

JASMINE

JASMINE : Japan Astrometry Satellite Mission for Infrared Exploration

郷田直輝（国立天文台JASMINEプロジェクト）

JASMINEチーム

- ・概要・状況
- ・コミュニティとの連携と将来のミッションへ



JAXA





1. ミッションコンセプト

JASMINE: Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration 超高精度位置天文観測およびトランジット法による系外惑星探索

- 口径40cm程度 超高安定望遠鏡
- 国産赤外線検出器(InGaAs)
 - 観測波長: 1.1-1.6 μm 、2k \times 2k画素 \times 4(TBD)
- イプシロンSロケットによる打ち上げ(2028年予定)
(JAXA宇宙研の公募型小型計画3号機)
- 衛星重量550kg (wet) 程度
- 太陽同期軌道・高度560km以上、3年間観測

★JASMINEの大目的である位置天文学(アストロメトリ):

- 恒星の動きを正確→恒星までの距離や運動(位置天文パラメータ)を決定。観測天文学の基礎となる手段。
- 精度の高い測定→大気揺らぎの影響を受けない宇宙軌道上で観測。
- さまざまな種類の天体が密集している銀河中心バルジ方向の探査
 - 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。
- 観測装置の安定性とデータ解析の工夫により超高精度を達成
 - 3年間の軌道上運用によって10万個におよぶ恒星を観測。最高精度25マイクロ秒角の位置天文パラメータを決定。
 - 銀河中心考古学→天の川銀河が誕生以降、どのような変化を遂げて現在の姿に至ったか、その中で太陽系がどのような経路を辿ってきたか、という人類誕生にも関わる謎を紐解く手がかりを得る。

★JASMINEのもう1つの大目的:トランジット観測による中期M型星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星探査を行う。

- 生命が存在する可能性がある惑星候補を見つける。

Gaia



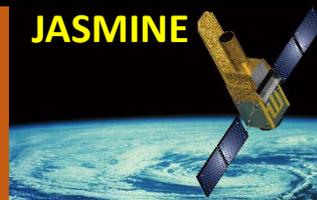
- ・太陽系近傍
- ・広域のハロー星
- ・バルジ/バー構造の上層部
- ・銀河円盤上層部

相補的

Gaiaでは測定困難な領域あり!

- ・中心核バルジ
- ・中心近くの銀河円盤
- ・星間ガスに覆われた星形成領域

JASMINE



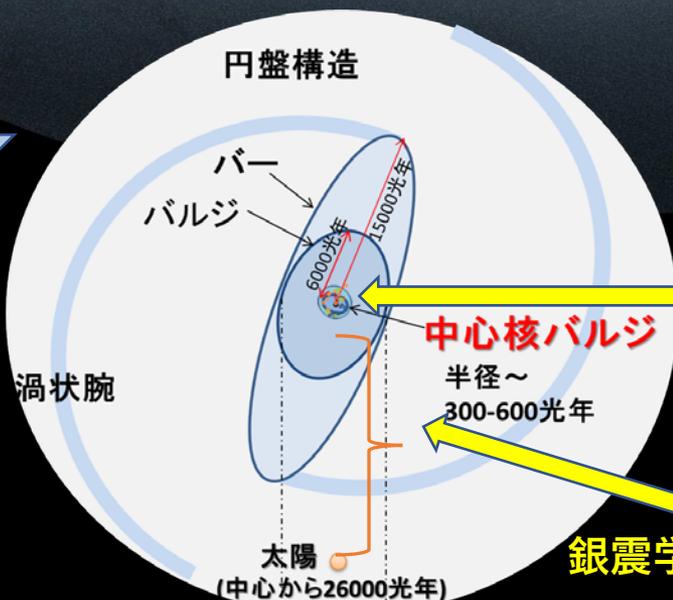
- ・全天サーベイ
- ・3回目公開(2020.12)の中間データでは、約15億個の星の位置天文情報。年周視差精度は明るい星で20~30μas

JASMINEのユニーク性!

画期的!天の川銀河研究の大革命が起きている!!

中心核バルジは“歴史の宝庫”様々な年齢をもつ星が年代に応じて、異なった空間構造と系統的な運動分布をして今も存在している。

1. ハローの構造・形成史(銀河考古学)
2. 太陽系近傍や反中心方向の銀河円盤の速度構造
3. バー構造のサイズ・回転速度



銀河中心考古学

1. 中心核バルジの構造 (天の川銀河誕生時の構造の痕跡?)
2. 中心核バルジ内の円盤構造の形成時期
→バー構造の形成時期を決定
→太陽系が銀河内部から移動してきた軌跡の解明に重要な情報
→地球誕生や人類の誕生にも影響
3. 超巨大ブラックホールの質量成長
4. 内部円盤の振動 BH探査、ULDM、星団探究、etc.

