

JASMINE計画

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

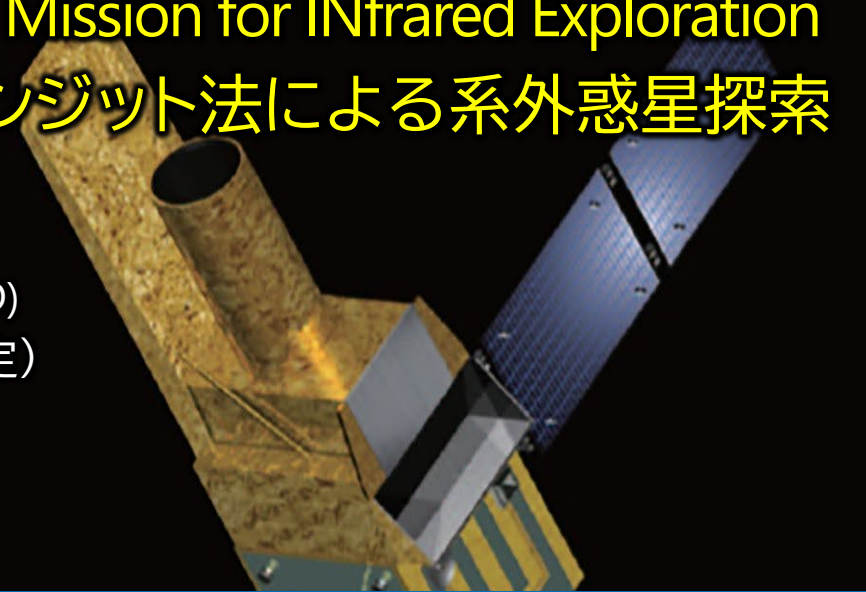




1.JASMINEの ミッションコンセプト

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36cm程度 超高安定望遠鏡
- 国産赤外線検出器(InGaAs)
 - ・ 観測波長: 1.0-1.6 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 (打ち上げ重量・燃料込み) 程度
- 太陽同期軌道・高度550km以上、3年間観測



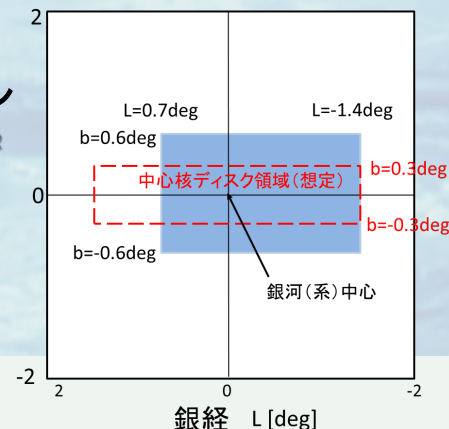
★JASMINEのアウトプットデータ

* 銀河系中心核構造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。 **銀河系中心核構造方向の領域サーベイ** (TBD) 春と秋に観測

~9.5等級<Hw(1.0~1.6 μm)<~14.5等級の約10万個以上の星を10秒(TBD)に1回ダウンロード 20回程度(TBD)に1回の割合で1視野の全画面もダウンロード *Hw~0.9J+0.1H-0.06(J-H)²

年周視差精度: 25マイクロ秒角~125マイクロ秒角
(25 μ 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)

矢野氏の講演(Z207c)参照



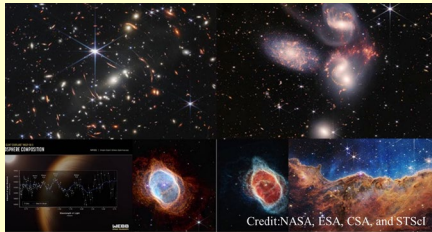
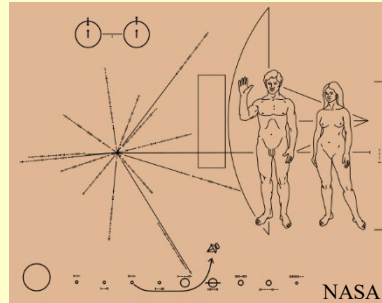
* 系外惑星探査を目的としたターゲット天体の時系列測光データを公開する
10個以上の対象天体に対して、測光精度が0.3%以内の時系列測光データ(1つの対象に対して合計観測期間が3週間以上)

