



赤外線位置天文観測衛星 JASMINEの プロジェクト進捗状況

2024年9月11日

鹿野良平, 郷田直輝(国立天文台), 片坐宏一(宇宙研/JAXA),
ほかJASMINE チーム

JASMINE計画の概要

■ 位置天文学(アストロメトリ)

- 赤外線による超高精度位置天文観測により、天の川銀河(銀河系)の中心核近傍の星の距離と運動を測定し、銀河系の中心核構造と形成史を明らかにする。惑星をもつ星の移動をも引き起こす銀河系構造の進化の過程を明らかにし、人類誕生にも関わる銀河系全体の形成史を探求する。
- この目的のために、**大気揺らぎの影響を受けない宇宙空間からの観測**で精度の高い測定を実現する。さまざまな種類の天体が密集している銀河系中心核領域の探査のために、**塵やガスによる吸収の影響を受けにくい近赤外線での観測**を行う。さらに観測装置の安定性とデータ解析の工夫により**数万分の1秒角という超高精度を達成する。**

■ 系外惑星探査

- **赤外線位置天文観測で達成される高精度な測光能力を活かした時間軸天文観測**により、中期M型星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星を探査する。

JASMINE衛星

- 口径36cm程度 超高安定望遠鏡
- 国産赤外線センサ (InGaAs)
 - 観測波長: 1.0-1.6 μ m、2k \times 2k画素 \times 4
- イプシロンSロケットによる打ち上げ
- 衛星重量600kg (wet) 程度
- 太陽同期軌道・高度550-600km以上、3年間観測

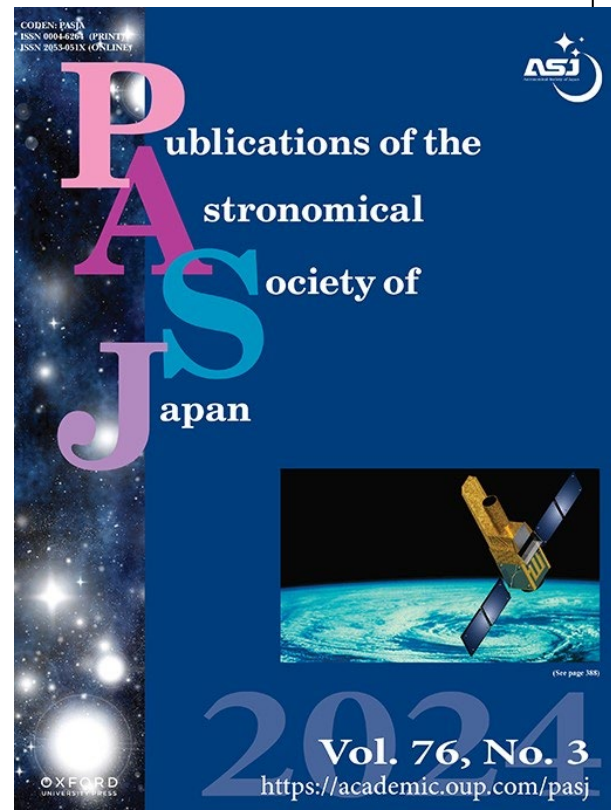
White Paper

- これまでの科学的検討の内容をまとめた
White PaperがPASJにて出版(2024/2 accept)

Kawata et al. (PASJ, 2024, Vol.76, pp.386-425)

<https://doi.org/10.1093/pasj/psae020>

- 著者数：89名（うち、31名が海外研究者）
- 位置天文関連 & 系外惑星関連の主な科学研究テーマや副次的・潜在的な科学研究テーマなどを網羅。



JASMINE: Near-infrared astrometry and time-series photometry science

Daisuke KAWATA^{1,2,*} Hajime KAWAHARA,^{3,4} Naoteru GOUDA,^{1,5} Nathan J. SECREST,⁶ Ryouhei KANO,^{1,3} Hirokazu KATAZA,^{1,3} Naoki ISOBE,³ Ryou OHSAWA,¹ Fumihiko USUI^{1,3}, Yoshiyuki YAMADA,⁷ Alister W. GRAHAM⁸, Alex R. PETTITT,⁹ Hideki ASADA,¹⁰ Junichi BABA,^{1,11} Kenji BEKKI,¹² Bryan N. DORLAND,⁶ Michiko FUJII⁴, Akihiko FUKUI^{1,3}, Kohei HATTORI^{1,14}, Teruyuki HIRANO¹⁵, Takafumi KAMIZUKA,¹⁶ Shingo KASHIMA,¹ Norita KAWANAKA,¹⁷ Yui KAWASHIMA,^{3,18} Sergei A. KLONER,¹⁹ Takanori KODAMA,²⁰ Naoki KOSHIMOTO,^{21,22} Takayuki KOTANI,^{5,15} Masayuki KUZUHARA,¹⁵ Stephen E. LEVINE,^{23,24} Steven R. MAJEWSKI,²⁵ Kento MASUDA^{1,26}, Noriyuki MATSUNAGA,⁴ Kohei MIYAKAWA,¹ Makoko MIYOSHI¹, Kumiko MORIHANA^{1,27}, Ryoichi NISHI,²⁸ Yuta NOTSU,^{29,30} Masashi OMIYA,¹⁵ Jason SANDERS^{1,31}, Ataru TANIKAWA^{1,32}, Masahiro TSUJIMOTO^{1,3}, Taihei YANO,¹ Masataka AIZAWA^{1,33}, Ko ARIMATSU^{1,34}, Michael BIERMANN,³⁵ Celine BOEHM,³⁶ Masashi CHIBA,³⁷ Victor P. DEBATTISTA^{1,38}, Ortwin GERHARD,³⁹ Masayuki HIRABAYASHI,¹ David HOBBS,⁴⁰ Bungo IKENOUE,¹ Hideyuki IZUMIURA,⁴¹ Carme JORDI,^{42,43,44} Naoki KOHARA,¹ Wolfgang LÖFFLER,³⁵ Xavier LURI,^{42,43,44} Ichiro MASE,¹ Andrea MIGLIO^{1,45,46}, Kazuhisa MITSUDA,¹ Trent NEWSWANDER,⁴⁷ Shogo NISHIYAMA,⁴⁸ Yoshiyuki OBUCHI,¹ Takafumi OOTSUBO,¹ Masami OUCHI,^{1,49,50} Masanobu OZAKI,¹ Michael PERRYMAN,⁵¹ Timo PRUSTI,⁵² Pau RAMOS^{1,53}, Justin I. READ^{1,53}, R. Michael RICH,⁵⁴ Ralph SCHÖNRICH^{1,55}, Minoru SHIKAUCHI,^{55,56} Risa SHIMIZU,¹ Yoshinori SUEMATSU,¹ Shotaro TADA,⁵ Aoi TAKAHASHI,¹⁵ Takayuki TATEKAWA,^{57,58} Daisuke TATSUMI,¹ Takuji TSUJIMOTO,¹ Toshihiro TSUZUKI,¹ Seitaro URAKAWA,⁵⁹ Fumihiko URAGUCHI,¹ Shin UTSUNOMIYA,¹ Vincent VAN EYLEN^{1,2}, Floor VAN LEEUWEN,⁶⁰ Takehiko WADA,¹ and Nicholas A. WALTON⁶⁰