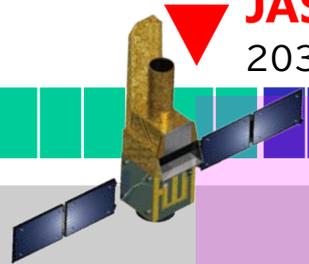
銀震学

高頻度長時間モニター可能

中心方向以外:低質量星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星探査

赤外線位置天文観測衛星「JASMINE」 世界的位置付け（他のプロジェクトとの連携）

JASMINE(運用:2028-2031)



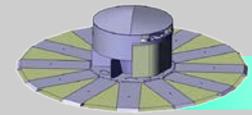
位置天文観測

- 銀河系サーベイデータが出揃う2020年代に、世界的にユニークな高精度位置天文観測による銀河中心領域の基礎データを提供する。
- 多波長での分光観測等を行う地上観測とは相補的な関係にある。連携により成果を最大限にする。
- JASMINEの成果はESAの将来計画であるGaiaNIRへと繋がる。

Gaia Final Full Data Release: 2028(?)

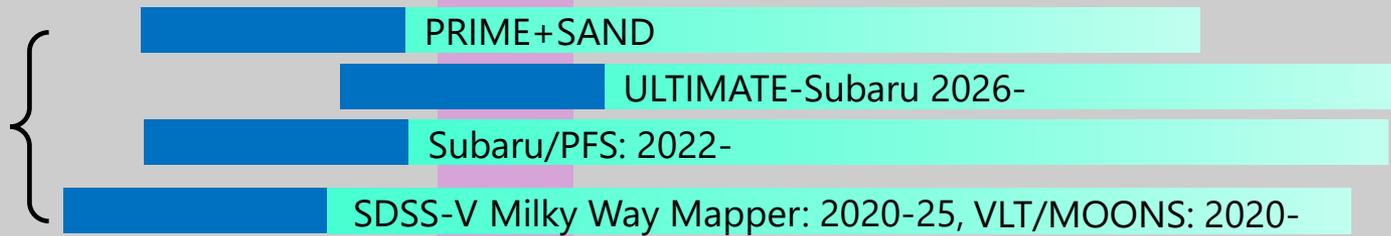


Gaia: 2013-25(?)



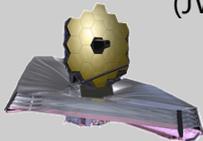
GaiaNIR: 2045(?)-

地上観測とのシナジー
(可視光・赤外線)



系外惑星探査

- JASMINEで発見した地球型惑星に対して宇宙望遠鏡 (JWST、WSO-UV、ARIEL)による大気観測へつなげる

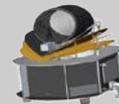


JWST: 2021-2031(?)

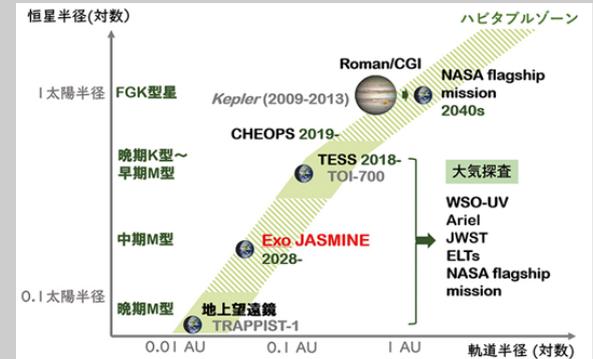
ARIEL: 2028-2032(?)



WSO-UV: 2025(?)-???



ハビタブルゾーンにある地球型惑星の発見個数を増やす
→水、海洋、酸素等のバイオマーカーの検出可能性がある
サンプル数の拡大



■ JASMINEのアウトプット

(プロジェクトチームとしてのアウトプット目標)

1. 銀河中心バルジ方向において観測した星の天球面上の位置変動の時系列データおよびそこから導出される星の年周視差、固有運動等をカタログとして作成し、世界の研究者へ恒久的に公開する。 *** 世界同時公開**
2. 系外惑星探査を目的としたターゲット天体の時系列測光データを提供する。

1. 銀河系中心のプロジェクトサーベイ(春・秋期)カタログ

銀河系中心核バルジ方向の領域サーベイ 春と秋に観測

- *領域1 => 中心核バルジ全体(半径~100pc程度に相当)
- *領域2 => 中心核ディスクに沿った一部 *** 変更を検討中**

9等級<H_W(1.1~1.6μm)<14.5等級の星(TBD)をダウンロード

$$*H_w \sim 0.78J + 0.22H - 0.03(J-H)^2$$

約10万個の星を地上にダウンロード

*** 何十回かに1回の割合で全画面もダウンロード(見込み)**

年周視差精度: 25マイクロ秒角~125マイクロ秒角

(25μ秒角 => 銀河中心での距離の誤差が20%に相当)

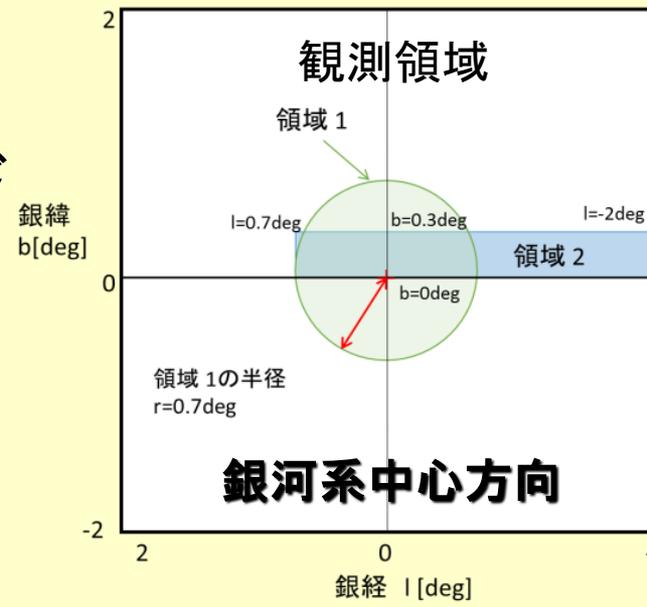
固有運動精度: 25マイクロ秒角/年~125マイクロ秒角/年

(銀河中心での接線速度の誤差が1km/s~5km/s)