2.JASMINEの科学目的・目標

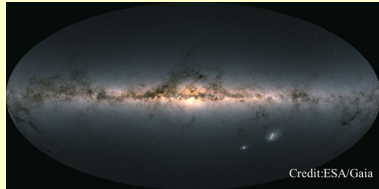
★究極の科学目的

＊ 人類がなぜ宇宙にいるのか？

銀河、星→惑星
→生命→人類

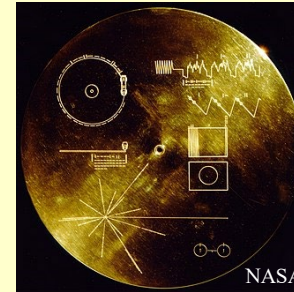


天の川銀河を“知る”！



JASMINEの科学目標 星の距離と運動の測定により、
天の川銀河形成の鍵を握る
中心核構造を解明する

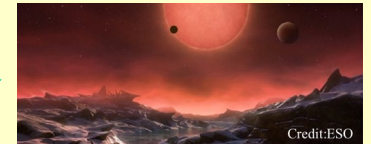
＊ 我々は宇宙で孤独なのか？



太陽系近傍の生命探査



ハビタブルゾーンにある
地球型惑星の探査



時間軸天文観測により、将来の
生命探査に有望な恒星に
対して、追観測可能な地球型
惑星の有無を確認する

JASMINEによる天の川銀河探究

近赤外線(1.1~1.6ミクロン)で、Gaiaが苦手な

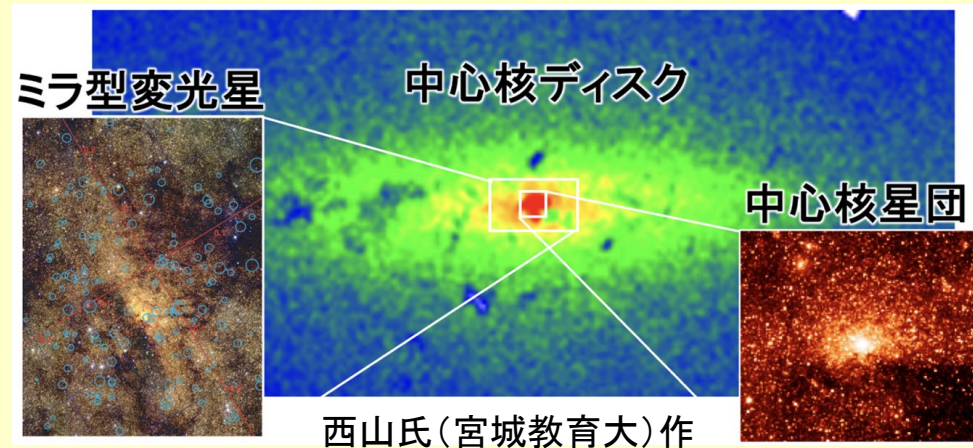
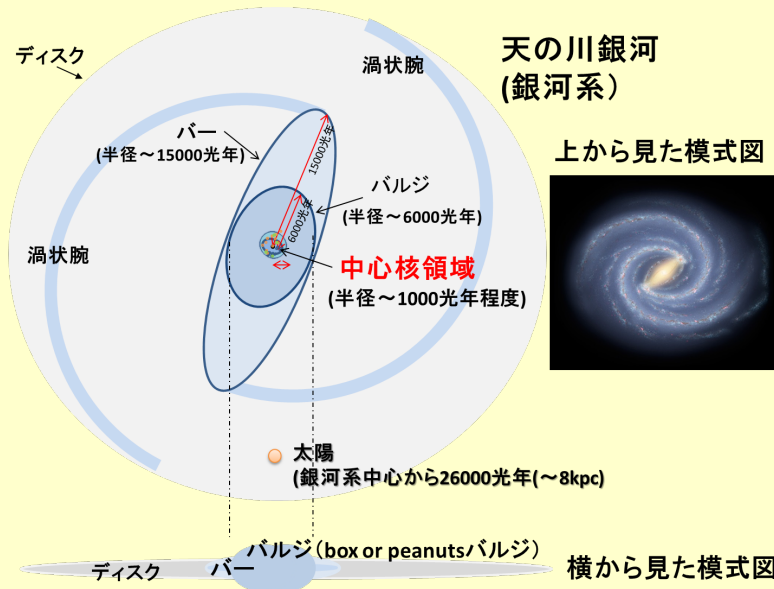
天の川銀河中心核領域の位置天文観測