¹ National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

² Mullard Space Science Laboratory, University College London, Holmbury St Mary, Dorking, Surrey RH5 6NT, UK

³ Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

⁴ Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

⁵ Astronomical Science Program, Graduate Institute for Advanced Studies, SOKENDAI, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-1855 Japan

⁶ US Naval Observatory, 3450 Massachusetts Ave NW, Washington, DC 20392-5420, USA

⁷ Department of Physics, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan

⁸ Centre for Astrophysics and Supercomputing, Swinburne University of Technology, Hawthorn, VIC 3122, Australia

⁹ Department of Physics and Astronomy, California State University, Sacramento, 6000 J Street, Sacramento, CA 95819-6041, USA

¹⁰ Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, Aomori 036-8561, Japan

¹¹ Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto, Kagoshima, Kagoshima 890-0065, Japan

¹² International Centre for Radio Astronomy Research, The University of Western Australia, 7 Fairway, Crawley, WA 6009, Australia

¹³ Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

¹⁴ Institute of Statistical Mathematics, 10-3 Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8562, Japan

¹⁵ Astrobiology Center, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

¹⁶ Institute of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

¹⁷ Center for Gravitational Physics and Quantum Information, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kitashirakawa-oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, Kyoto 606-8502, Japan

¹⁸ Cluster for Pioneering Research, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

¹⁹ Lohrmann Observatory, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Germany

²⁰ Earth-Life Institute (ELSI), Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8550, Japan

²¹ Code 667, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD 20771, USA

²² Department of Astronomy, University of Maryland, College Park, MD 20742, USA

²³ Lowell Observatory, 1400 W Mars Hill Rd, Flagstaff, AZ 86001, USA

Received: 2023 July 11; Accepted: 2024 February 27

© The Author(s) 2024. Published by Oxford University Press on behalf of the Astronomical Society of Japan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Science Goals & Science Objectives

Science Goals	Science Objectives: SO
我々が住む銀河系の形成と進化の探究 —— とともに ——	SO1：【銀河系中心核構造の探究】 恒星の距離と運動を測定することにより、銀河系形成の鍵を握る銀河系中心核構造を探究する。
生命居住可能領域に存在する地球に似た系外惑星の探究	SO2：【地球型系外惑星の探査】 将来の生命探査に有望な恒星に対し、生命居住可能領域に存在し、大気観測を行うことのできる地球型系外惑星の有無を明らかにする。

科学目標S01：銀河系中心核構造の探究

(1) 銀河系中心核ディスク(NSD)の解明

- ▶ 形成時期 (←ミラ型変光星)
 - **バー構造の形成時期**
- ▶ 軌道構造 (→重力場ポテンシャル)
- ▶ 内部バー構造の存在？
 - **中心巨大ブラックホールの成長**
- ▶ NSD内での場所毎の星形成史

(2) 中心核楕円構造の解明

- ▶ 古典的バルジ or 巨大BH落下による“熱的緩和状態” or ?
 - **銀河系初期進化**

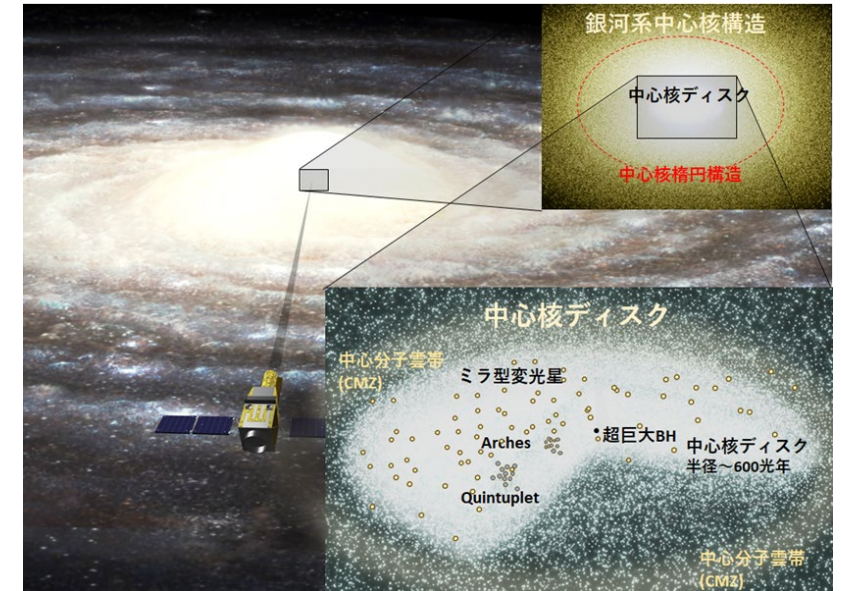
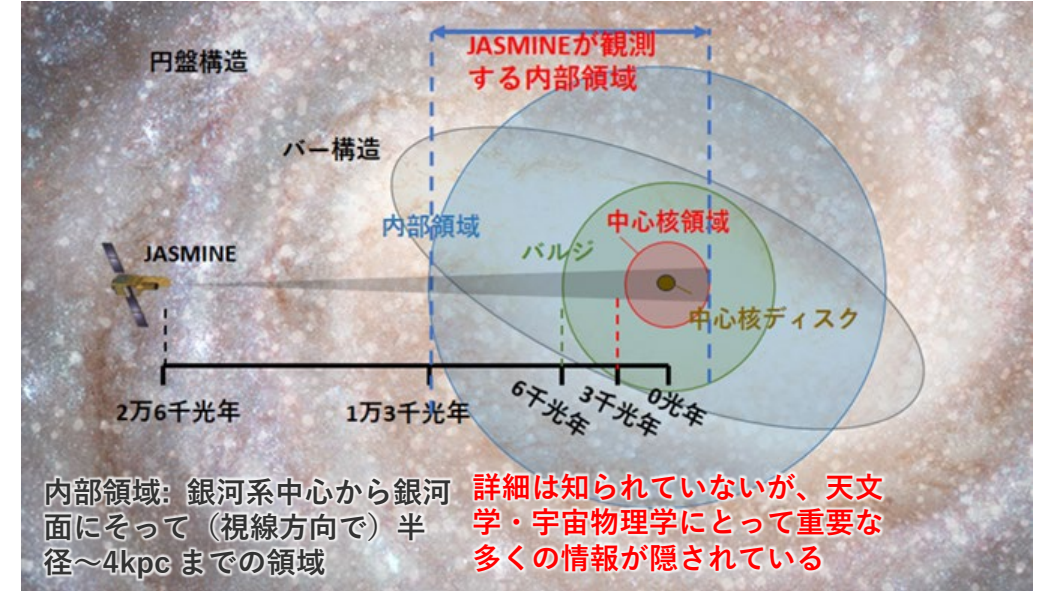
その他：