2. 銀河系中心以外の特定天体観測(夏・冬期)

○中期M型星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星探査(測光データの時系列)

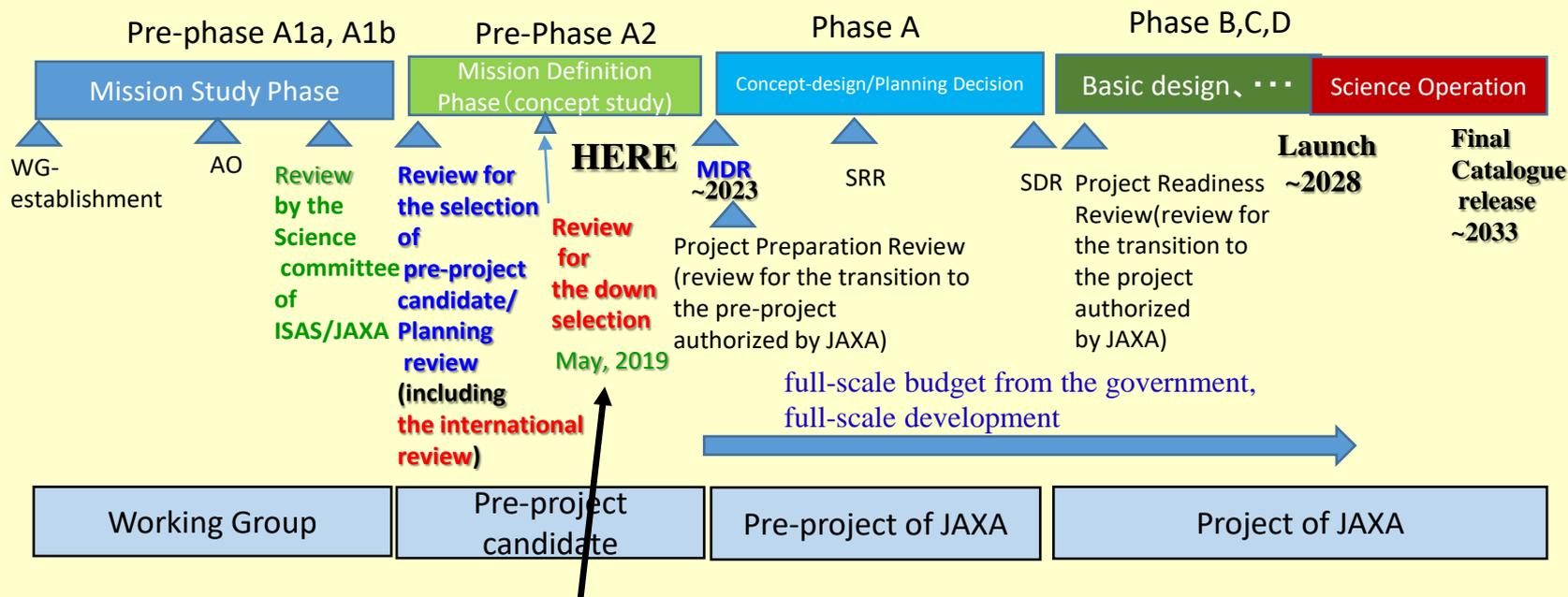
○その他(JASMINEコンソーシアムで議論)



2. JASMINEの経緯

1. 2009年1月 小型JASMINEのWG設置がISASで承認（中型から移行）
2. 2014年2月 公募型小型計画へ応募（ミッション提案） → SLIMが選ばれる
3. 2016年1月 公募型小型計画へ応募（ミッション提案）
4. 2016年2月～2017年4月 複数の審査会(当時のMDRとΔMDR)
5. 2017年5月 公募型小型計画候補として宇宙理学委員会から推薦
6. 2017年12月 **国際審査**
7. 2018年7月～8月 ISASプリプロジェクト候補選定審査/計画審査
8. 2018年11月 ISASプリプロジェクト候補チーム設置
9. 2019年5月 Pre-Phase A2終了審査（現在のダウンセクション審査）
ISASのプリプロ候補選定(**公募型小型3号機に選定**)
→選定を踏まえ、同年12月 宇宙基本計画工程表記載
10. 2020年4月 NASA MoO落選(JASMINEの米国チームが申請)
→NASAが「MoOを国際協力ミッションには使わない」という方針変換。
→NASA提供を予定していた赤外線検出器の代替案を検討開始
11. 2020年7月 国立天文台が持つ技術を活用した国産InGaAs検出器の検討着手
12. 2021年7月 NASA撤退を踏まえた再構築した開発計画をISASとして確認。

3. 開発段階と審査過程(JAXA)



ISAS/JAXA selected (Small-)JASMINE as the unique candidate for the 3rd M-class science satellite mission in May 2019!!