JASMINEによる銀河中心考古学の遂行

河田氏の講演(Z204a)参照

馬場氏の講演(Z315r)参照

朝野氏の講演(Z214a)参照



中心核領域は“**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と考えられている。

天の川銀河誕生から
現在までの様々な年代の
地層が潜んでいるイメージ！

天の川銀河の形成史解明にも
つながる

★JASMINEが遂行する銀河中心考古学

中心核領域 (~中心核バルジ)

目標(1): ミラ型変光星を用いた中心核ディスクの**形成時期**の解明

河田氏の講演(Z204a)参照

松永氏の講演(Z205a)参照

西山氏の講演(Z211a)参照

バー構造の形成時期

太陽系の移動解明

中間質量BH
の発見等

目標(2): 中心核ディスクの構造解明
巨大BHの進化と銀河系中心の活動(ガスの輸送機構)の解明につながる中心核で回転する内部バー構造の存在解明など

目標(3): 中心核楕円構造の解明
中心核ディスク周りにも拡がり、力学構造も異なる構造とその起源の解明
=> 銀河系誕生期の痕跡
(古典的バルジ)または
巨大BHの落ち込みの痕跡?

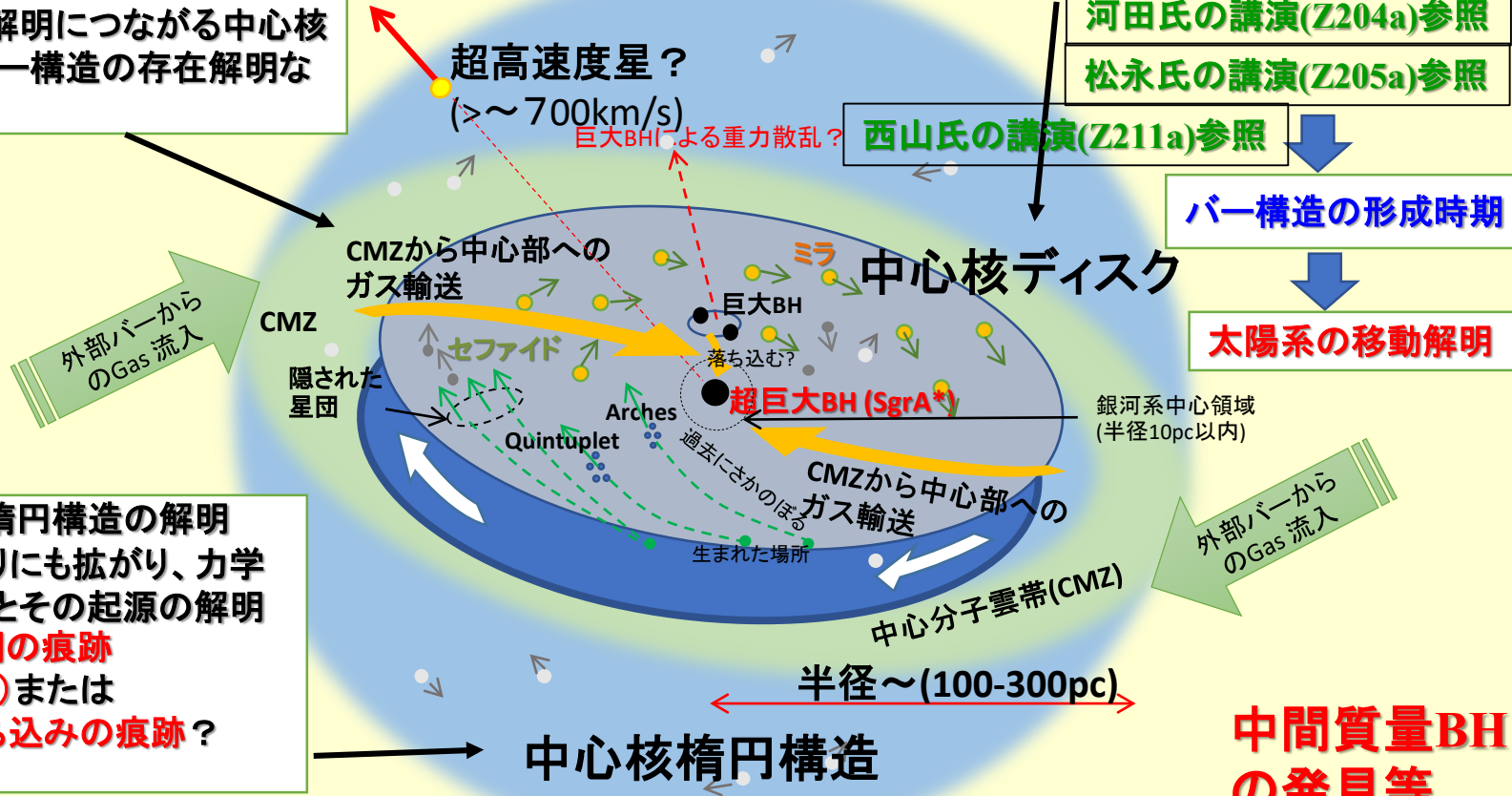
*** 銀河系中心核バルジでの星と星団形成、物理的特徴や多様な天体の探求 ***