- ・ 内部領域内でのバルジ・バー・(内部)円盤など、各種構造の探究
- ・ 中心核領域 & 内部領域内での、宇宙解明の鍵を握る天体の探査

天文学・宇宙物理学の
多岐に亘る分野に関わる

- ▶ ダークマター探究
- ▶ X線連星系探究
- ▶ 磁場構造探究

ブラックホール探査
星団の探査



科学目標SO2：地球型系外惑星の探査

▶ 生命探査における第一ステップ

大小さまざまな恒星の**生命居住可能領域**に位置する大気観測が可能な惑星の発見

∵系外惑星に直接探査機を送ることは困難。天文学的に大気観測を行い、大気中の生命の痕跡(バイオシグニチャー)や環境を知る

▶ 分光観測が可能な惑星を発見が重要

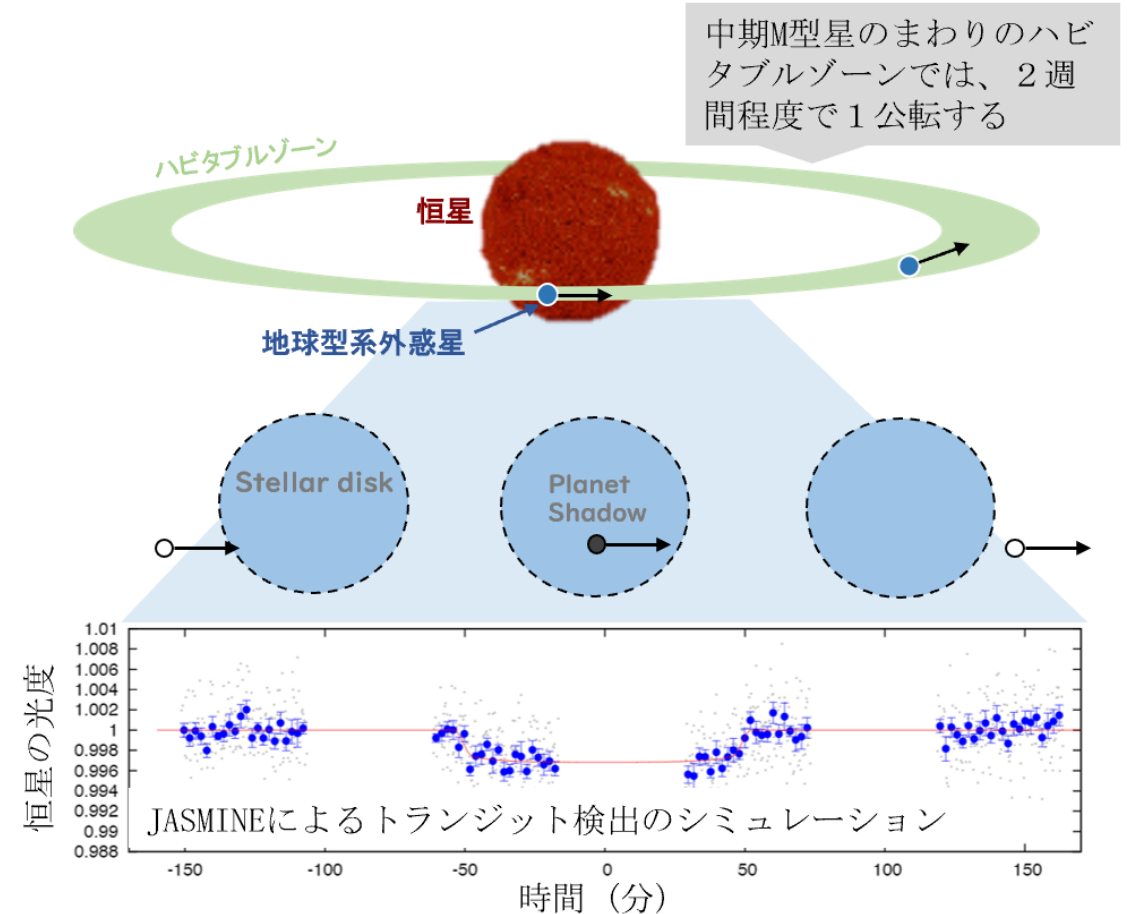
1. 星から分離して惑星を観測する「直接撮像惑星」

技術は未実証⇒NASAのフラグシップミッションとして2040年代以降の実現に向けた模索が始まった

2. 惑星が恒星の前面を通過する「トランジット惑星」

当面のターゲット

トランジット惑星の探査と発見は、惑星大気分光観測という**生命の探査の第二ステップ**につながるために非常に重要



Science Investigations

アウトプット目標 と ミッション要求

SO1 :
銀河系
中心核構造
の探究

実施する研究(アウトプット目標) :

- 銀河系中心核領域の方向において、
位置天文データカタログとして作成し公開すること。

観測データ性能への要求事項(ミッション要求) :

- MR-I** : $-1.4^\circ < \text{銀経 } l < +0.7^\circ$ & $-0.6^\circ < \text{銀緯 } b < +0.6^\circ$ の観測領域 (右図の青領域)での位置天文観測。
- MR-II** : 観測領域内の中心核構造にある2400個以上の恒星に対し、**年周視差を精度 $40\mu\text{as}$ (マイクロ秒角)以下***で測定。
- MR-III** : 観測領域内の中心核構造にある45000個以上の恒星に対し、**固有運動を精度 $125\mu\text{as}/\text{y}$ (マイクロ秒角/年)以下***で測定。

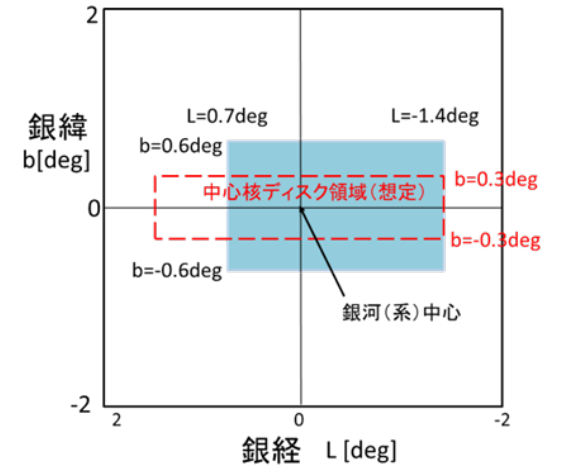
SO2 :
地球型
系外惑星
の探査

実施する研究(アウトプット目標) :

- 中期M型星の測光観測を行い、**時系列測光データを公開すること。**

観測データ性能への要求事項(ミッション要求) :

- MR-IV** : トランジット惑星が検出されている**17個以上の中期M型星**に対し、観測の総期間が14ヶ月以上で、**減光が0.3%以下の現象**を検出できる時系列測光観測を行う。