★宇宙基本計画工程表(令和3年度改定)

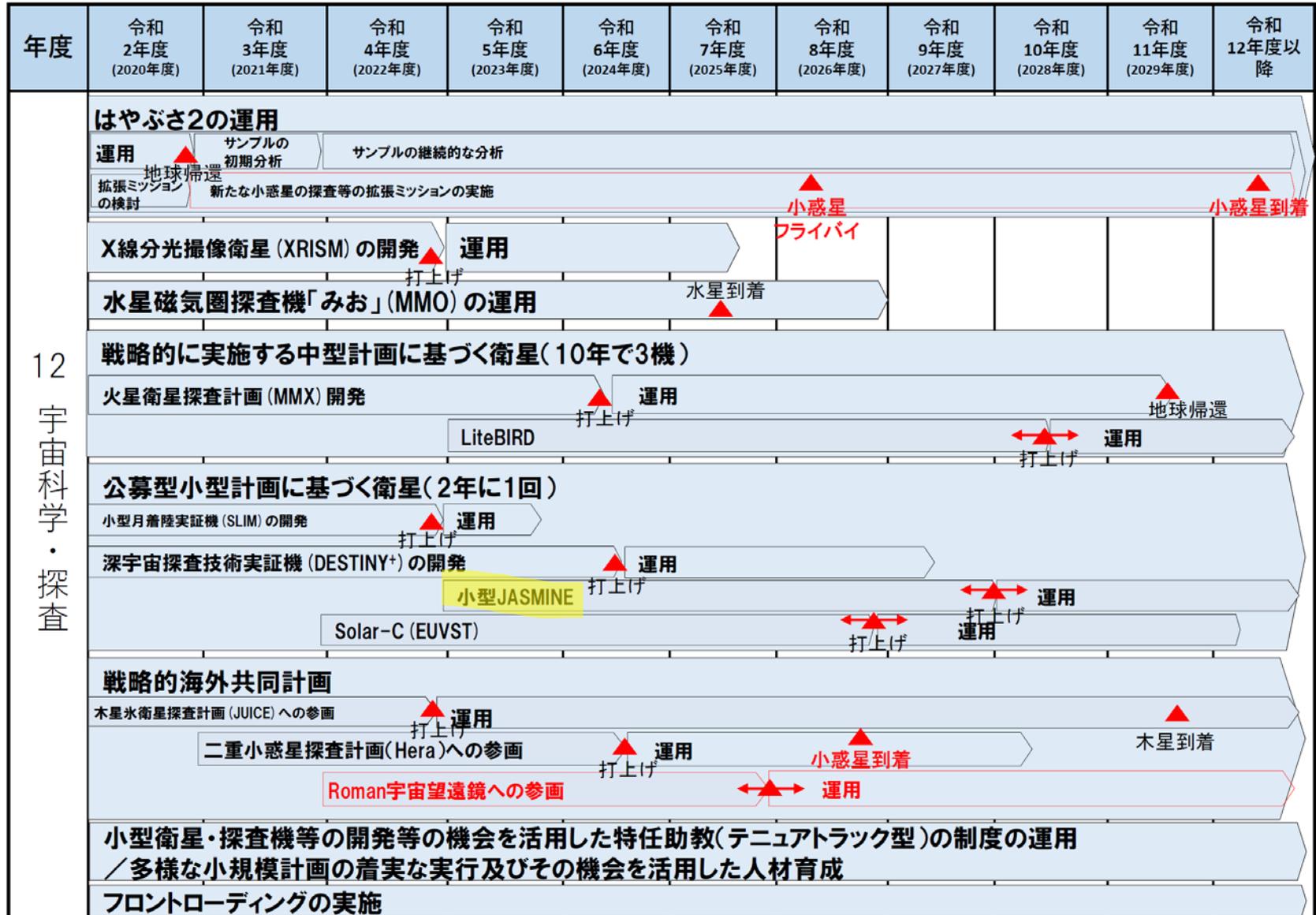
内閣府宇宙政策委員会→

内閣府宇宙開発戦略本部決定(2021.12.28)

JASMINEの打上げは、2028年に位置づけられている

宇宙基本計画工程表(令和3年度改訂)より抜粋

(3) 宇宙科学・探査による新たな知の創造



※以上すべて文部科学省

4. ミッション概要

○JASMINEの仕様案(今までのベースライン)

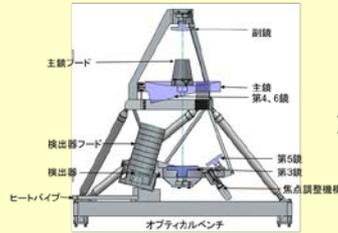
主鏡口径:30cm、焦点距離: 3.9m

視野面積:0.6度×0.6度

アストロメトリ用検出器:HgCdTe(4k×4k)1個

アストロメトリ用観測波長:1.1~1.7ミクロン

衛星重量:約550kg(RCS込み)

