left\{ \left[ \frac{H(x)}{W_r(x) \otimes P_r(x)} \right] \otimes P_r(-x) \right\}$$
(3)

*W*, *H*, *r* は RL 法の時と同様で、*x* は二次元のピクセ ル座標を表している。

#### 3 Results

#### 3.1 RL 法の結果

RL 法を H1821+643 に適用した結果を図3に示す。 左から反復回数が10回、50回の結果を示している。 反復回数が増えると中心領域に欠けた構造を確認す ることができる。



#### 3.2 Blind-RL 法の導入

Blind-RL 法を H1821+643(Pileup 強) に適用する 際に、Blind-RL 法が Pileup が起きない or 弱い天体 でも正しく動作するのかを確かめるために、そちら も併せて適用した。以下にその図を示す。



図 4: Pileup m (pks 0637-75)、r=50





図 6: Pileup 強 (H1821+643)、r=50

#### 4 Discussion

図 4~6 について、Pileup をしている天体の結果を 見てみると Blind-RL 法の方が Pileup の影響が補正 されていることが見て取れる。しかし、Pileup をし ていない天体に注目してみると、RL 法よりも Blind-RL 法の方が拡がりが大きく、真の画像の推定が上手 くできていないことがわかる。つまり、PSF が画像 よりも過剰に推定されてしまっているため、Pileup 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

の効果が PSF 側に吸収され図 4 では画像の推定が上 手くいかなかったと考える。

#### 5 Conclusion

本発表では、Pileup の強度別で複数の天体に対し て RL 法と Blind-RL 法を適用し比較をした。しか し、PSF の推定が過剰に行われていると考えられる ため、真の画像がより推定されるよう見直していく 必要がある。今後の展望として、Blind-RL 法での結 果を入力として位置依存型 RL 法に組み込めないか 試していきたい。

#### Reference

H. R. Russell et al. 2010, MNRAS, Volume 402,  $1561{-}1579$ 

Richardson, William Hadley. 1972, JOSA, 62, 55-59

Lucy, L. B. 1974, Astronomical Journal, 79, 745-754

D.A.Fish et al., 1995, JOSA, 58-65

ーindex へ戻る

## 観測b16

## 高感度MeVガンマ線天体観測のためのETCC開発

## 塚本 博丈

#### 高感度 MeV ガンマ線天体観測のための ETCC 開発

塚本 博丈 (京都大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

X線〜ガンマ線領域の背景放射の起源を探ることで、活動銀河核の歴史、つまり超巨大ブラックホールの 成長過程を確認できるとされており、また背景放射を個々の線源に分解することで、背景放射によって埋も れていた未知の天体や新しい物理に触れる可能性がある。しかし 0.1-100 MeV の MeV ガンマ線の背景放射 は、その観測自体の困難さも相まって未だ起源が判明していない。そこで我々は高い精度で MeV ガンマ線 を観測できる電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)を開発し、その性能を気球実験で実証する SMILE 計画を進めている。SMILE-I での MeV ガンマ線背景放射観測では、過去の観測事例と矛盾ない結果が得ら れたが、起源を解明するまでには至っていなかった。SMILE-2+では検出感度が改善したことから、検出器 の内在バックグラウンドが存在することが判明した。

#### 1 研究の背景

#### 1.1 MeV ガンマ線領域のサイエンスと宇 宙背景放射

光子のエネルギーが 0.1-100 MeV の MeV ガンマ 線領域のサイエンスとして、放射性同位体の崩壊に 伴う核ガンマ線から超新星爆発中の元素合成の解明 や、長寿命の放射性同位体の銀河系内分布から元素 拡散の様子を観測することができると期待されてい る。また銀河中心領域に広がる電子陽電子対消滅線 を観測することで、暗黒物質も候補として挙げられ る陽電子起源を探ることができる。さらには中性パ イ中間子の崩壊ガンマ線や原子核の脱励起線から、そ れぞれ >200 MeV、10-100 MeV のエネルギーを持 つ宇宙線の相互作用を確認することができ、宇宙線 起源の解明に繋がる。

宇宙のどの方向からも一様に放射されている電磁 波である宇宙背景放射については、マイクロ波領域 の宇宙マイクロ波背景放射(CMB)がビッグバンの 証拠として有名だが、マイクロ波以外の波長帯にも 背景放射は存在する。例えばX線領域の背景放射は、 チャンドラ衛星の観測により活動銀河核(AGN)の セイファートが起源だと判明した [1]。また GeV ガ ンマ線領域の背景放射は、AGN のブレーザー・星形 成銀河・電波銀河の3種族からの寄与によって説明 が可能である [2]。

宇宙背景放射の起源を解明することによって、各 波長で支配的な天体の歴史を紐解くことができる。



図 1: 宇宙 MeV ガンマ線背景放射の放射スペクトル モデル。セイファート、FSRQ、Compton-thick AGN の放射モデルと過去の観測結果とを比較している。[8] より。

特にX線〜ガンマ線の高エネルギー天文学において は活動銀河核の歴史、つまり超巨大ブラックホール の成長過程を確認することができると期待されてい る [1] 。また背景放射を個々の線源に分解していく ことで、背景放射によって埋もれていた未知の天体 や新しい物理に触れる可能性も存在する。

MeV 領域にも宇宙背景放射の観測報告は存在して いる。起源候補としては主に、1.Ia 型超新星爆発(た だし [3] では否定的)、2. セイファートの非熱的な高 エネルギー成分 [4]、3.. ブレーザー(FSRQ) [5] の 3つが挙げられている。しかし観測自体に大きく不 定性があり、MeV ガンマ線背景放射の起源について



図 2: X 線・ガンマ線源の年代ごとの天体数の推移。 通称木舟プロット。他波長に比べて MeV ガンマ線領 域は発見天体数が非常に少ないことが見て取れる。[7] より。

は未だ解明されていない。起源の特定のために、今 後の観測技術の発展が待ち望まれている。

#### 1.2 MeV ガンマ線観測の現状

MeV ガンマ線観測は、実は観測自体が困難で他波 長領域に比べて研究が大きく遅れている分野である。 例えば X 線の場合、斜入射型の鏡で反射することを 利用して集光することができるが、MeV ガンマ線の 場合は透過力が強いため集光できず、広い有効面積 を確保することが出来ない。また MeV ガンマ線と物 質との相互作用で優位なコンプトン散乱の際、入射 光子のエネルギー・到来方向の情報を一部失ってし まうので SN 比が悪くなってしまう。更には宇宙線 と観測器との相互作用からも放射性同位体や励起原 子核が生成されて雑音ガンマ線が大量に発生してし まう。従来 MeV ガンマ線観測には、符号化マスク法 やコンプトン望遠鏡が用いられてきたが、直接的に イメージングを行う方法は未だ存在せず、SN 比の高 いデータのまま処理を行わなければならなかった。

実際 MeV ガンマ線領域の観測は、1990 年代の COMPTEL が数十天体を発見し [6] た後、大きな進 展はないのが現状である(図 2)。MeV ガンマ線天 文学の発展のためには、光子ごとに到来方向を一意 に決定できて角度分解能が高く、さらに観測対象か らの光子以外の雑音を強力に排除するような次世代 の MeV ガンマ線検出器が必要になる。



図 3: ETCC の構造のイメージ図(左)と、従来コ ンプトン法と ETCC でのイメージングの例(右)

# 電子飛跡検出型コンプトンカメ ラ(ETCC)とSMILE計画

我々は次世代の MeV ガンマ線検出器として、3次 元ガス飛跡検出器とシンチレータからなる電子飛跡検 出型コンプトンカメラ (Electron-Tracking Compton Camera; ETCC)の開発を行なっている。従来のコ ンプトン法ではコンプトン散乱において、散乱ガン マ線のエネルギーと散乱位置・散乱方向、反跳電子の エネルギーのみを検出していた。その為観測対象か らの入射光子の方向は、散乱方向を中心とした散乱 角 θ をなす円環上にしか制限することが出来なかっ た。しかし ETCC では3次元ガス飛跡検出器によっ て、反跳電子の飛跡も検出する。これによって運動 量保存則に基づいて、入射ガンマ線の方向を一意に 定めることが出来る(図3右)。これによって直接的 なイメージングが可能になり、更には観測領域外か らの雑音ガンマ線の入射を大きく減少させ、SN 比を 改善することが出来る。

さらに ETCC には荷電粒子のエネルギー損失率に よって粒子識別を行い、観測対象からのコンプトン 散乱によるイベントと、宇宙線などによるそれ以外 のイベント事象とを区別することが出来る。また散 乱ガンマ線と反跳電子のなす角は、角度の定義から 幾何学的に導くことも、散乱ガンマ線と反跳電子の エネルギーからも求めることが出来る。よってこの 両者が一致するかを見ることで、検出した事象がコ ンプトン散乱であるかどうか判断し、コンプトン散