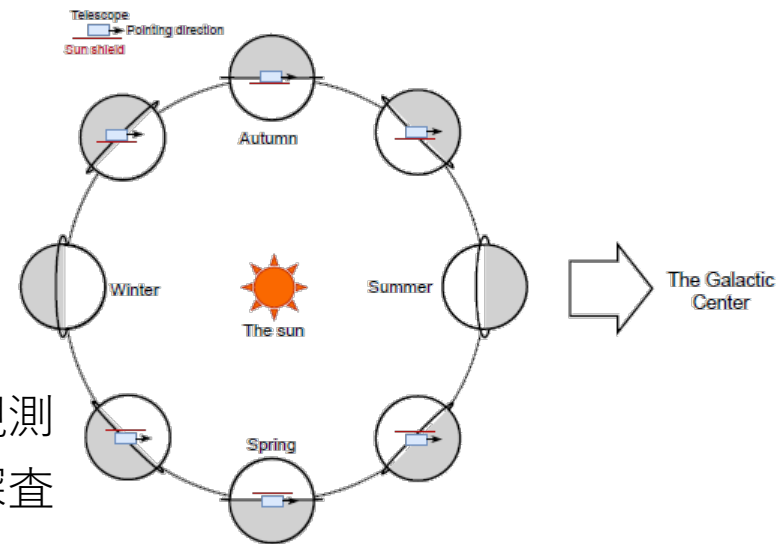
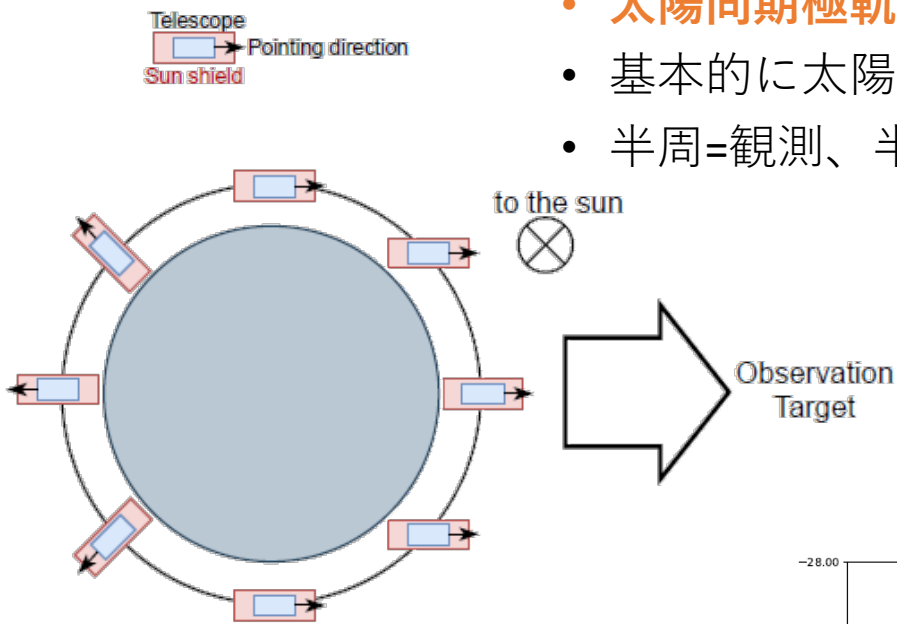


* :
エクストラサクセスで
 $25\mu\text{as}$ & $25\mu\text{as}/\text{y}$ と想定。

“精度”は標準偏差を表す

観測運用

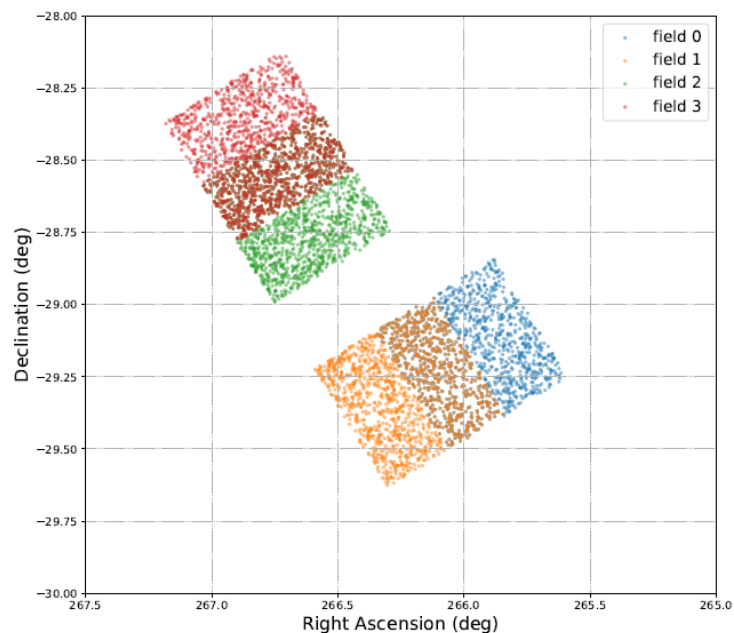
- 太陽同期極軌道を周回
- 基本的に太陽は側面照射
- 半周=観測、半周=地球回避