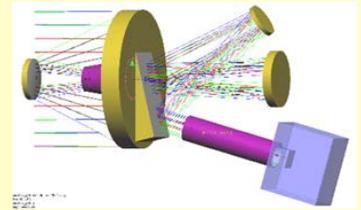
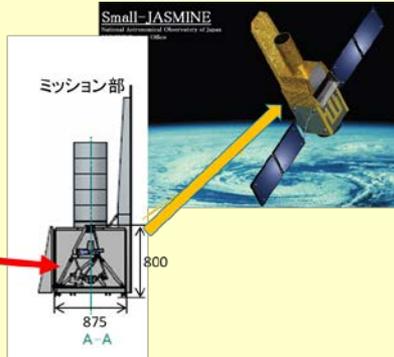


→ベースラインの変更を
検討中(口径は40cm程度)



H4RG(Teledyne社)

国産赤外線センサー
(InGaAs)の宇宙用化
開発へ切り替え
1.1~1.6ミクロン



○観測データは、天体の天球面上での位置および測光の時系列データ、およびそれを解析した、天体毎の年周視差、固有運動なども提供。

○軌道:太陽同期軌道(高度560km以上)(tentative)

○観測期間:3年間程度

○時系列データは、約50分間の連続撮像、その後

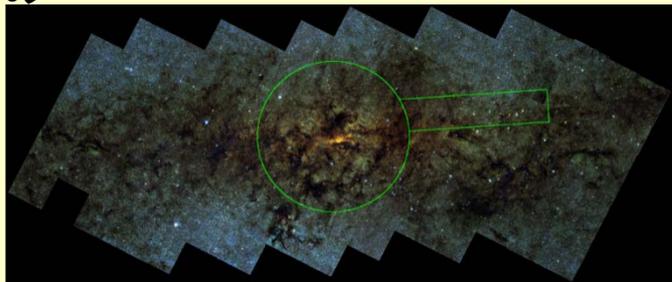
約50分間の非観測時間、**銀河中心方向の観測領域**

そして再度 約50分間の

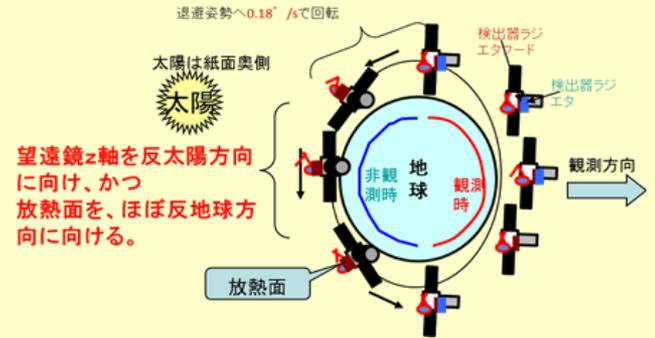
連続撮像データ。

観測の総時間まで

それが繰り返される。



イプシロンSロケットでは打上能力が
アップされるため、高度は再検討中



J, H, K tricolor composite image of the Galactic center area(imaged by SIRIUS on the Nagoya University IRSF 1.4m telescope: Nishiyama et al.,2004 Spring Astronomical Society Press Release). The survey area of Small-JASMINE is written with the green line.

5. 開発状況の概要

5-1 衛星システムの検討

- * 光学系要求事項の見直し：
従来の3枚鏡案に加えて、コスト・リスク低減を目的として2枚鏡案の検討。3枚鏡とのトレードオフ
- * 観測系全体の構成要素の整理と主要な誤差要因の追求。
- * 衛星システム・光学系の実現可能性(コスト、リスク検討を含む)、組立調整・性能評価方法について複数の衛星メーカー候補と検討を進めている

5-2 運用・地上系の検討

- * 観測モード(位置天文観測モード・系外惑星探査モード)、観測シーケンス、それらに基づいたデータ発生量の見積もり。
- * ESA地上局によるサイエンスデータのダウンリンクサポートを予定。
ESAとの協議準備を進めている。
- * ESAのバックアップ対策として、民間地上局利用の検討も進めている。

5-3. 赤外線センサ開発

地上天文観測用として、国立天文台を中心として、国内メーカーの協力をえて国産InGaAs近赤外線撮像センサーが開発されている(右表参照)

以下のように、宇宙用化に向けて開発中

1. CMOS読み出し回路の耐放射線性強化・

低雑音性能向上

放射線耐性について段階的に確認

- FY2020: 東工大 コバルト照射施設、
- FY2021: QST高崎量子応用研究所、陽子線照射

2. 受光部の放射線影響の低減: InGaAs受光部の

反射防止コート・基板除去

3. 小画素化による大フォーマット化

(JASMINEの目標: 1920×1920)

- * センサチップ開発を開始、インハウスでの性能評価試験環境の整備を進めている
- * 熱構造冷却系は国立天文台先端技術センターとの共同研究で進めている。
- * データ取得系の概念検討を行い、開発パートナー企業候補と調整を進めている。

FY2021～FY2023:主にJAXA宇宙研・技術のフロントローディング(EM製造)

FY2024以降:JASMINEプロジェクト予算にてFM製造

諸元(既存の地上天文観測用)