隠れた星団の同定
=> 星団形成史、
中間質量BHの発見

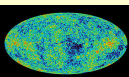
星の位置運動情報から星団の誕生した領域を探る。

超高速星はどうして存在するのか?

多様な天体の探求:
重力レンズ天体、
コンパクト天体等



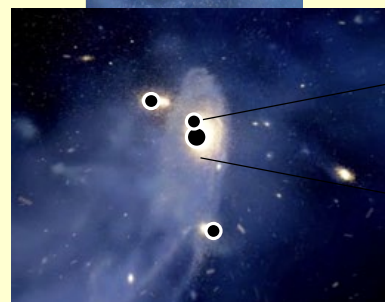
天の川銀河の種が誕生



インフレーション
ビッグバン

原始銀河の
階層的合体成長

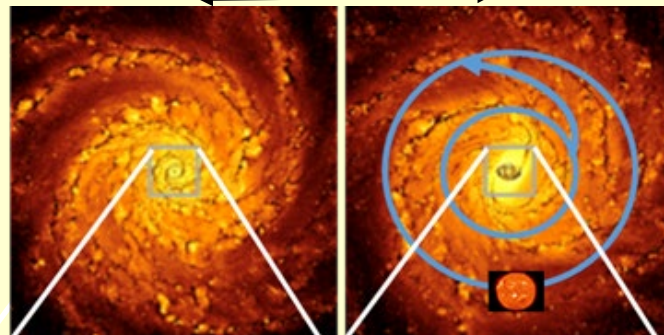
約30億年



銀河中心考古学イベント①

バー構造の出現

出現前 約10億年 出現後



古典的
バルジ

巨大BH

銀河中心考古学イベント②

ガス流入
星・星団形成

約200pc

Baba & Kawata (2020)

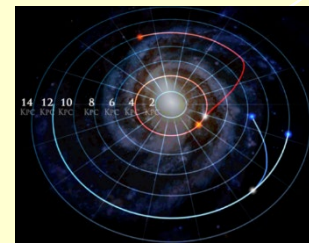
中心核ディスク形成時期
→ **バー構造の形成時期**

天の川銀河全体への影響

太陽は内部で誕生(!?) → 惑星形成に影響!?

**内部から外側に
移動を開始 (!?)**

気候変動?
生命進化?
人類誕生?



内部バー
(回転)

BH成長

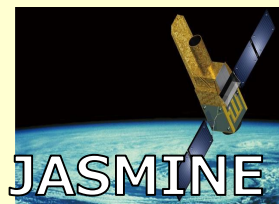
銀河中心考古学イベント③

内部バー形成

→ 中心の超巨大BHへの
ガス供給

→ **超巨大BHの成長**
(質量増加)