図 4: SMILE-I での Growth Curve と MeV ガンマ線 背景放射の解析結果。検出器に入射するガンマ線を 背景放射+大気ガンマ線+検出器のバックグラウン ドの3成分に分けて fitting している。[9] より。

乱以外の雑音を除去することが出来る。このように ETCC には強力な雑音排除能力も兼ね備えており、 従来よりも高感度な観測を可能としている。

この ETCC が宇宙環境下でも高感度なガンマ線観 測が可能であることを実証し、科学観測へと繋げるた めに成層圏気球を用いた Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiments (SMILE) という計画を進めている。2006年の三陸で行われた SMILE-I、2018年オーストラリア アリススプリング スで行われた SMILE-2+では、ETCC の性能実証の ために観測を行った [9,10]。これらの気球実験を通 して ETCC が設計感度をほぼ達成し、高感度な天体 観測が実証されつつあることを踏まえて、科学観測 を目的とした気球実験 SMILE-3 を 2027 年に計画し ている。

#### SMILE-I での背景放射観測 3

気球高度において検出器に入射するガンマ線は、1. ガンマ線背景放射、2. 大気ガンマ線、3. 宇宙線と検 出器の相互作用によるバックグラウンドの3つが考 えられる(以下 *z* は大気厚さ(Atmospheric Depth) である)。1. ガンマ線背景放射 *f<sub>c</sub>(z)* は、大気中で散 乱されずに直接検出器に入る成分  $f_n(z)$  と大気中で fitting を行い (図 4)、ガンマ線背景放射の強度を求



図 5: SMILE-I による MeV ガンマ線背景放射のフ ラックス(赤点)と過去の観測との比較。[9] より

散乱された後に検出器に入る成分  $f_s(z)$  とに分けて 考える(*<sub>tot</sub>* は大気での吸収の断面積):

$$f_c(z) = f_n(z) + f_s(z) \tag{1}$$

$$f_n(z) \propto \exp(-\tau_{tot} z)$$
 (2)

そして背景放射のうち大気で散乱されてから検出器 に入る割合 λ(z) をシミュレーションで計算してから 背景放射の flux を求めている:

$$f_c(z) \propto \frac{1}{1 - \lambda(z)} \exp(-\tau_{tot} z)$$
 (3)

$$\lambda(z) := \frac{f_s(z)}{f_n(z) + f_s(z)} \tag{4}$$

2. 大気ガンマ線とは、空気シャワーによって生じた二 次荷電粒子が制動放射によって放射するガンマ線で あり、宇宙線の標的である大気厚みに比例する [11]。 3. 宇宙線と検出器の相互作用によるバックグラウン ドはシミュレーションにより見積もる。

SMILE-I での観測値を用いて Growth curve を得 て、宇宙線強度が宇宙線と筐体との相互作用からの 雑音シミュレーションで用いたモデルから大きくず れないと仮定して 1. と 2. の成分をパラメータとして



図 6: シンチレータの内在 BG を示すスペクトル

めた(図5)。ETCCの性能実証のために実験された SMILE-Iでの背景放射観測の強度は過去の観測事実 と矛盾ない結果が得られていることが分かる。しか し統計不足もあり、背景放射の起源の特定を示唆す るには至っていない。

# 4 SMILE-2+での背景放射解析の 現状

SMILE-2+においても背景放射は観測されている。 しかし解析を進めバックグラウンドの理解を進める 内に、1.ETCC 内部のシンチレータに U/Th 系列不 純物が多く含まれている、2. シンチレータの後段の 光電子増倍管 (PMT) に<sup>40</sup>Kが含有していることが 分かった (図 6)。背景放射のエネルギースペクトル を得るにはこれら内在バックグラウンドの影響を差 し引かなければならない。

現在、これら内在放射性同位体による影響の見積 もりを進めている。内在バックグラウンドと各高度で の機器由来の雑音量を見積もった後に、growth curve の解析から SMILE-2+での背景放射のエネルギース ペクトルが得られる。

### 5 まとめ

我々は観測自体が困難な MeV ガンマ線を高感度で 検出する電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC) の開発を行い、その性能を成層圏気球で実証する SMILE 計画を進めている。特に未だ起源が判明し ていない MeV ガンマ線背景放射の観測について、 SMILE-I では過去の観測と矛盾ない結果が得られ たが起源の特定までには至っていない。その後の SMILE-2+でも背景放射観測は行われたが、検出器 の内在バックグラウンドが存在することが判明し、こ れの影響がまだ検証されていない。検出器の内在バッ クグラウンドの推定が終了し次第、MeV ガンマ線背 景放射観測を解析する。

### Reference

- [1] Ueda et al, 2003, ApJ, 598, 886
- [2] Ajello et al, 2015, ApJ, 800, L27
- [3] Ahn et al, 2005, PRD, 71, 121301
- [4] Inoue et al, 2008, ApJ, 672, L5
- [5] Ajello et al, 2009, ApJ, 699, 603
- [6] Schönfelder et al, 2000, Astron. Astrophys. Suppl., 143, 145-179
- [7] 井上 芳幸, 2018, 天文月報, 111, 740
- [8] Inoue et al, 2013, ApJ, 776, 33
- [9] Takada et al, 2011, ApJ, 733, 13
- [10] Takada et al, 2022, ApJ, 930, 6
- [11] Schönfelder et al, 1977, ApJ, 217, 306

--index へ戻る



# ガンマ線天文気球観測実験 SMILE-3

# 吉岡 龍

# MeV ガンマ線天文学気球観測実験 SMILE-3

吉岡 龍 (京都大学大学院 宇宙線研究科)

#### Abstract

MeV ガンマ線における天文観測では、銀河中心方向からは大きく広がった空間分布を持つ電子陽電子対消滅 線や連続的なエネルギースペクトル構造を持つ銀河系内拡散ガンマ線が検出されている。しかし、この陽電 子の起源や系内拡散ガンマ線の放射機構は未だ明らかにされていない。これらの起源の有力な候補に、原始 ブラックホールや暗黒物質 WIMP が挙げられており、天文学のみならず宇宙論・素粒子物理学からも MeV ガンマ線帯域における銀河中心領域の詳細観測が切望されている。COMPTEL 以降20年間停滞する MeV ガンマ線天文学を進展させるべく、我々は電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC) を開発してきた。2018 年には、天体観測実証実験 SMILE-2+ を実施し、銀河中心領域に広がる電子陽電子対消滅線と MeV ガン マ線拡散放射が存在を確認した。よって、SMILE-2+ よりも大面積・高角度分解能の ETCC を気球に搭載 し、これらガンマ線の空間分布とエネルギースペクトルを得ることで、原始ブラックホールや WIMP の存 在に迫る、SMILE-3 実験を計画している。ETCC の改良として、ガス飛跡検出器中のガスの種類変更によ る、ガンマ線有効検出面積の向上と Trigge 方式の変更による不感時間の削減が考えられている。

# 1 MeV ガンマ線天文学の現状

### 1.1 MeV ガンマ線観測

MeV ガンマ線領域は (0.1-100 MeV) での観測は 相互作用がコンプトン散乱優位であるため、入射ガ ンマ線のエネルギーと入射方向を特定しずらい。ま た、宇宙線と物質との相互作用で励起された原子核 がガンマ線を放出し、雑音となる。これらの理由か ら MeV ガンマ線観測は困難な状況にある。

#### 1.2 銀河中心領域での観測

INTEGRAL、OSSE などが、銀河中心領域に広が る電子陽電子対消滅線の 511keV と連続したエネル ギースペクトルを持つ銀河系内拡散 MeV ガンマ線を 観測している。陽電子電子対消滅線に関しては観測 されたエネルギースペクトルから 90% 以上がポジト ロニウムの崩壊によるものだとわかっている。ポジ とトロニウムを生成する、つまり陽電子が電子を捕 獲するには陽電子の運動エネルギーは 10-100 eV で ある必要がある。ところが、現在わかっている陽電 子の起源では陽電子のエネルギーがすべて 1 MeV 以 上になってしまう。また、銀河中での陽電子の冷却 機構を考えると、1 MeV 以下の陽電子をさらに冷却 させるには電離によるエネルギー損失しか考えられ ず、これでは陽電子がポジトロニウムを生成できる ほど冷却するには長い飛程が必要であり、銀河中心 領域に分布する電子陽電子対消滅線を説明できない。 銀河系内拡散 MeV ガンマ線についても、MeV ガン マ線放射を示唆する明確な折れ曲がりが 0.1 MeV 付 近に観測されている。観測されるエネルギースペク トルが電子宇宙線と星の光との逆コンプトン散乱で 期待される強度より明るくなっており、電子宇宙線 と星の逆コンプトン散乱では説明できない。このよ うに銀河中心に広がる陽電子と拡散 MeV ガンマ線の 起源が説明できない状況である。ここで現在考えら れている説を4つ紹介する。