画素数	1280×1280
画素サイズ	15μm×15μm
イメージエリア	19.2mm×19.2mm
出力ポート	2ポート or 4ポート
読み出し時間	4.2秒 or 1.0秒 (200k pix/s/portの時)
読み出しノイズ ・ダブルサンプル ・マルチサンプル	約10e- 約4e-
暗電流	

科研費基盤研究(A)26247029 代表:中屋(2014～2016年度)
科研費基盤研究(A)17H01117 代表:中屋(2017～2019年度)

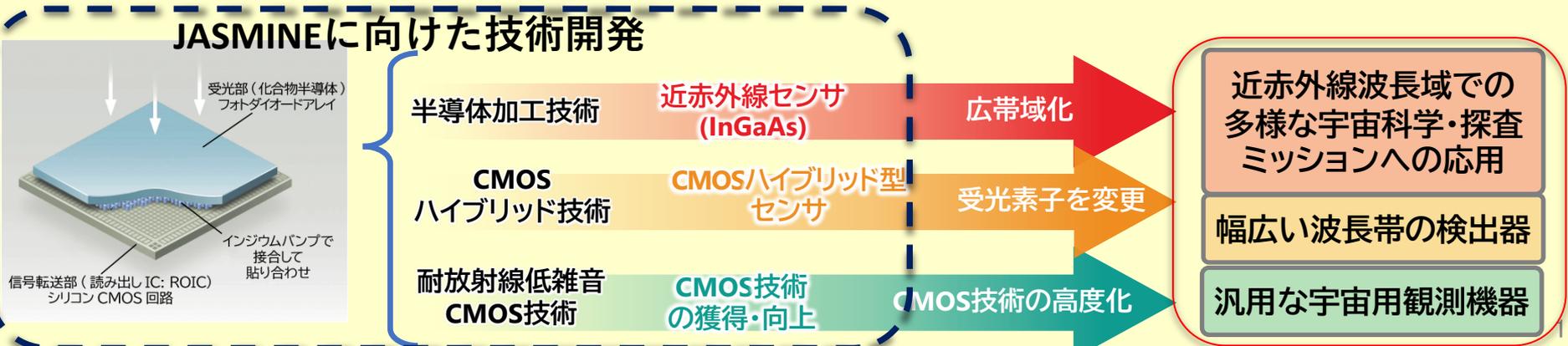
5-4 赤外センサ技術の将来ビジョン

* 内閣府宇宙政策委員会宇宙科学・探査小委員会(2021.11.12)資料 appendix(第47回宇宙科学・探査小委員会ISAS報告資料)より抜粋(一部変更)

- 今後、ミッションの価値を左右する多様な観測機器の能力を戦略的に向上させていく上で、多様な波長における観測センサの基盤となるCMOSハイブリッド検出器について共通技術としてフロントローディングを行う。
- 直近として、JASMINEのキー技術である、InGaAs半導体による赤外線素子と、CMOSをハイブリッド化した検出器の技術検討を行い、成果をJASMINEに繋げる。

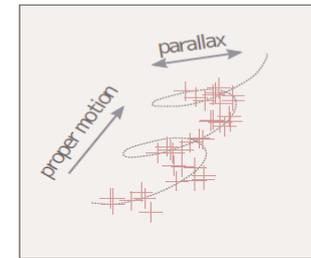
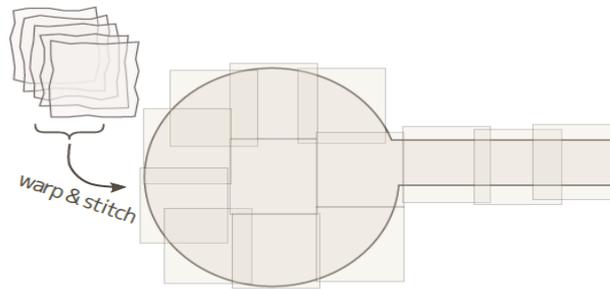
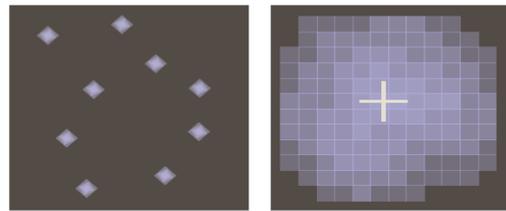


現状では赤外線センサは国際的に米国メーカーに依存せざるを得ない
⇒ 詳細技術情報が得られず最先端ミッションができない、開発リスク高、コスト増(独占状態)



5-5. データ解析・End-to-End simulation(E2E)の進捗

■ JASMINEのデータ解析



Step A

データ取得および星像の中心位置推定

Step B

軌道半周回での画像貼り合わせ

Step C

数千回の観測から位置天文パラメータ決定

E2Eチームとして、国内外の大学研究機関から約20名が開発に参加。

*GitHubを用いたコードの共同開発。Slackによる日常的議論、毎週の全体会合

*Gaiaメンバー(ハイデルベルグ大学、バルセロナ大学)が参加

① 擾乱を比較的シンプルなモデルで取り入れた場合の評価: アルゴリズムの成立性確認 (~2021/12)