2020年ノーベル物理学賞
天の川中心における
超巨大BHの存在! ⁶



JASMINE

中心核領域の星の位置・速度の
観測から3大イベントの解明を目指す。

その他、位置天文データで期待できる科学的成果例

1. 隠れた星団の探究

西山氏の講演(Z211a)参照

中心核領域での隠れた星団の検出による星団形成史解明、中間質量BHの発見

2. 中心領域でのブラックホール探査

鹿内氏の講演(Z216a)参照

位置天文学的なBH連星系の検出とBHの質量決定、位置天文学的重力レンズ効果を用いたBHや中間質量BHの発見

越本氏の講演(Z215r)参照

3. 中心領域での銀震学

銀河面振動の起源、バー構造の進化、ディスク面の重力場、ダークマター分布

4. 系外惑星の探査: 位置天文学的惑星探査

5. 中心領域での拡散X線放射とX線点源

森鼻氏の講演(Z217a)参照

6. 星形成領域の探究

西氏の講演(Z212a)参照

7. 銀河系中心電波源の位置天文探究との連携

今井氏の講演(Z213a)参照

8. 星間吸収物質と磁場構造の3次元分布

9. 恒星表面活動の探求

黒点やフレアなどの表面活動現象の時間的变化、星震学

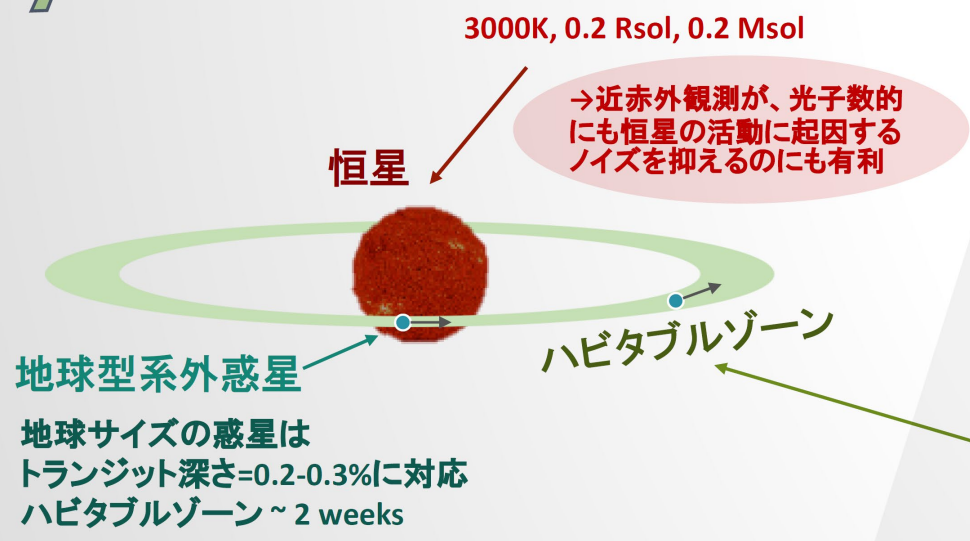
トランジット観測による中期M型星周りの生命居住可能領域 (ハビタブルゾーン)にある地球型惑星の探査

河原氏の講演(Z206a)参照
増田氏の講演(Z226b)参照

JASMINEの位置天文観測に要する性能があれば、生命探査に適した惑星発見の可能性あり！
日本で衛星による系外惑星探査観測は初めて！
(JASMINEでのみ狙えるターゲットであり、他の衛星プロジェクトに対し有利)

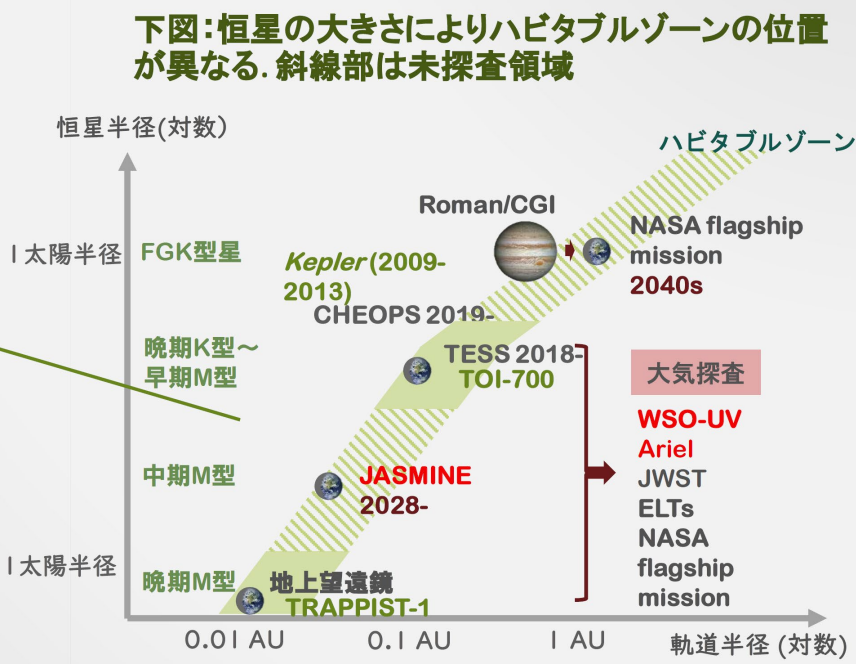
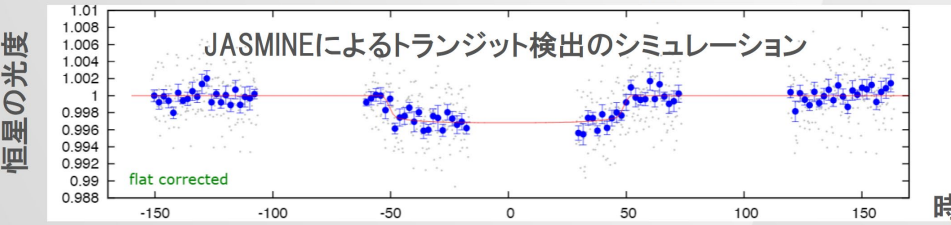