一つ目はベータ崩壊による陽電子の生成である。恒 星により<sup>26</sup>Al や<sup>24</sup>Ti が生成されるのだが、これが β+崩壊によって陽電子を出し、これが銀河中心領域 の対消滅線の起源であるという説だ。<sup>26</sup>Al はベータ 崩壊する際に 1.809 MeV のガンマ線を放射するのだ が、実際に、SPI がこの放射を銀河中心領域で観測し ており、<sup>26</sup>Al が銀河中心領域で分布しているのは知 られている。。しかし、このβ+崩壊が生成する陽電 子はポジトロニウムを形成できないほどエネルギー が高く、この陽電子がどう伝搬されてエネルギーを 落とすかは未解明である。

二つ目は銀河中心に広がる拡散 MeV ガンマ線の起 源が宇宙線と分子雲の相互作用によってできた脱励 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

起ガンマ線であるとするものである。しかし、脱励 起ガンマ線はまだ検出おらず、また期待されるエネ ルギースペクトルの強度は逆コンプトン散乱による スペクトルよりも小さい。

三つ目は原子ブラックホールによる放射が拡散 MeV ガンマ線と陽電子の起源となっている説であ る。原始ブラックホールとは初期宇宙で誕生したブ ラックホールであり質量が 10<sup>16</sup>-10<sup>17</sup>g であり、寿命 が 10<sup>12</sup>-10<sup>15</sup> である。このブラックホールはホーキン グ放射で MeV の放射を出すと考えられており、こ れが拡散 MeV ガンマ線や低エネルギーの陽電子の放 出源となりうると考えられている。

最後の説は質量が 10 MeV ほどの軽い暗黒物質の 対消滅によるものである。この軽い暗黒物質は対消 滅で電子・陽電子対やガンマ線を放出すると期待さ れている。



図 1: 銀河中心での電子陽電子対消滅線の空間分布 [1]



図 2: ポジトロニウム生成時の陽電子散乱断面積 [3]









図 5: 原始ブラックホールの存在制限 [5]

#### 1.3 SMILE-2+での観測

SMILE-2+計画は、2018年にオーストラリアのア リススプリングスで行われた MeV ガンマ線観測の ための気球実験である。全単射望遠鏡による天体観 測に成功し、SMILE-2+が観測した銀河中心領域の ガンマ線エネルギースペクトルは COMPTEL や IN-TEGRAL と誤差の範囲で矛盾しなかった。有効面 積は 1 cm<sup>2</sup> で、検出可能エネルギー帯域は 0.15-2.1 MeV であった。



図 6: 軽い WIMP 対消滅によるガンマ線スペクトル [5]

### 2 SMILE-3 で求められる性能

SMILE-3とは科学観測を目的とした長時間気球実 験であり、銀河中心での電子陽電子対消滅線や銀河 面の<sup>26</sup>Al や<sup>60</sup>Fe などの観測することにより、その 観測されたエネルギースペクトルから陽電子と銀河 系内拡散 MeV ガンマ線の起源に制限を設けることが 目的である。これを達成するために SMILE-3 の検出 器に求めらる性能は SMILE-2+と比べて有効面積が 5-10 倍、角度分解能が 2-3 倍であり、検出可能なエ ネルギー帯域は 0.15-10 MeV である。

# 3 SMILE-3での改良

#### 3.1 TPC のガスの変更

TPC とは荷電粒子の飛跡情報を三次元的にとら えることのできるガス検出器である。Micro Pixel Chamber(µ-pic) と Gas Electron Multiplier(GEM) の二つのガス増幅器を用いることで電子の増幅・検出 を行っている。TPC に充填されているガスと入射ガ ンマ線がコンプトン散乱を起こし、その散乱電子を µ-pic と GEM の電極を用いて増幅させ飛跡を検出し ている。充填されているガスとの散乱断面積を増や すにはガスの電子数を増やせばよい。つまり、ガス の気圧をあげ、低元素分子ガスを用いることで有効 面積が上がる。

具体的な改良として、SMILE-2+では二気圧 の Ar(95%)CF<sub>4</sub>(3%)isoC<sub>4</sub>H<sub>1</sub>0 を使用していた。 SMILE-3 では三気圧の CF<sub>4</sub> の使用を考えている。 CF<sub>4</sub> は Ar(95%)CF<sub>4</sub>(3%)isoC<sub>4</sub>H<sub>1</sub>0 に比べて、コン プトン散乱断面積が大きく、光電効果の断面積が小 さくなる。このおかげでコンプトン散乱による有効 な検出数が増え、荷電粒子が起こす光電効果による ノイズが減る。しかし、コンプトン散乱の反応数が 増えるということはガス検出器内での放電量も増え、 電子基板に負荷がかかってしまう。SMILE-2+の時点 でこのガスを使わなかったのは電子基板の放電に対 する安定性を考慮してのものであったが、SMILE-3 では電子基板の材質をより安定なものに変えること で三気圧の CF<sub>4</sub> を充填できるようにする。



☑ 7: ETCC



図 8: 充填されたガスとガンマ線の散乱断面積



図 9: 有効面積

#### 3.2 triggerの変更

TPC に入ったガンマ線はコンプトン散乱をし、散 乱電子を TPC で散乱ガンマ線をシンチレータで検 出する。先にシンチレータにヒットがあり、電子の ドリフト時間分だけ遅れて TPC の信号が遅れて検 出される。Trigger の役割は両方でヒットしたデータ を取得することである。またデータを取得するたび に粒子の検出が止まってしまい、不感時間が生まれ てしまうのだが、この不感時間を減らすことで粒子 検出数を増やすことができる。

SMILE-2+ではデータを Commom-Start 型と呼ば れる方式で読み出していた。これはシンチレータに ヒットすると Trigger がかかり、TPC のヒットに関 係せずデータを取得してしまうのである。これはシ ンチレータへのヒットデータを一時的に保管できな いためにこのような方式を採用していた。

SMILE-3 では Common-Stop 型と呼ばれるデータ 読み出し方式を採用する予定である。シンチレータ へのヒットデータを一時的に保管することで、ある 一定期間に TPC とシンチレータ両方にヒットがあっ たときのみ Trigger をし、Trigger から遡ってデータ を取得することを可能にした。こうすることで必要 なデータのみを取得するため不感時間は減り、結果 として検出数が増える。



図 10: SMILE-2+で図 11: SMILE-3 で の Trigger(Common-の Trigger(Common-Stop)) Start)

### 3.3 SMILE-3 で期待される検出感度

### 4 まとめ

銀河中心領域で起源不明の電子陽電子対消滅線や 拡散 MeV ガンマ線が観測されている。SMILE-2+ でも過去の観測と誤差の範囲で矛盾なくこれらの放 射が観測されている。SMILE-3 ではより検出感度



図 12: 不感時間



図 13: 検出感度

と有効面積を上げることによって銀河中心に広がる 放射の起源に制限を設けたい。具体的な改良として TPC のガスを 3 気圧の CF4 にすることで有効面積 を上げる。Trigger 形式を Common-Start 型にする ことで不感時間を減らす。こうすることで期待され る SMILE-3 の性能は SMILE-2+と比べて検出感度 が約 10 倍 (1MeV)、有効面積も約 10 倍 (0.3MeV) で あり、検出可能なエネルギー帯域は 0.15-10 MeV と なっている。

### Reference

- [1] T.Siegert et al. 2016, A&A
- [2] E.Orland et al. 2019, BAAS
- [3] N.Pantzos et al. 2011, REVIEWS OF MODERN PHYSICS
- $[4]\,$  B. J. Carr et al. 2010
- [5] A.W. Strong et al. 2011

--index へ戻る

# 観測b18

X線観測衛星用井戸型シンチレータ技術を用いた医療 用高感度ガンマ線プローブの開発

# 清水 康行

# X 線観測衛星用井戸型シンチレータ技術を用いた 医療用高感度ガンマ線プローブの開発

清水 康行 (東京理科大学大学院 創域理工学研究科)

#### Abstract

我々は、宇宙 X 線ガンマ線観測用検出器の開発で培った宇宙観測技術をベースに、理学、工学、医学の研 究者が共同で、核医学分野での実用化を目的に、新しい高感度ガンマ線プローブを開発している。核医学分 野の検出器として要求される性能は、測定時間の短さや、測定対象外の臓器に貯留した薬剤からの放射線が バックグラウンドになることなど、これまでの X 線ガンマ線宇宙観測用の検出器に求められる性能とは異 なるものもある。核医学分野からの要求を満たすための検出器の更なる性能向上は宇宙観測のための技術の 進歩へとつながることが期待される。現在我々は、S/N 比向上のため、数 keV から数 100 keV に対して感 度とエネルギー分解能が高い CdTe 検出器を主検出器に、CsI(Tl) シンチレータと PMT(光電子増倍管)を シールド用検出器として採用した新型のアクティブシールド検出器の開発を進めており、本講演では新型の アクティブシールド検出器の開発状況と、性能向上に向けた今後の展望について報告する。