- 光学歪、一様なWavefront Error(WFE)、検出器のノイズ特性(仕様書)、指向擾乱(ガウス分布)
 - ✓ Image Simulatorを開発、星像中心位置推定方法を確立した。
 - ✓ 光学歪補正を行い、撮像回数に応じて測定精度が向上することを実証。
 - ✓ 位置天文パラメータ決定方法を確立した。現実的な状況での評価を進めている。

② 擾乱をより複雑なモデルで取り入れた場合の評価: データ解析による達成検証

- 複数の検出器、非一様WFE、光学歪の時間変化、検出器のノイズ・放射線特性(文献値)、フラット、指向擾乱(パワースペクトルから生成)

③ さらに現実に起こりうる(天体起源等の)擾乱源を考えた評価

- 連星系、星のカラー、光行差、pixel形状の不均一、現実的な撮像数・星の数、検出器のノイズ・放射線特性(測定値)その他

④ 実データによるノイズの推定 (打ち上げ後の実際の観測データ)

6. 開発スケジュール

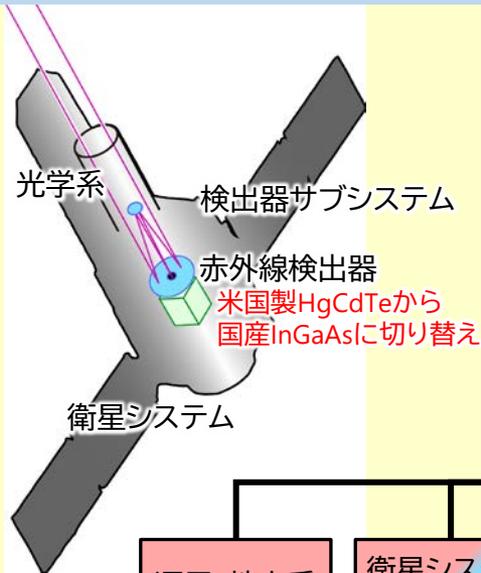
* 内閣府宇宙政策委員会宇宙科学・探査小委員会(2021.11.12)資料より抜粋

- 開発体制を再構築し、技術のフロントローディングの成果を取り込むことで、宇宙基本計画工程表通りの開発を行える準備が整う見込み。

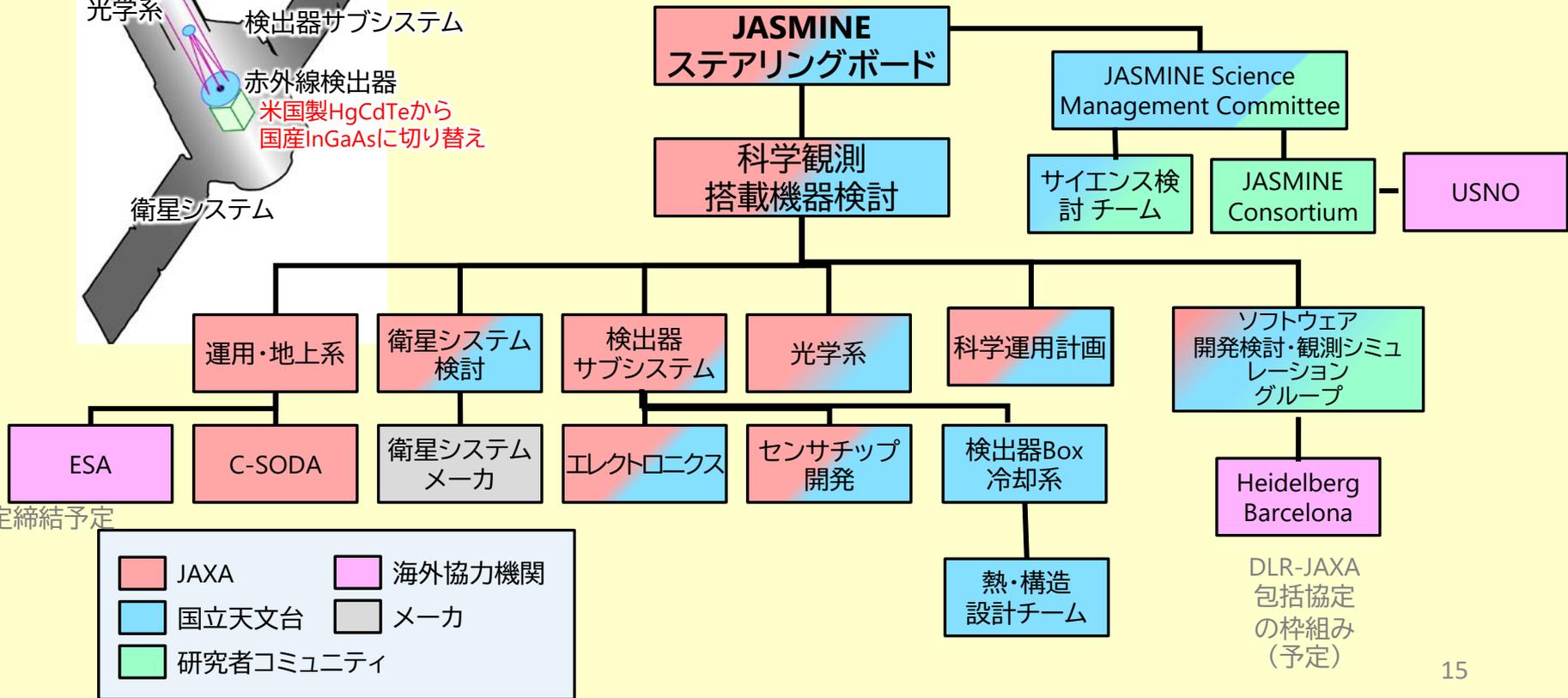
年度	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
マイルストーン			▲ MDR	▲ SDR	▲ PDR	▲ CDR		▲ 打上げ	
人工衛星 (システム・バス)	概念検討		概念設計 計画決定	基本 設計	詳細設計	PFM製作 試験			
人工衛星 (ミッション部)	概念検討		概念設計 計画決定	設計 開発モデル製作・ 試験		PFM製作 試験			
	技術のフロントローディング (赤外線センサ)								