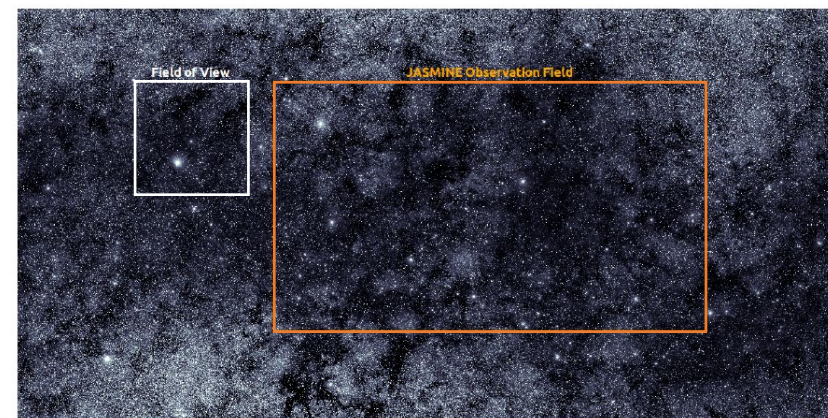
基本としては、

- 春秋：位置天文観測
- 夏冬：系外惑星探査

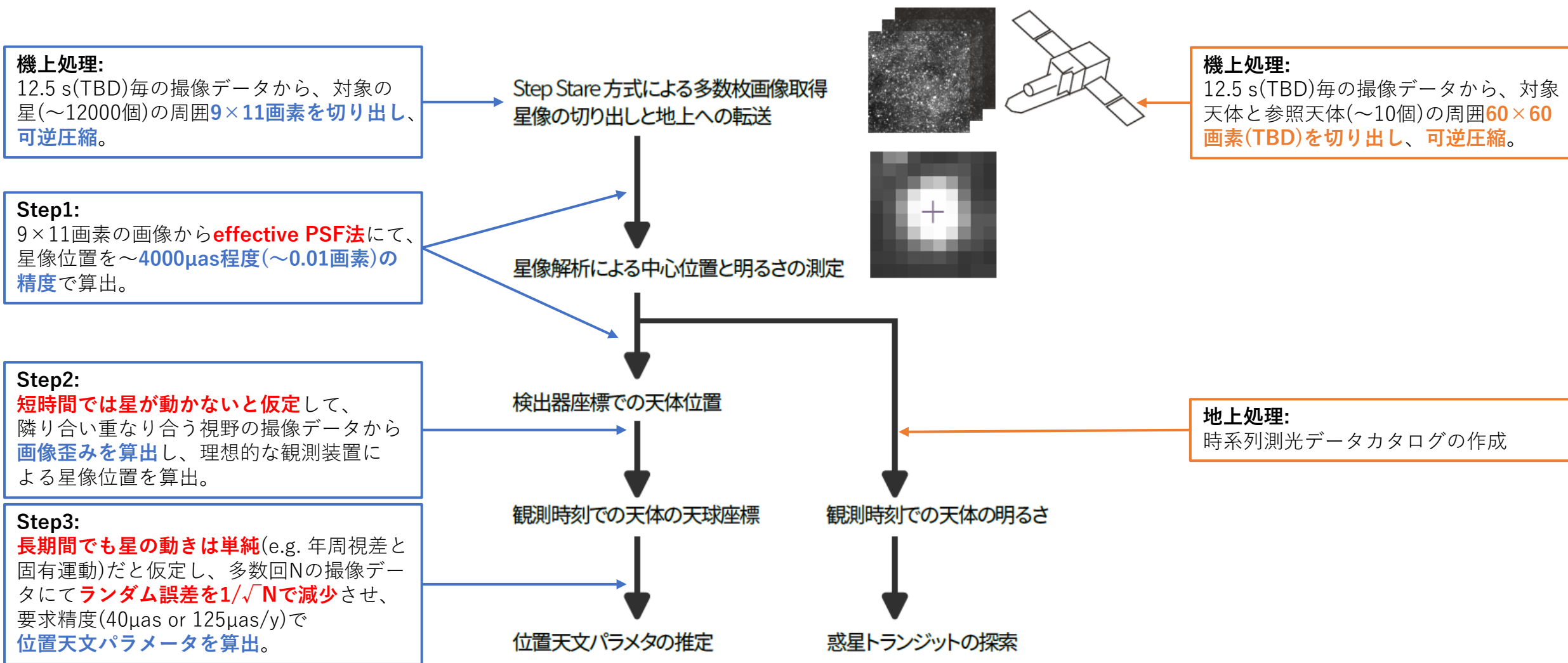
- 視野は銀経銀緯に沿わせる
- 半周中に4つの指向方向を観測 (<1日で観測領域をカバー)
- 画像歪み補正のため、銀緯方向・銀経方向に重ねる



(参) 観測領域と視野サイズ



データ解析

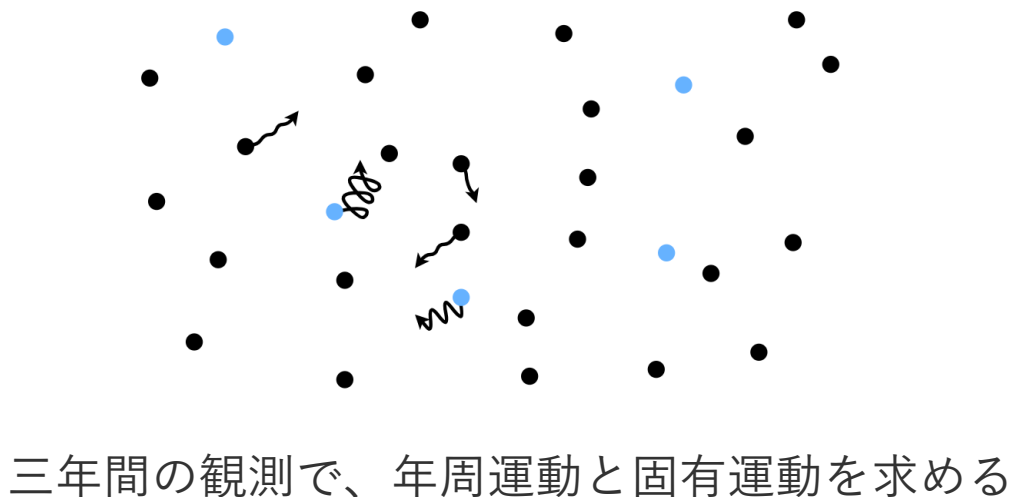


V206a 大澤
解析手法&シミュレーション

V210b 山田
相対論効果検討

V211b 矢野
実証実験計画

位置天文パラメータの推定



シミュレーションから
40 μ asの年周運動
125 μ asの固有運動が測定可能

Ohsawa et al. (2024, SPIE)

V206a 大澤
解析手法&シミュレーション

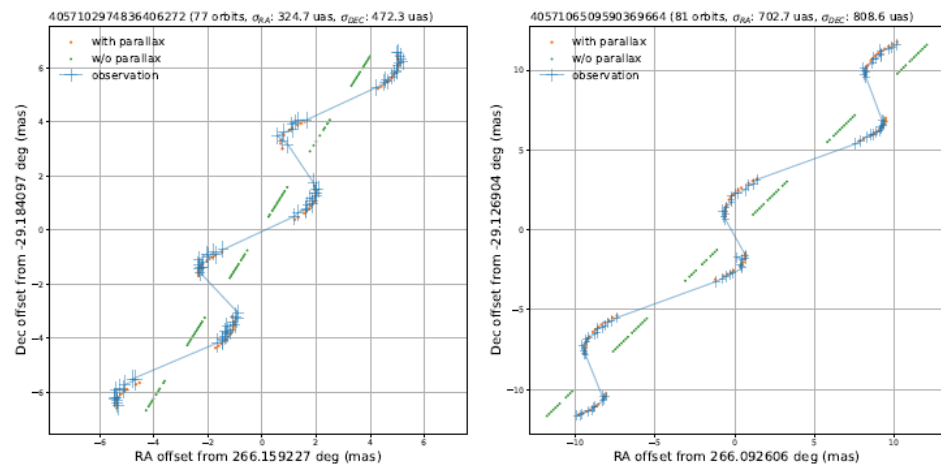


Figure 3.50: 天球面上での参照の解析結果。青が推定された座標で 1σ のエラーバーとともに示している。緑は国際天文基準座標系 ICRS での星の位置で固有運動を示し、オレンジは、固有運動に加えて年周視差を与えた時の星の位置で、これらは真値としてシミュレーションの入力にしたもの。