### 1 研究背景

1980 年代以降、日本における死因の一位はがんで ある。新しい治療方法として Radio-Theranostics が 研究されている。

Radio-Theranostics とは、がんの目印であるがん 抗原を特異的に認識する薬剤 (キャリア)を、殺細胞 効果の高い α/β 線放出核種で標識したものを治療薬 として用いる放射線内容療法であり、近年、新しい がんの治療法として注目されている。α/β 線放出核 種の多くは、組織透過性の高いガンマ線も放出する ため、薬剤の組織分布を画像化できるなど治療薬の 開発に有用である。しかし、これらの核種は、崩壊 による娘各種の混在、散乱線などの影響で、ノイズ 信号が多く存在する。正確な薬剤の定量や生体のイ メージングには、S/N 比を高めるために工夫が必要 である。

イメージ解析	医療用途 臓器毎の画像診断	宇宙観測 天体の識別
スペクトル解析	薬剤/核種 の定量	放射機構の解明
BG源	対象臓器以外に 貯留した薬剤 検出器由来の バックグラウンド	CXB:Cosmic Xray Background 対象天体以外の天体 NXB: Non Xray Background
S/N 比 向上	身体への負担軽減	暗い天体を見る

図 1: 医療用途と宇宙観測の比較

そこで我々は、S/N 比向上のため、宇宙観測技術 であるアクティブシールドを用いた、新しい検出器 を開発している。

# 2 検出器原理

井戸型アクティブシールド検出器は、主検出器と 主検出器を井戸型に囲むシールド用検出器からなる。 主検出器を井戸型に囲むことで、シールドとコリメー タを兼ねる。また、主検出器とシールド用検出器で 反動時計測を行うことで、検出器由来のバックグラ ウンドも取り除く。

本検出器で検出対象とする、10数 keV から 500 keV において、検出器とガンマ線との相互作用とし て主要なものは、光電吸収とコンプトン散乱である。 光電吸収は、ガンマ線が全エネルギーを検出器に落 とすことで、スペクトルのピークを作る。一方コン プトン散乱は散乱の後のエネルギーが

$$E_{\gamma_o} = \frac{E_{\gamma_i}}{1 + \frac{E_{\gamma_i}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \tag{1}$$

で表される。ここで、 $E_{\gamma_i}, E_{\gamma_o}$ は入射ガンマ線と散 乱ガンマ線のエネルギーを、 $m_e c^2$ は電子の静止質量 エネルギーを表す。(1)より、コンプトン散乱したガ



図 2: ガンマ線と検出器との相互作用

ンマ線が検出器に落とすエネルギーは

$$E = E_{\gamma_i} - \frac{E_{\gamma_i}}{1 + \frac{E_{\gamma_i}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$
(2)

となる。コンプトン散乱は、散乱する方向によって 落とすエネルギーが異なるため、スペクトルの連続 成分となる。アクティブシールド検出器では、主検 出器でコンプトン散乱したガンマ線をシールド検出 器によって検出し、後段回路で処理することで、主 検出器で光電吸収を起こしたイベントのみを取り出 し、連続成分を取り除く。

# 3 CsI(Tl) シンチレータ +PMT(光電子増倍管)を用 いたアクティブシールド検出器

試作機として、シールド用検出器に CsI(Tl) シン チレータと PMT を用いた井戸型アクティブシール ド、主検出器に CdTe を用いた検出器を製作した。本 検出器の目的は、アクティブシールドの原理検証で ある。

# 3.1 Geant4によるアクティブシールドの 厚さ決定のためのシミュレーション

試作機の製作にあたり、シールドの CsI(Tl) シンチ レータの厚さを最適化するため Geant4 を用いたモン テカルロシミュレーションを行った。シミュレーショ ンではシンチレータに対して、垂直にガンマ線を入 射した。シンチレータの厚さを 1 cm, 2 cm, 4 cm と 変えていき、それぞれの厚さに対して、80 keV, 150 keV, 300 keV, 400 keV, 450 keV, 500 keV, 600 keV のガンマ線をそれぞれ 10 万発打ち込み、CsI に落と したエネルギーが threshold(10 keV) を超えたもの の割合を計算した。



図 3: Geant4 シミュレーション結果

シミュレーション結果 (図 3) より、500 keV のエ ネルギーのガンマ線をシールド検出器を用いて 80 % 以上止めるには、CsI の厚さが、4 cm 以上必要であ ることがわかった。そこで、アクティブシールド用 として、4 cm×4 cm×10 cm の CsI シンチレータを 用意した。

#### 3.2 CsI+PMT 実験

CsI(Tl) と PMT の選定、及び性能評価のために 実験を行った。CsI(Tl)+PMT の検出器に、<sup>137</sup>Cs、 <sup>133</sup>Ba、<sup>22</sup>Na、<sup>57</sup>Coの放射線を当て、それぞれのピー ク (図 4) を用いてキャリブレーションし、FWHM と 低エネルギー側の threshold を求めた。実験結果より



図 4: CsI+PMT 実験に用いた線源のスペクトル 今回アクティブシールドとして用いる CsI(Tl)+PMT

の、FWHM@662 keV は 8.5 % から 9.5 %、threshold は 14 keV 以下であった。

#### 3.3 構成

本検出器は、図 5[左] のように CsI(tl) シンチレー タ+PMT を 3×3 に並べ、中心を下げることで井戸型 を作り、井戸型の底には、主検出器である CdTe を配 置した。遮光及び、検出器を支えるための治具は 3D プリンターを用いて試作機を完成させた。(図 5[右])



図 5: CsI+PMT(シールド検出器) と CdTe(主検出 器) の配置 [左] と治具 [右]



図 6: CsI(Tl) シンチレータ+PMT(光電子増倍管) を 用いたアクティブシールド検出器

#### 3.4 信号処理



図 7: 信号処理の流れ

PMT からの信号は Shaping Module で整形増幅 し、波高値が閾値を超えた時、Discriminator で矩形 波 (Veto 信号) を生成。一方、CdTe からの信号は増 幅・整形後、Veto 信号の出ていない場合に Aanalogto-Digital を行う。

# 4 今後の展望

今後は、完成した CsI と PMT を用いたアクティ ブシールド検出器で、検出器由来のバックグラウン ドの軽減 (Compton Suppression)の検証、及び、複 数線源を用いてシールド・コリメータ機能の確認を 予定している。



図 8: BGO Geant4 シミュレーション

また、BGO での Geant4 のシミュレーション結果 (図 8) により、500 keV を 80 % シールドするために 厚さ 1.75 cm 必要とわかった。今後は、更なる小型 化のために、BGO シンチレータと Si-PM を用いた アクチブシールド検出器の製作を予定している。



図 9: BGO と Si-PM を用いたアクティブシールド検 出器 (モデル)

2023 年度 第 53 回 天文·天体物理若手夏の学校

# Reference

T.Takahashi et.al. 1992 宇宙科学研究所報告

T.Takahashi et.al. 2007 PASJ

-----index へ戻る

観測 c01

# すばる望遠鏡で高解像度観測を実現するレーザート モグラフィー補償光学

# 一ノ瀬 将也

# すばる望遠鏡で高解像度観測を実現するレーザートモグラフィー補償光学

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という。レーザーガイド星を用いて補償光学を行うと、 コーン効果によって補償精度が落ちてしまう。コーン効果を低減し、補償光学の精度を上げるための解決策 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を使用するこ とで、コーン効果を低減する。さらにトモグラフィーの手法を用いて大気揺らぎを高さ方向に分解し、波面 測定の精度を向上させる。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 が行われている。LTAO が実装されると可視光領域まで補償光学を適用できるようになる。可視光領域にお ける高分解能面分光は、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を可能 にする。[1] 本講演では LTAO の原理、構造、および LTAO によって期待される結果について述べる。

### 1 Introduction

遠方宇宙での銀河の構造や形態進化などの観測や 面分光装置による銀河のガス運動・物理状態のマッピ ングを調べるためには、高空間分解能での観測が求 められる。しかし、地上望遠鏡での観測の場合、地 球大気によって星の像がぼやけてしまい、高空間分 解能で観測することができない。したがって地上か らの天体観測には補償光学が必須となる。