7. 開発体制

- NASA提供を見込んでいた赤外線検出器の国産化により、開発体制に目途がついた。
- ISASの責任により開発を進めるとともに、国立天文台をはじめとした科学コミュニティからサイエンス検討や検出器等に対する技術的支援を受けて確実な開発を行う。



- JASMINEプリプロジェクト候補チーム長: 片坐 宏一 (ISAS)
- 国立天文台JASMINEプロジェクト長(JASMINEのPI): 郷田 直輝 (NAOJ)



8. 推進体制メンバー

JAXA宇宙科学研究所 准教授公募選考中

片坐宏一(プリプロジェクト候補チーム長)
臼井文彦、磯部直樹、和田武彦(検出器開発)

国立天文台 JASMINEプロジェクト

プロジェクト長: 郷田直輝 **助教公募選考中**
鹿野良平、上田暁俊、小宮山裕(併任)、辰巳大輔、辻本拓司、馬場淳一、三好真、矢野太平、鹿島伸悟、宇都宮真、間瀬一郎

E2Eシミュレーショングループ(データ解析WG)

河田大介(e2e代表:UCL)、山田良透(WG長:京都大学)
河原創、上塚貴史、大澤亮、福井暁彦(東京大学)、平野照幸、大宮正士(ABC)、逢澤正嵩(SJTU)、鈴木大介(阪大)、
泉浦秀行、津久井尊史(国立天文台)、服部公平(統数研)、
立川崇之(高知工専)、吉岡諭(東京海洋大)

国立天文台 先端技術センター

センター長: 鵜澤佳徳
技師長: 平林誠之、
満田和久(技術主幹)、
末松芳法(光学)、中屋秀彦(検出器)、大淵喜之 & 浦口史寛 & 清水莉沙(熱構造)

系外惑星探査チーム(トランジット観測による地球型惑星探査等)

河原 創(チーム長:東大)、増田賢人(阪大)、小玉貴則、福井暁彦(東大)、葛原昌行、大宮正士、小谷隆行、平野 照幸(ABC/NAOJ)、山田亨(ISAS)、他

JASMINE Consortium

WG-A(Data Analysis)、WG-B(Science Validation and Preparation)、WG-C(Outreach)
リーダー: 河田大介 (MSSL/UCL)、国内外60名の研究者(2021年4月現在)

2人の 研究員雇用(2022.春~)

ESA

国際協力

ARI Heidelberg University

Michael Biermman, Wolfgang Löffler

University of Barcelona

C.Jordi, JM.Carrasco, X.Luri

U.S. Naval Observatory

Bryan Dorland, Nathan Secrest



9. コミュニティとの連携と将来のミッションへ

★コミュニティからの支援が必要！

そして、将来への人材、技術の継承、育成も重要

◎ 具体的支援希望例

1. 国内のプロジェクト連携

*天の川銀河中心領域の観測

PRIME+SAND, PFS, ULTIMATE-Subaru等との連携

→ 日本発信の科学成果を最大限にする。

9. コミュニティとの連携と将来のミッションへ(続)

◎ 具体的支援希望例

2. JASMINEを用いたデータサイエンス

*データ解析手法の確立とソフトウェア開発、
データアーカイブ作成→データ解析グループへの参画

JASMINEの観測を最大限に活用できるように、
透明性、信頼性を重視。

ユーザーが使いやすい利便性も重視

データサイエンスの“訓練場”としての活用

3. Science validationチームへの参画

JASMINEのサイエンス成果の精査と拡大

JASMINEのデータを活かして多くの科学成果を
日本から発信

9. コミュニティとの連携と将来のミッションへ(続)

◎ 具体的支援希望例

4. スペース用観測装置開発への参画

スペース特有の検討、開発、試験に参加。

スペース用装置開発の“訓練場”としての活用

特に宇宙用赤外線検出器の開発は

他のミッションにもつながる

9. コミュニティとの連携と将来のミッションへ(続)

- ◎以上、サイエンスはもとより、
データ解析(データサイエンス)、
装置開発等の面で参画をお願いしたい。
→今後の(スペース)ミッションを担う人材の育成、
技術の継承へ。
- ◎GREX-PLUSなど国内の将来ミッションへの
寄与も検討中
- ◎Gaiaの後継機で国際協力になる
GaiaNIR(2045年頃以降)への日本からの
寄与にもつなげたい。

よろしく御願いたします

Jasmine