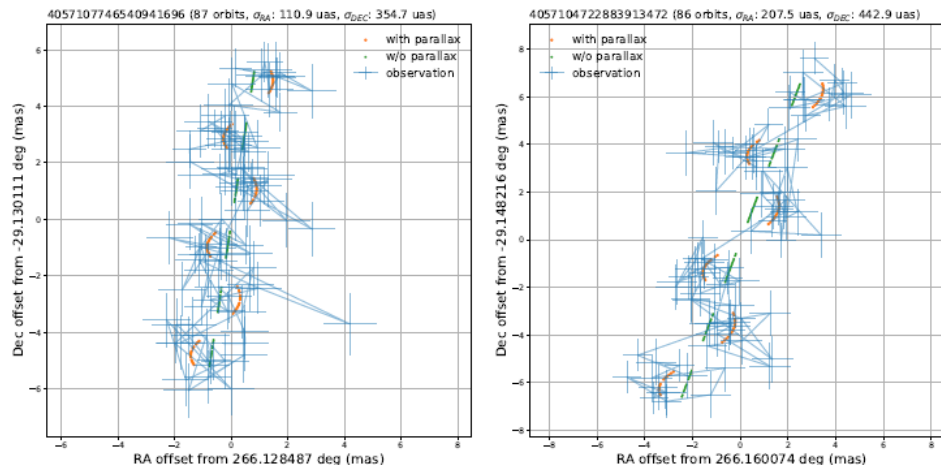


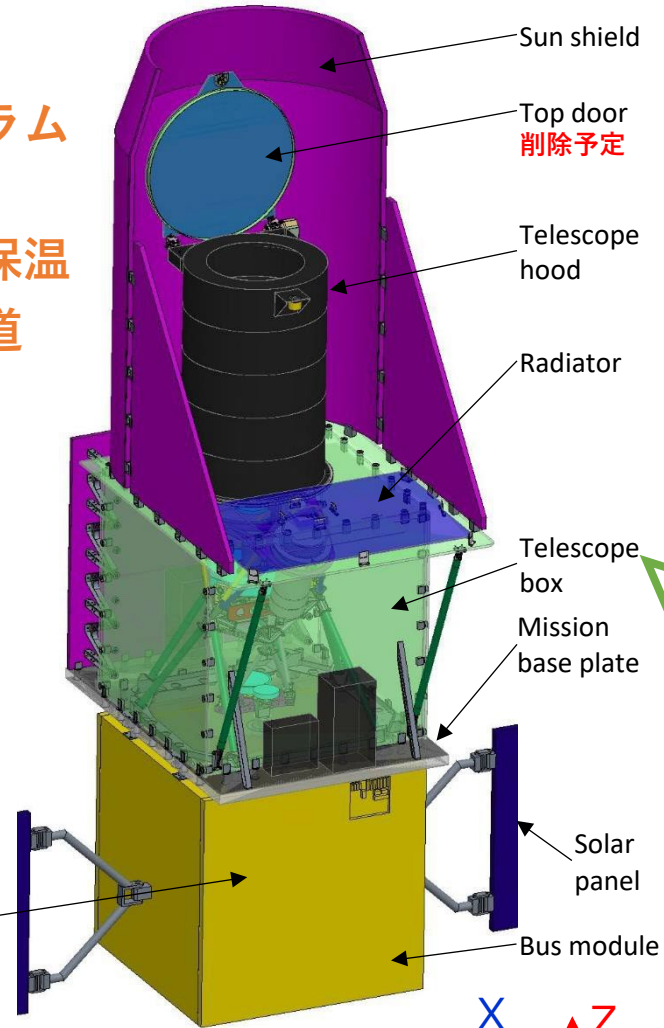
Figure 3.51: 銀河系中心領域内天体の天球面上での解析結果。青が推定された座標で 1σ のエラーバーとともに示している。緑は国際天文基準座標系 ICRS での星の位置で固有運動を示し、オレンジは、固有運動に加えて年周視差を与えた時の星の位置で、これらは真値としてシミュレーションの入力にしたもの。

観測装置：望遠鏡

高性能・高安定な望遠鏡の開発

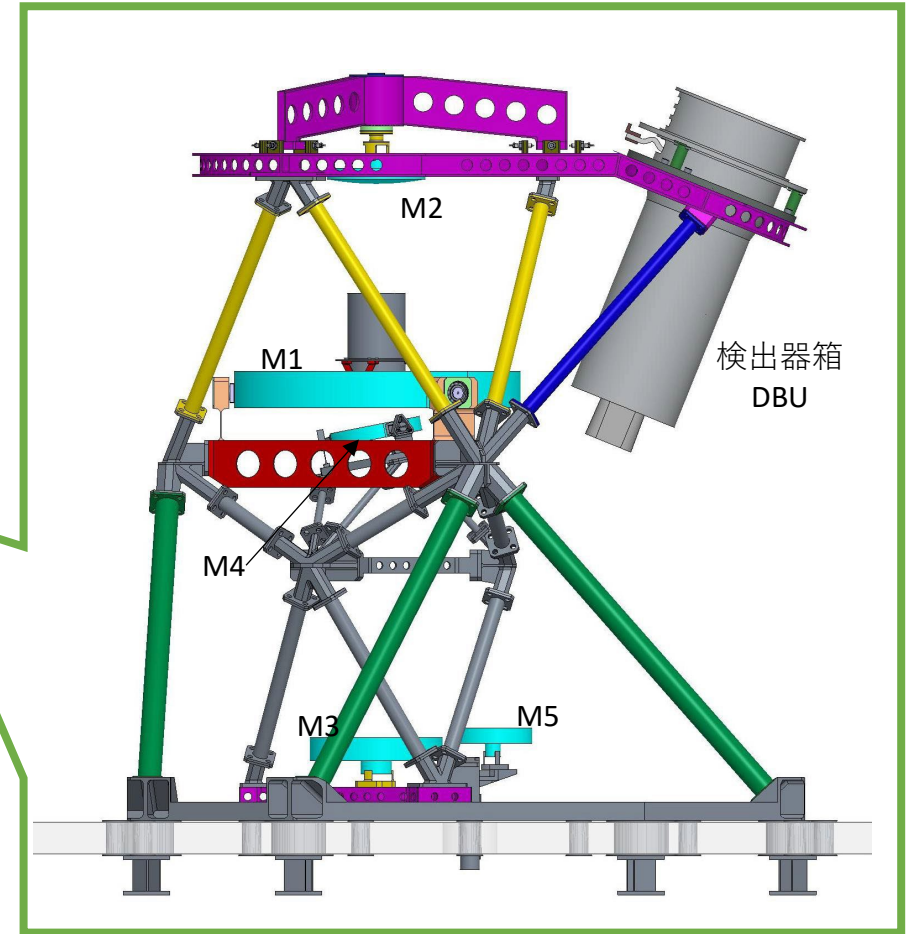
- 像面湾曲の無い**コルシュ光学系**
- ゼロ熱膨張材の使用：**クリアセラム**の鏡と**低温ゼロインバー**の構造
- 望遠鏡ケースによる一定温度に**保温**
- 熱環境が安定する**太陽同期極軌道**

光学系	コルシュ光学系
口径	36 cmφ
焦点距離	4.37 m
視野	0.55° × 0.55°
波面精度	Strehl ratio ≥ 0.9 @波長1.3 μm