補償光学システムには、ガイド星が必要である。ガ イド星とは、大気揺らぎの影響による波面の乱れを モニタするために用いる点光源である。自然の星を ガイド星とした場合、要求される明るさとサイエン スターゲットまでの距離を考慮すると、全天の数% 程度しか補償光学システムを適用することができな い。この問題を解決するために、望遠鏡から空にレー ザーを照射し、人工のガイド星を作るという方法が ある。この方法で作られたガイド星をレーザーガイ ド星(LGS)という。LGSを使用することで、全天 の 90%程度の領域を補償光学システムを利用して観 測することができる。

LGS は有限の高さに作られるため、LGS から発せ られた光の光路は円錐状になる。一方でサイエンス ターゲットは無限遠に存在するため、その光路は円 筒状になる。したがって、1 つの LGS ではサイエン スターゲットの光路全てをカバーすることができず、 サイエンスターゲットが受ける大気揺らぎの影響全 てをモニタすることができない。これをコーン効果 (円錐効果)という。コーン効果の影響は短い波長域 に強く現れ、可視光領域で補償光学を行うことは難 しい。



図 1: コーン効果と Strehl Ratio の関係。SR > 0.2 で補償が効いていると判断される。従来の補償光学 の場合、可視光領域では SR < 0.2 であり、補償光学 が効いていない。しかし LTAO の場合、SR > 0.2 と なり補償光学が効いている。

ULTIMATE-START は、レーザートモグラフィー 補償光学(Laser Tomography Adaptive Optics: LTAO)によりコーン効果の影響を抑え、可視光領域 での補償光学を実現するプロジェクトである。LTAO ではサイエンスターゲットを取り囲むように4つの LGS を配置し、サイエンスターゲットから届く光の 経路をカバーする。4つのLGS からの光の波面4つ の波面センサーで測定し、大気揺らぎ層のトモグラ フィ推定を行うことでコーン効果を低減する。

# 2 Technical components to realized LTAO at Subaru Telescope

すばる望遠鏡で LTAO を実現するために必要な 3 つの要素を以下で述べる。

#### 2.1 New laser launching system

ガイド星の明るさが 11 等程度よりも明るいとき、 Srrehl Ratio は一定になるが、11 等よりも暗くなって しまうと、Strehl Ratio は減少してしまう。したがっ て、補償光学システムに用いるガイド星の明るさは 11 等よりも明るくなければならない。従来のすばる 望遠鏡のレーザーシステムで作られる LGS は 12 等 程度であり、ガイド星の明るさとしては不十分であ り、より明るいガイド星を作るためのレーザーシス テムが必要である。そこで 20W の高出力レーザーと 新たな伝送光学系をすばる望遠鏡に搭載した。新し いレーザーシステムから放出されるレーザーを4分 割して、LTAO に使用する 4 つの LGS を生成する。 LGS の明るさはおよそ 9.5 等であり、これは要求さ れる明るさを満たす。



図 2: laser launching system の進化とガイド星の明 るさの変化

# 2.2 Four Shack-Hartmann wavefront sensor

LTAO では、4 つの LGS からの光の波面を各 LGS に対応する 4 つの波面センサーで測定する。 ULTIMATE-START では、LTAO 実現のため 4 つ のシャックハルトマン波面センサー(SH-WFS)を 導入する。SH-WFS は、平面波が入射したときのス ポットの位置とサイエンスターゲットの光が入射し たときのスポットの位置のずれから、乱れた波面の 形状を推定する。

#### 2.3 New 3228 actuator DM

補償光学システムでは、可変形鏡(Deformable Mirror: DM)の形状を変化させることで、波面の乱 れを補正する。ULTIMATE-START では、すばる望 遠鏡に既に搭載されている補償光学システム AO188 の DM を使用する。しかし AO188 の DM では fitting error が大きく、波面誤差の合計は 170nm であ る。可視光領域で補償光学システムを適用するため には、波面誤差を 120nm 程度まで小さくしたい。波 面誤差は (1) で表される。

$$WFE[nm] = \sqrt{WFE_a^2 + WFE_b^2 + WFE_c^2 + \cdots}$$
(1)

(1) と図4より、波面誤差を小さくするためにはftting error を小さくする必要がある。DMの素子数を 増やすことで fitting error を小さくすることができ る。DMの素子数が64×64のとき波面誤差は120nm 程度になり、可視光領域でも補償光学を使用して観 測を行うことができる。



図 3: 波面誤差ごとの波長と Strehl Ratio の関係



図 4: DM の素子数と波面誤差の関係

2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

### **3** Expected result

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 5: LTAO の予想される結果

# Reference

- [1] 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"
- [2] 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"

--index へ戻る

# 観測 c02

# 機械学習による生体光イメージングの逆問題解析

# 近藤 謙成

# 機械学習による生体光イメージングの逆問題解析

近藤 謙成 (筑波大学大学院 数理物質科学研究群)

#### Abstract

本研究では、生体光イメージングの画像再構成を念頭に置いた機械学習の研究を行った。画像再構成とは、 生体内組織の空間的な分布を、その物理量に関係した別の物理量を頼りに数学的に推定する方法である。し かしながら、光の伝播は散乱が支配的であるため、光のシグナルから生体組織の情報を引き出すことは簡単 ではない。画像再構成のための逆問題解析は複数回の反復計算を必要とする手法が従来取られていた。そこ で本研究では画像再構成を反復計算のいらない機械学習を用いて研究を行った。

本研究で行ったことは主に、生体模擬物質の輻射輸送シミュレーション結果を用いた検証である。 生体模擬物質の輻射輸送シミュレーション結果を用いた機械学習では空間2次元上の9つの地点のいずれか に吸収体を配置し、8箇所の検出器で波形を測定したデータを用いて吸収体の位置を当てることを試みた。 実際の医療現場では生体内に検出器を置くことが難しいため生体表面側の検出機のデータのみを用いて機械 学習を行ったところ、ある程度の深さまでは吸収体の位置を予測することができた。今後の課題としては、 データ整形を適切に行う事で、機械学習の精度向上を目指し、同時に深さと予測精度の定量的な整理などを 目指す。

# 1 はじめに

画像再構成とは、生体内組織の空間的な分布を、そ の物理量 x に関係した別の物理量 y を頼りに数学的 に推定する方法である。一般的な医療診断の例とし てレントゲン画像診断と MRI 画像診断を考えると、 レントゲン写真は生体に X 線を当て、生体を投下し た光を「直接」撮影しているのに対し、MRI 写真は 計測データから断面図を「復元」するという方法を とっている。つまり MRI 画像診断は画像再構成にあ たる。また、光による生体イメージングは深部組織 の機能的・生理的・代謝的・分子的な状態を非侵襲 的に高感度かつ低コストで調べることができる手段 となっています。



図 1: レントゲン画像診断と MRI 画像診断

しかしながら、生体内で光の伝搬は散乱が支配的 であるため、光のシグナルから生体組織の情報を引 き出すことは簡単ではない。また、画像再構成のた めの逆問題解析は複数回の反復計算を必要とする方 法が従来取られていた。そこで本研究では画像再構 成を反復計算を必要としない機械学習を用いて研究 を行なった。

# 2 宇宙分野との関わり

銀河の分野でも SED やライマンα輝線を用いて、 機械学習を取り入れた銀河内の物理状態の解析など が行われている。例としてスペイン・カナリア天体 物理研究所の Francisco-Shu Kitaura さんたちと、大 阪大学の長峯健太郎さんたちの研究チームは共同で、 「Hydro-BAM」と呼ばれる新しいアルゴリズムを開 発した。これは統計学と機械学習を活用することで、 正確さを維持しながら計算コストの節約を実現した ものであり、Hydro-BAM を用いることでスーパー コンピューターで 10 万時間要し た計算結果が数秒 から数十秒で得られるという。また「ライマンαの 森」と呼ばれる パターンの再現にも成功している。 ライマンαは遠方天体が強く発する紫外線の輝線の ことで、地球へ到達する途中にある中性水素ガスに 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校

よって吸収される。このとき、宇宙膨張の影響でラ イマンαには赤方偏移が働くため、地球から個々の 中性水素ガス雲までの距離に応じて異なる波長が吸 収されることになる。一つ一つのガス雲が木のよう に遠方天体のスペクトルを隠した結果、森を通って きたように様々な波長で吸収が起こっているのがラ イマンαの森であり、銀河間物質の情報をもたらし てくれるものである。



図 2: 宇宙のダークマター、電離ガス、中性水素の分 布などの階層的分布を利用してライマンαの森の観 測データを再現する様子(提供:プレスリリース)

# 3 方法

本研究では、脳出血の診断を想定して行なってい る。脳出血とは何らかの原因で脳内にある細い動脈 が脳内出血する病気である。出血した血液はやがて 血腫となり、さらに時間が進むと脳にむくみが生じ る。この血腫やむくみが脳にさらにダメージを与え、 意識障害などといった症状が起きる。早期に発見す ることができれば、手術によって血腫を取り除いた り、血腫が大きくなることを防ぐ治療を受けること ができるため、後遺症などが軽傷で済む可能性が上 がる。現在脳出血の診断としては頭部 CT 検査と頭 部 MRI 検査の2つの方法が一般的にとられている。 それぞれの特徴として、頭部 CT 検査はわずかでは あるが X 線による放射線被曝があり、また発病まも ないと CT 検査に出血部とうが映らないということ がある。また頭部 MRI 検査は頭部 CT 検査よりも細 かく診断ができるが、検査に3040分と時間がかかっ てしまう。一般的にはこの2つの検査は併用される ことが多い。しかしながら、この2つの検査方法は ある程度発病確率が高いと判明した時に使用される ため、例えば軽度の頭部打撲があった際に、自覚症

状がないと診断がされず、後に症状が重大化する可 能性がある。そこで本研究では上記の検査に持って 行くべきか否かを早期判断できるような検査方法を 遠赤外線と機械学習を用いて開発することを目的と している。

画像診断の方法としては次のような装置を想定して いる。



図 3: 遠赤外線を用いた画像診断

入射位置から輻射パルスを照射し、がん細胞や出 血部(吸収体)で反射した輻射を検出器で検出する。 この吸収体の位置や大きさなどを変えたさまざまな パターンの検出波を機械学習に学習させ、ある波形 を与えた際にその波形から吸収体の位置予測をさせ るというものである。

本研究では図3のような装置を想定した輻射輸送 シミュレーショデータを用いて機械学習モデルを作 成し、出血部に該当する吸収体の位置予測を検証し た。装置は4cm×4cmの正方形であり、直径5mm、 吸収計数0.64/cm、散乱計数22.45/cmの吸収体を0 番から8番の9箇所のいずれかに配置した。。バック グラウンドの散乱係数は吸収体と同じであり、吸収 係数は0.21/cmである。検出器は生体表面に配置す ることを考慮し、D0~D3の4箇所に設置した。

学習データとしては異常箇所がある事で体表面で の時間分解波形が変化してその変化率の波形を学習 している。(図4参照)





図 5: 異常箇所があることによって波形が変化する

# 4 結果

図6は4箇所の検出器のデータを用いて機械学習 モデルを作成し、吸収体の位置予測を行った結果で ある。表の位置と吸収体の位置が対応している。例 えば左上のカラーマップは吸収体が0番にある時の 予測結果、中央のカラーマップは吸収体が4番にあ る時の予測結果である。

入射位置に近い位置 (0 番~2 番) に吸収体がある 時の位置予測は高い精度で行うことができいる。こ れに対し中央帯 (3 番~5 番) に吸収体があるときは5 割程度の精度でしか予測ができておらず、吸収体か ら遠い位置 (7 番~9 番) に吸収体があるときは精度 がかなり悪いという結果になった。



図 6: 作成した機械学習モデルによる位置予測結果

# 5 考察

近い位置では予測精度が高いが遠くなるにつれて 予測精度が悪くなってしまう原因として、検出器で 検出される波形データが吸収体が離れれば離れるほ ど変化率が小さくなってしまうことが考えられる。図 7は各吸収体位置で検出器が検出する波形データが、 吸収体がない状態の時に比べどれほど変化している かをグラフにまとめたものである。図6と同様グラ フの位置と吸収体の位置が対応している。



図 7: 検出波形の吸収体位置と検出器位置による変 化率

図で見てわかるように入射位置に対して離れるほ ど波形の変化率が小さくなっている。 2023 年度 第 53 回 天文·天体物理若手夏の学校

# 6 まとめ

今回の研究では9か所の吸収体の位置予測におい て表面付近は高い精度での予測を行うことができ、中 央帯(表面から約2cm)付近でも5割程度の精度で予 測することができた。実際の運用目的から表面から 2cmの予測が5割であっても、そこからCT検査や MRI検査に持って行くべきか否かの判断をする指標 としては決して悪くはない精度であると考えられる。 そこで今後の展望としては、吸収体の数や大きさを 変えた状態で機械学習を行うことによってどの深さ までの吸収体をどのくらいの精度で分類できるかの 検証を行い、定量的にまとめることと、検出器の数 や位置の変更、開口角を調整することによって脳出 血症例における最適な装置を考案を目的とする。 -index へ戻る

# 観測 c03

# 野辺山45m 望遠鏡に搭載した7beam 受信機での観測効 率向上を目指した電波分光計開発

# 藤巴 一航

# 45m 望遠鏡に搭載した 7beam 受信機での観測効率向上を目指した電波分 光計開発

藤巴 一航 (大阪公立大学大学院 理学研究科)

### Abstract

国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡は、星間空間における分子からの輝線を観測すること で、様々な研究を行ってきた。2022 年 8 月に、原始星形成極初期段階の分子雲コアから分子雲の全体の物理 的/化学的性質を明らかにすることなどを目的とし、重水素化合物を含む高密度トレーサーや、CO 同位体輝 線を観測可能な広帯域両偏波マルチビーム受信機 7 BEE(7BEam Equipment) が搭載された。しかしなが ら、45m 電波望遠鏡に現在搭載されている分光計は、帯域幅 2 GHz の分光計が 16 台であるため、7BEE 受 信機が観測可能な帯域全てを分光するには、20 回以上の周波数を切り替えた観測が必要である。そこで、観 測効率を向上させるために全ての帯域を受信できる分光計の開発に取り組んだ。今回、Xilinx 社の RFSoC 2x2 の使用を検討した。RFSoC 2x2 は、FPGA(Field Programmable Gate Array) 搭載を搭載しているた め量産に適していること、入力を 2ch 使用することで既存の分光計より帯域幅が 2 倍の 4 GHz になるとい う利点がある。本研究では、科学観測に向けた分光計におけるアナログ・デジタルコンバータ (ADC) の評 価実験を行った結果について述べる。

# 1 研究背景

45m 電波望遠鏡は、20 GHz 帯から 115 GHz 帯ま での観測周波数帯域が異なる複数台の受信機が搭載 されており、光学系の鏡を切り替えることでの目的 の周波数帯域の受信機を選択可能な仕組みとなって いる。例えば、FOREST は 80–116 GHz を観測可能 な 4 ビーム両偏波 2SB 受信機であり、100 GHz 帯の 高効率な観測に大きく貢献している (Minamidani et al. 2016)。一方で、シングルビーム受信機である T70 は 71.5–100 GHz を観測可能であり、45m 電波望遠鏡 に搭載されている受信機の内、唯一 70 GHz 帯を受信 できる受信機であったが、2022 年に現役を退いた。

T70 がカバーする周波数帯域には、水素分子個数 密度 10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup> cm<sup>-3</sup> 程度、温度 10 K 程度の分子雲コ アの物理的性質をよく反映する N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> 輝線の重水素 化合物である N<sub>2</sub>D<sup>+</sup> など、重要な輝線が存在する。 低温状態が長時間続くことにより重水素濃縮が進む ため、これら重水素および軽水素化合物の分子同士 の存在比を調べることで、分子雲コアの年代を推定 する方法が提案されている (e.g., Crapsi et al. 2005; Tatematsu et al. 2017)。原始星形成の極初期段階に 近い分子雲コアを特定し、その分子雲コアの角運動 量分布などの物理状態を知ることは星形成の初期状 態を明らかにすることに相当し、星形成の本質的な課 題に迫る上で重要な課題である。またそれら分子雲コ アは独立に存在することは基本的には稀であり、分子 雲複合体の中に存在することから薄いガスからどの ように星形成に直結する高密度領域が形成されるの かという課題に迫るためにも、FOREST 等でカバー されていた CO 同位体輝線の観測なども依然として 重要である。そこで、分子雲の密度 10<sup>2</sup>–10<sup>6</sup> 個/cm<sup>-3</sup> の高い空間・密度ダイナミックレンジを明らかにす るために、70–115 GHz 帯に存在する重水素化合物輝 線および CO 同位体輝線が観測可能なマルチビーム 受信機の開発を進めている。

# 2 新受信機について

本観測目標のうち、軽水素化合物と重水素化合物 の輝線強度は典型的に、輝度温度が0.1–1.0K程度と 非常に弱いため、シングルビーム受信機では長時間 の観測が必要であった。そこで、我々は7ビーム3帯 域両偏波受信機を新たに開発した。本受信機は、誘 電体レンズでビームを集光し、Horn で給電させた後 に、直行偏波分離機で偏波を分離し、2段の Cool Low Noise Amplifier(CLNA)で増幅される。ここまでが、 10Kの冷却系である。その後、常温系の3帯域分離

#### 2023年度第53回天文・天体物理若手夏の学校



図 1: 45m 鏡に搭載している (されていた) 受信機の 観測帯域とその帯域で観測可能な代表的な輝線。赤 で記載した N<sub>2</sub>D<sup>+</sup> と N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> は分子雲コアの原始星直 前直後の重水素濃縮度を測定する上で特に重要な分 子種の一つである。