衛星バス

- 小型標準バスを使用
- 先行するプロジェクトと極力類似を想定



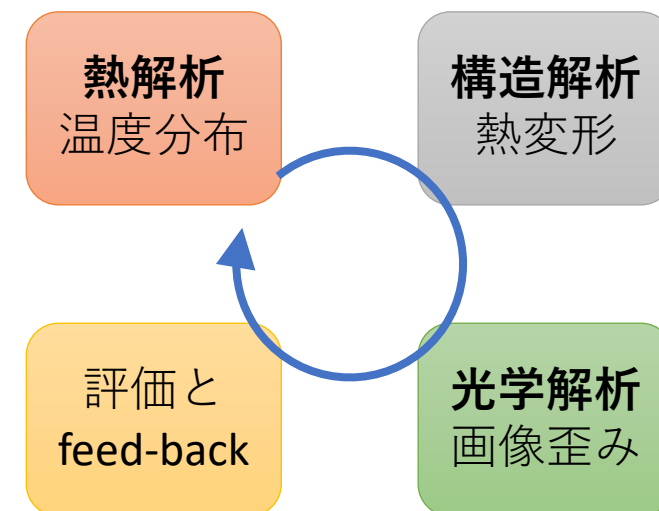
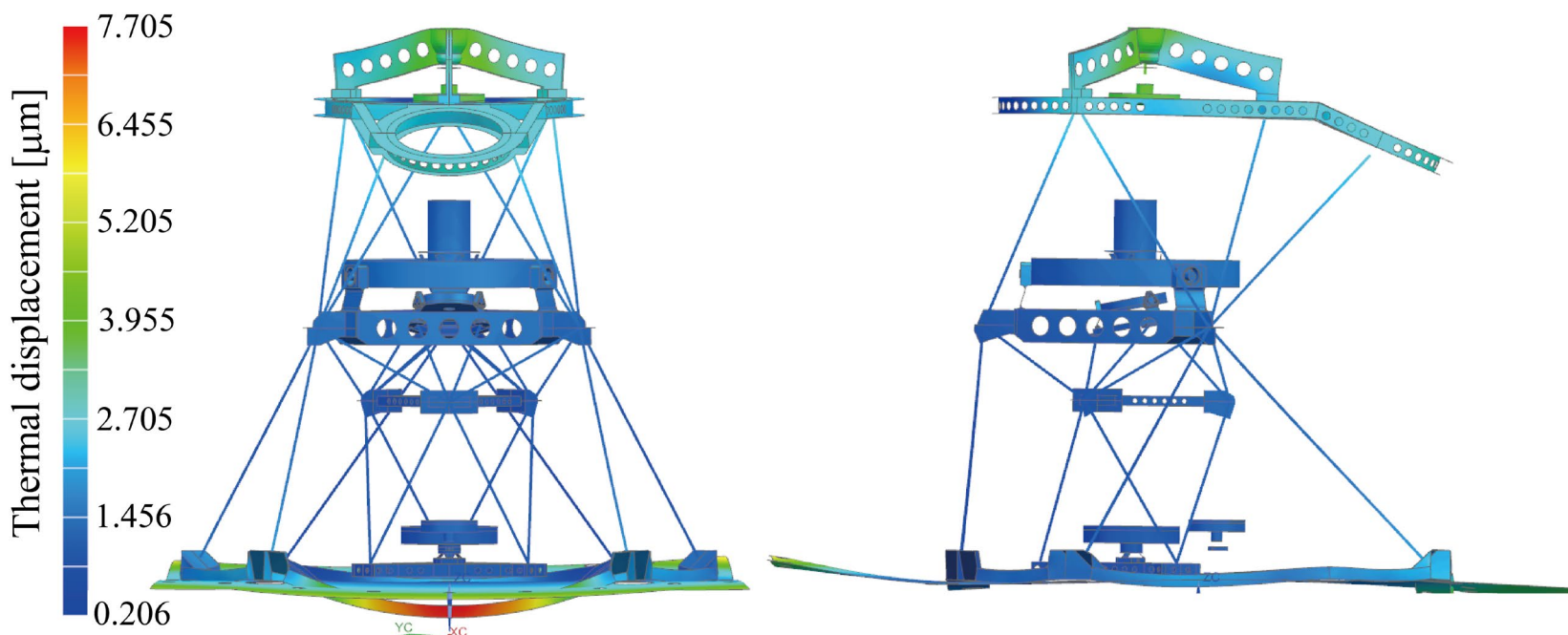
STOP解析

V209a 磯部
STOP解析検討

Isobe et al. (2024, SPIE)

- 組立調整時と軌道運用時との温度環境差、および、軌道周回中の温度環境変化による熱変形で、光学特性（特に画像歪み）に与える影響の評価が重要。
- Structure Thermal , and Optical Performance 解析(STOP解析)を実施中。
- この性能を打ち上げ前に検証する方法を、合わせて検討中。

例： 20℃からの熱変形量(軌道周回中の主鏡高温時)

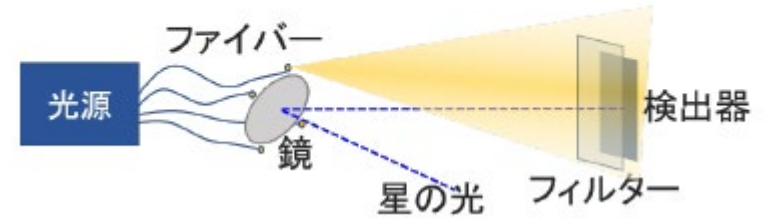
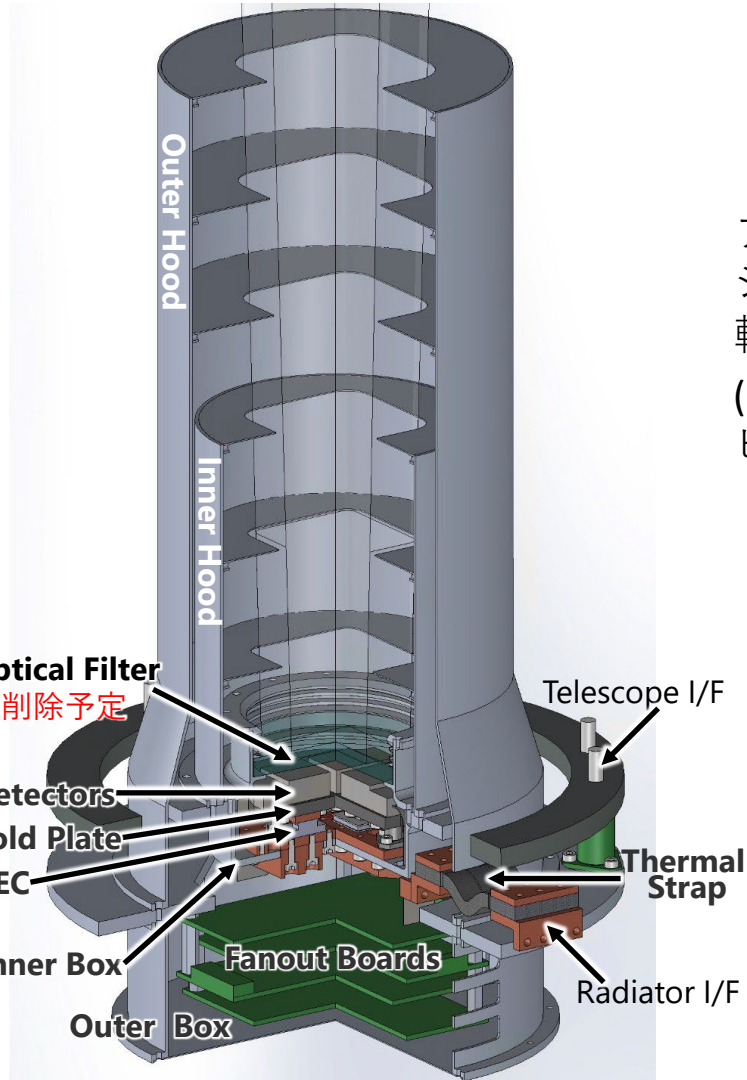
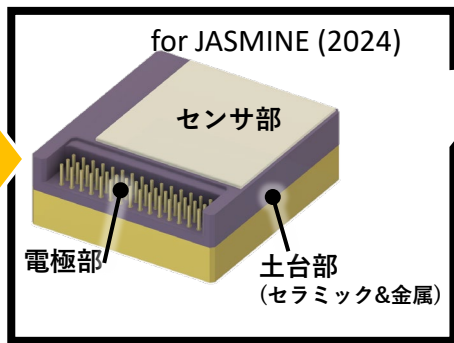
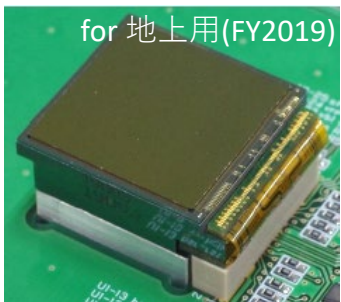