フィルター (Triplexer) を用いて 72-82 GHz 帯 (EL Band)、86-105 GHz(EU Band)帯と109-116 GHz帯 (CO Band) に分離している。分離された信号は、そ れぞれ mixer によって周波数変換し、0-10 GHz の信 号として出力される (図 3)。EL Band の信号は EL Band 専用の前段 IF 系に出力され、EU, CO Band の信号は同軸スイッチで一方のみの信号が EU,CO Band 共有の前段 IF 系に出力される。前段 IF 系で は、さらに高周波の信号 (6-10 GHz) と低周波の信号 (0-5 GHz) に分離され、それぞれで強度調整、周波数 変換が行われた後に、分光計帯域である2-4GHzの 信号として出力され、同軸スイッチにより EL Band 専用の前段 IF 系からの信号か EU, CO Band 共有の 前段 IF 系からの信号かを切り替えて、後段 IF 系に出 力する。後段 IF 系では、Programble Attenuator で分光計の入力適切強度に強度調整した後、分光計 に入力する。



図 2:7BEE 受信機の CAD 図



図 3: 7BEE 受信機のブロックダイアグラム

本受信機は、2022 年夏に搭載され、コミッショニ ング観測を経て、科学観測に向けた試験観測を実施 している。2023 年度では、更なる試験観測を行い、 本格的な科学観測を実施する予定である。

# 3 観測効率向上を目指した電波分 光計開発

#### 3.1 電波分光計

電波分光計とは、受信機からきたアナログ信号 を ADC でデジタル信号へと変換し、Fast Fourier Transform(FFT) することで周波数ごとの強度を求 める装置である。



図 4: 分光計の役割

#### **3.2 RFSoC 2x2を用いた電波分光計開発**

45m 電波望遠鏡に現在搭載されている分光計は、 帯域幅 2GHz のものが 16 台ある。現在の設計では、 分光計帯域の制限により、1度の観測につき EL,EU または CO のいずれかの一つの周波数帯を選択して、 うそのうちの 2 GHz のみ観測する。Triplexer におい て分離されて出力される信号の総観測帯域は 39 GHz にも渡り、現在の観測システムでは、それら全ての 周波数を観測するために 20 回の観測を繰り返さなけ ればならない。そこで、観測効率を大幅に向上させ るためには、一度に分光できる周波数帯域を大きく する必要がある。



図 5: RFSoC 2x2

分光計台数の大幅な増設にあたり、我々は Xilnx 社 の提供する FPGA 評価ボード RFSoC 2x2 に着目し た。本評価ボードは、FFT 処理に必要とされる論理回 路をもつ Field Programmable Gate Array(FPGA) チップ上に、使用可能な ADC が 2 個内蔵されてお り、ADC と論理回路をつなぐ伝送経路の実装を必要 としない。

また、内蔵されている ADC の最大サンプリング 数が 4.096GSPS と、これまでの分光計帯域相当の 2GHz 相当の分光計の実現も期待できる。さらに、 2,419ドルの価格で市販されており、コスト的な面も 含めて量産化しやすいという点でも本評価ボードに よる分光計の実装を検討している。しかし、電波天文 観測で使用する分光計として、懸念すべき点が3つ 考えられる。1つ目は、ADCのノイズがどの程度存 在しているのかである。これは、ADCのノイズが大 きいときには、天体からの信号と判断できなくなって しまうからである。2つ目は、ADCを2個同時に使 用可能かである。ADC 2個を同時に使用した際に、 他方に信号が漏れてしまうと正しい結果が得られな いからである。3つ目は、計算処理をする FPGA の リソースが不足しないかという点である。これらの うち、本発表では ADC に関する評価の2項目につ いての結果を報告する。

### 4 測定結果

# 4.1 Spurious Free Dynamic Range(SFDR)の測定

ADC のノイズがどの程度存在しているのかを確認するために、入力信号と Spurious の最大値との

比である Spurious Free Dynamic Range を測定し た。測定方法は、Signal Generator と RFSoC 2x2 を SMA ケーブルで接続し、100 MHz-2 GHz を+7 Bm で 100 MHz ずつ出力し、RFSoC 2x2 の入力側の ADC で結果を読み取った。なお、入力波と反射波に よる定在波を防ぐために入力直前に+3 dBm の Attenuator を入れ、もう一方の ADC は終端している。 結果は図 7 のようになった。



図 6: SFDR の測定方法



図 7: SFDR の測定結果

SFDR の結果は 200 MHz から 1900 MHz において は 40dBFS と一定の SFDR であることが確認できた ため、分光帯域全体を通して、ADC のノイズが十分 に小さいことが確認できた。

#### 4.2 Cross Talk

ADC 2 個を同時に使用したときのもう一つの ADC の漏れこみ (Cross Talk) がないかを調査した。測定 方法は、SFDR の測定と同様に、Signal Generator と RFSoC 2x2 を SMA ケーブルで接続し、定在波を 防ぐために+3 dBm の Attenuator を入れ、もう一方 の ADC は終端している。その後、100 MHz-2 GHz を+7 dBm で 100 MHz ずつ出力し、RFSoC 2x2 の 終端側の ADC で結果を読み取った。結果は図 9 の ようになった。

Cross Talk はすべての周波数において、入力周波数 の強度との比が約 80 dB であったため、他方の ADC



図 8: Cross Talk の測定方法



図 9: Cross Talk の測定結果

への漏れ込みがほとんどなく、観測には十分影響が ない結果であると言える。

# 5 まとめと今後

原始星形成の極初期段階に近い分子雲コアの高密 度領域から分子雲の薄く広がった密度分布を明らか にするためには、重水素化合物や CO 同位体の観測 が必要であり、45m 電波望遠鏡に広帯域両偏波マル チビーム受信機 (7BEE) を搭載した。更なる観測効 率の向上を目的とした、受信機の帯域幅に合わせた 分光計の増設に取り組み、FPGA 評価ボード RFSoC 2x2 が科学観測に使用できるボードであるかを調査 した。ADC の評価実験の結果、スプリアスは入力信 号に比べて十分小さく、ADC を2 個同時に使用した 際の漏れ込みも科学観測に影響しない程度の大きさ であることがわかった。

今回測定に使用したソフトウェアは Xilinx 社が提 供しているものを使用したため、今後は我々独自で ADC を駆動できる回路を設計する予定である。それ が成功した後には、FFT のリソースも考慮に入れた 回路を設計し、科学観測を行うことができる分光計 を作成する。

### Reference

Minamidani et al, 2016, SPIE, 9914, 99141Z

Crapsi et al. 2005, ApJ, 619, 379.

Tatematu et al, 2017, ApJS, 228, 12

Chao Liu, Michael E. Jones, & Angela C. Taylor 2020, MNRAS, 501, 5096

坂口翼 2010, 大阪府立大学 理学部物理科学科 宇宙物理学 研究室 卒業論文

上月雄人 2014, 大阪府立大学 理学部物理科学科 宇宙物理 学研究室 卒業論文

相良岩男 2012, 日刊工業新聞社

中井直正, 坪井晶人, 福井康夫 2020, 日本評論社

-index へ戻る

観測 c04

時系列解析を用いた補償光学系における遅延誤差軽減 に関する性能評価

穂満 理生

# 時系列解析を用いた補償光学系における遅延誤差軽減に関する性能評価

穂満 理生 (東北大学大学院 理学研究科)

#### Abstract

補償光学系は一般的に波面センサで大気揺らぎを測定して可変形鏡で補正するという構造だが、大気揺らぎ の測定と補正の間には時間差があり、補償性能を下げる要因となっている。本研究では、多変数時系列解析モ デルにより、波面センサの過去の複数点における測定データと未来の時刻における測定データの間の関係を 仮定し、大気揺らぎが風で移動することを考慮した時系列予測を行うことで、測定と補正の間の時間差を高 精度に補償することを目指している。現在は補償光学シミュレーションコード OOMAO(Conan & Correia 2014)を用いて様々な設定における測定データを擬似的に作成し、予測性能に寄与する要素を調べている。ま た、すばる望遠鏡のレーザートモグラフィ補償光学系の開発を進めている ULTIMATE-START プロジェク ト (Akiyama et al. 2020)の一環で 2022 年 11 月に行われたシャックハルトマン波面センサーを用いた測定 実験のデータを用いた実際の測定データの解析も同時に進めている。本発表では、それらの状況について紹 介する。

### 1 導入

### 1.1 補償光学

補償光学 (Adaptive Optics; AO) とは、上空で生じ る大気乱流による屈折率の不均一性に起因した天体 から届く光の波面の揺らぎを波面センサ (Wavefront Sensor; WFS) により測り、可変形鏡 (Deformable Mirror; DM) により補正する技術である。一般的には 補償光学系は波面センサと可変形鏡に加え、補正後の 光を観測する機器、波面センサの観測データを受け取 って可変形鏡に与える信号を計算する制御システムで 構成される。現在、すばる望遠鏡においても、188素子 の可変形鏡が用いられた補償光学システム AO188 や 高コントラスト撮像に用いられる SCExAO(Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics) が稼働し ており、その他にも地表層の大気揺らぎのみを補正す ることで広視野な補正を可能とした地表層補償光学 (GLAO; Ground Layer Adaptive Optics)、複数の レーザーガイド星を用いて大気揺らぎを3次元的に 推定することで高精度な補正を可能とするレーザー トモグラフィ補償光学 (LTAO; Laser Tomography Adaptive Optics) を用いたシステムの開発が進んで いる。

#### 1.2 補償光学の誤差を生む要素

補償光学において性能を下げる要因は複数あるが、 主なものとしては可変形鏡の解像度の制限により波 面をfit する際に残差が生じてしまうことで生まれる fitting error、波面センサで波面を測定してから可変 形鏡の形状に反映されるまでの時間差により測定さ れた波面と補正すべき波面に差が生じることに起因 した誤差、波面を測定するために用いられるガイド 星とターゲット天体との位置の違いに起因した誤差、 波面センサの測定の際のノイズに起因した誤差が挙 げられる。これらを軽減するために様々なことが行わ れており、例えばすばる望遠鏡の AO188 に代わるシ ステムとして約 3000 素子の可変形鏡を用いた AO3K の開発が進んでいる。本研究においては、2番目に挙 げた波面センサの測定と可変形鏡の測定との間の遅 延に起因した誤差に着目し、これを時間変化を予測 して制御することにより軽減できるかどうか調べて いる。

# 2 手法

#### 2.1 時系列解析モデル

予測制御には線形の時系列解析モデルを用い、本研 究では特に複数変数の時系列解析モデルである VAR (Vector Autoregressive) モデルを用いる。VAR モデ ルは複数の変数が互いに影響を及ぼしながら時間変 化することを仮定した線形モデルで、例えば2変数 (*x*<sub>t</sub>, *y*<sub>t</sub>)を仮定し、2ステップ前までの値を参照する 場合は以下のような式となる。

 $\begin{cases} x_t = c_x + \phi_{xx,1}x_{t-1} + \phi_{xx,2}x_{t-2} + \phi_{xy,1}y_{t-1} + \phi_{xy,2}y_{t-2} \\ y_t = c_y + \phi_{yx,1}x_{t-1} + \phi_{yx,2}x_{t-2} + \phi_{yy,1}y_{t-1} + \phi_{yy,2}y_{t-2} \end{cases}$ (1)

この式を見ると、過去複数ステップの値と次のス テップの値との間の関係が定数項 *c<sub>i</sub>* と係数 *φ<sub>ij,k</sub>* に よって結ばれていることがわかる。実際の予測制御 においては訓練データを用いて上式における係数 *φ* を求めることが必要となるが、その訓練データには 直前の時刻の観測データを用いれば良い。そのため、 予測制御を用いた観測においては、時系列予測を適 用する前に訓練データを収集するステップが必要と なる。本研究においては、収集した訓練データから、 最小二乗法を用いて係数を決定している。

本研究では、32×32のシャックハルトマン型波面 センサの測定データのうち3×3の領域を用いる。複 数変数の時系列モデルを仮定することで、風に乗っ て大気が動く効果をモデルが拾うことができ、より 予測精度が向上することを期待する。

#### 2.2 予測精度評価

予測制御を適用しない場合に乗る遅延誤差は予測 計算を行うと予測の誤差へと変換されることになる が、予測性能を評価する際には両者の比率が重要と なる。そこで、本研究においては、1step 遅延を入れ た際に生じる誤差のばらつき(標準偏差)と予測計 算の誤差のばらつきの比(エラー軽減比)を評価す る。この比が1よりも小さい、つまり予測誤差が遅 延誤差を下回っていることが予測制御を効かせる上 では重要となる。

#### 2.3 使用するデータ

すばる望遠鏡に搭載する LTAO 装置を開発する ULTIMATE-START プロジェクト (Akiyama et al. 2020)の一環で 2022 年 11 月に行われたシャックハル トマン波面センサーを用いた測定実験のデータを今 回は用いる。合計で 3 つのターゲットを観測してお り、2 つは自然の星、1 つはレーザーガイド星となっ ている。

### 3 結果

3つの異なるターゲットに対する結果を以下に示す。 縦軸にエラー軽減比をとっており、横軸に毎ステッ プの時系列予測で使用する過去のデータの数をとっ ている。この図を見ると、エラー軽減比が80~90% を達成していることがわかる。つまり、遅延誤差を 10%から20%程度軽減できている。





図 1: 実際の観測データに対する解析結果

#### 4 議論

予測制御の性能に影響を与える要素としては以下 が考えられる。

### 4.1 波面センサの測定ノイズ

波面センサによる測定は、用いられるカメラに乗 るノイズに影響を受ける。これにより、時系列モデ ルを正確に推定することが難しくなると考えられる。

### 4.2 風の高さ方向のプロファイル

大気揺らぎは高さごとに異なった分布をしている が、風向きや風速も同様である。このような高さご とにばらついた分布が天体の光が届く際に上空から 地上に渡って積分されるため、時系列解析モデルが 大気揺らぎの移動の情報を拾うことを難しくしてい ると考えられる。

# 4.3 1フレーム中の大気の移動量と測定点 1つあたりのスケールの関係

時系列解析モデルを求めるための計算時間自体も 波面測定と波面補正の間の遅延に含まれるため短く する必要があり、現実的に時系列モデルに含むこと のできる過去の情報は限られる。そこで、大気の移 動をモデルが拾いやすい条件としては、1フレーム 中の大気の移動量が各測定点を望遠鏡開口に投影し た際の互いの距離と比べて十分に大きいことと言え る。つまり、補償光学系における波面測定のサンプ リング周波数、波面センサの解像度、風速といった パラメータが重要になると考えられる。

# 5 シミュレーションによる解析

上に述べた要素を調べるために、補償光学シミュ レーションコードである OOMAO(Object-Oriented, Matlab Adaptive Optics toolbox)(Conan & Correia 2014)を用いて観測当時の状況をシミュレーション し、各パラメータの値を変えた際の振る舞いについ て調べた。

#### 5.1 波面センサのノイズのない状況

まず、波面センサのノイズを除いた状況をシミュ レーションした。結果は下図のようになった。横軸は 毎ステップの時系列予測で使用する過去のデータの 数、縦軸にエラー軽減比をとっている。この図から は、ノイズのない理想的状況ではエラー軽減比 65% を達成していることがわかる。



図 2: ノイズの無い状況における予測精度

#### 5.2 波面センサの解像度

次に、波面センサの解像度(観測当時は 32 × 32) を最小で2×2まで下げた際の挙動について調べた。 結果は下図のようになった。これを見ると、32 × 32 の解像度の場合のみ過去 15 ステップ目までモデルに 入れた際にエラー軽減比が下がる挙動が確認されて いる。これは、波面センサの解像度を上げて測定点1 つあたりの望遠鏡開口におけるサイズを小さくする ことで、波面の移動を短いタイムスケールで見るこ とができるようになった結果と考えることができる。 すなわち、典型的には波面センサの解像度を 32 × 32 以上に上げることで複数変数における時系列解析モ デルの効力が発揮されると考えられる。また、大気 揺らぎの移動の情報を拾えていない解像度でも性能 に大きな差が生まれない挙動も確認された。



図 3: 波面センサの解像度別の予測精度

# 6 結論と今後の展望

今回、補償光学系における波面センサの測定デー タに対して時系列解析モデルを用いた予測制御を行 うことで、遅延に起因した誤差を軽減できるかどう か調べた結果、現実の観測データに対しては遅延誤 差の10%から20%を軽減できることが確認できた。 今後としては、これまでに行ってきた予測制御の性 能に寄与する要因に関したシミュレーションを用い た調査を継続し、各要素が具体的にどの程度寄与す るか定量的に評価することを当面の目標としている。 また、将来的には、線形の時系列解析モデルだけでな く機械学習を導入した際の性能も調べる予定である。

### Reference

- R. Conan and C. Correia "Object-oriented Matlab adaptive optics toolbox", Proc. SPIE 9148, Adaptive Optics Systems IV, 91486C (7 August 2014)
- Masayuki Akiyama, Yosuke Minowa, Yoshito Ono, et al., "ULTIMATE-START: Subaru tomography adaptive optics research experiment project overview", Proc. SPIE 11448, Adaptive Optics Systems VII, 1144810 (13 December 2020)