観測装置： 検出器

検出器	InGaAsハイブリッド CMOSセンサー × 4素子
画素	10 μmピッチ(～0.5秒角相当), 1952 × 1952画素/素子
観測波長	1.0～1.6 μm
撮像頻度	12.5 s (TBD)

国立天文台と浜ホトが開発した地上観測用 InGaAs赤外線撮像センサーを、ISAS技術のフロントローディングで衛星搭載用に改良中

- **大フォーマット化**：1.6M→4M画素へ
- **InP基板除去**で放射線でのノイズ(蛍光)の低減
- より**耐放射線性**の高い回路構成
- **可視光除去機能追加予定**



フラット補正のため、M5鏡近傍にシングルモードファイバー(SMF)による校正光源を設置予定
(地上試験では2本のSMFの干渉で、ピクセル位置ズレなどを測定予定)

- 2重構造での断熱構造と2段階の無振動な検出器冷却系
- **ラジエータ**で200Kまで冷却
 - **ペルチェ素子**でさらに173Kに冷却

v207a 宮川
一次試作評価状況

Miyakawa et al. (2024, SPIE)

大まかなスケジュール

2024/7	MDR本審査会実施 → MDR終了
FY2031ころ	打ち上げ(MDRでチームが提示したスケジュール)
～2035ころ	運用期間：ノミナル4年(初期運用～1年を含む)
～2040ころ	カタログ作成：運用終了後max.5年程度

科学成果は観測後、随時創出することを想定

- **位置天文観測：**
項目や精度は限定されるが**カタログの段階的リリース**を想定。
銀河系中心の観測データも適宜公開することを考えている。
- **系外惑星探査：**
有効なデータが得られたら**適宜連携観測への対応**を想定。

他のプロジェクトとの関係

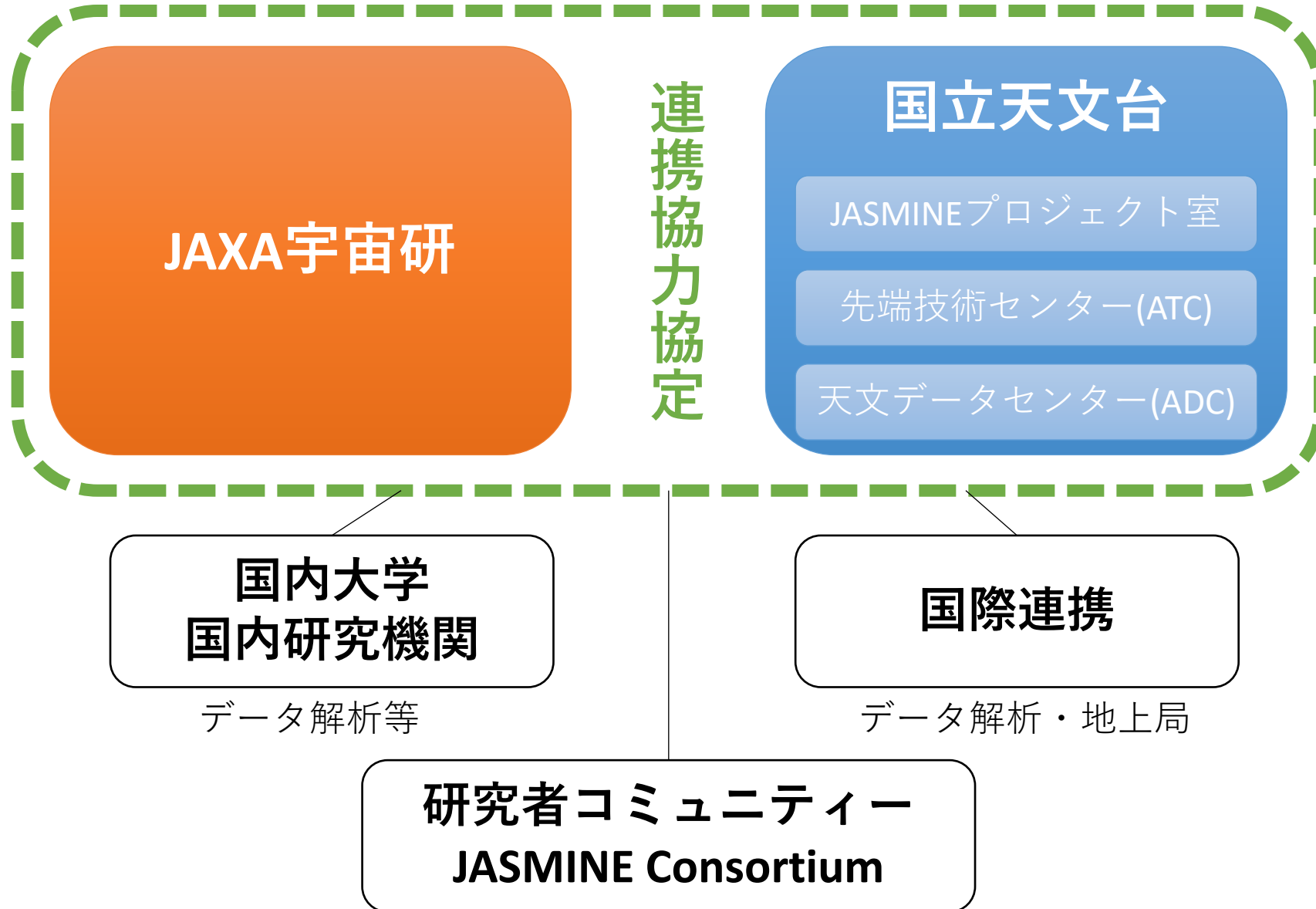
位置天文観測

- **Gaia** :
最終データリリース(2030年ころ)からあまり遅れることないデータ提供が研究活性化に有意義。
- **Roman宇宙望遠鏡(2027~)** :
相補的な観測戦略上、同時期の観測が可能であることが望ましい。
- **GaiaNIR(2050?)** :
銀河系中心の位置天文観測として、科学的・技術的な継承を期待。
- **PRIME** :
銀河系中心領域のミラ型変光星をJASMINEに先行して多数同定されると期待。

系外惑星探査

- **JWSTやArielなど2030年までの大型宇宙望遠鏡** :
追観測のため、JASMINEを2030年台早期に打上げる緊急性。
- **Roman宇宙望遠鏡(2027~)** :
観測対象の系外惑星の大きさや中心星からの距離において相補的な関係。

プロジェクト実施体制



JASMINE共同科学研究事業 @国立天文台(～2024年度)

JASMINEの位置天文観測データを用いた銀河系中心領域に関わる科学研究に向けた準備研究の推進。

FY2024採択課題：

「JASMINE 観測領域に存在するミラ型変光星の研究」

PI: 松永氏(東大)

→ 特任研究員の公募中：2024/10/25 15:00JST ✕ 切