精密測光によるハビタブルゾーン地球型惑星検出



→宇宙からの連続精密測光の必要性

精密測光手法の開発(平野照幸、e2e group)



→JASMINEで他のミッションでは難しい領域を探る

その他、測光データ関連のサイエンス

1. M型星周りの地球型惑星探査に関する地上観測とスペース観測の連携

小谷氏の講演(Z218r)参照

2. M型矮星のハビタブル惑星の理論的可能性

木村氏の講演(Z219a)参照

3. 系外惑星大気赤外分光観測衛星計画Arielとの連携

生駒氏の講演(Z220a)参照

4. 星団領域の若い惑星探査

宮川氏の講演(Z223a)参照

宮崎氏の講演(Z228b)参照

5. 連続測光による超巨星-中性子星連星系、BeX線連星系探究

河合氏の講演(Z224a)参照

6. 褐色矮星の光度変動→褐色矮星の大気内での循環および雲生成

川島氏の講演(Z225b)参照

7. 星団中の星の自転変動→系外惑星の大気進化の議論へも進展

野津氏の講演(Z227b)参照

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）



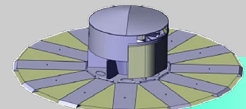
位置天文観測

- 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・測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(?)

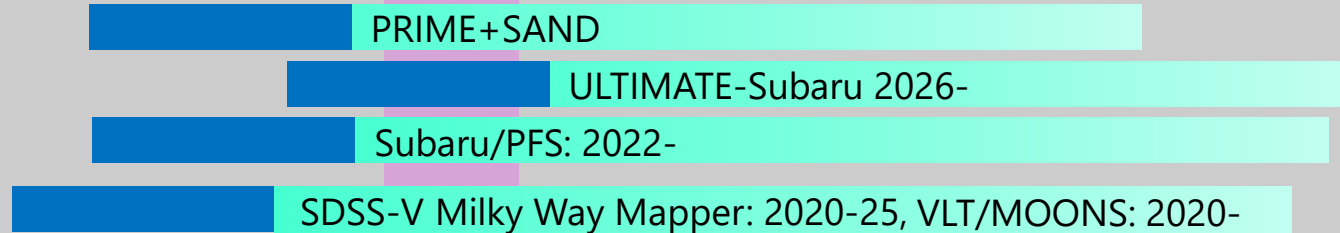


Gaia: 2013-25(?)



GaiaNIR: 2045(?) -

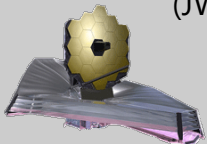
地上観測とのシナジー
(可視光・赤外線)



- 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

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のある
サンプル数の拡大

系外惑星探査

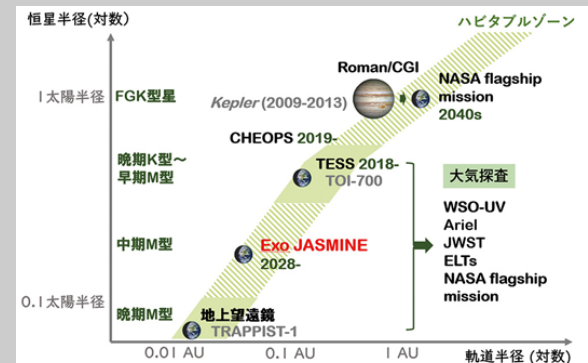
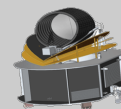


JWST: 2021-2031(?)

ARIEL: 2028-2032(?)



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

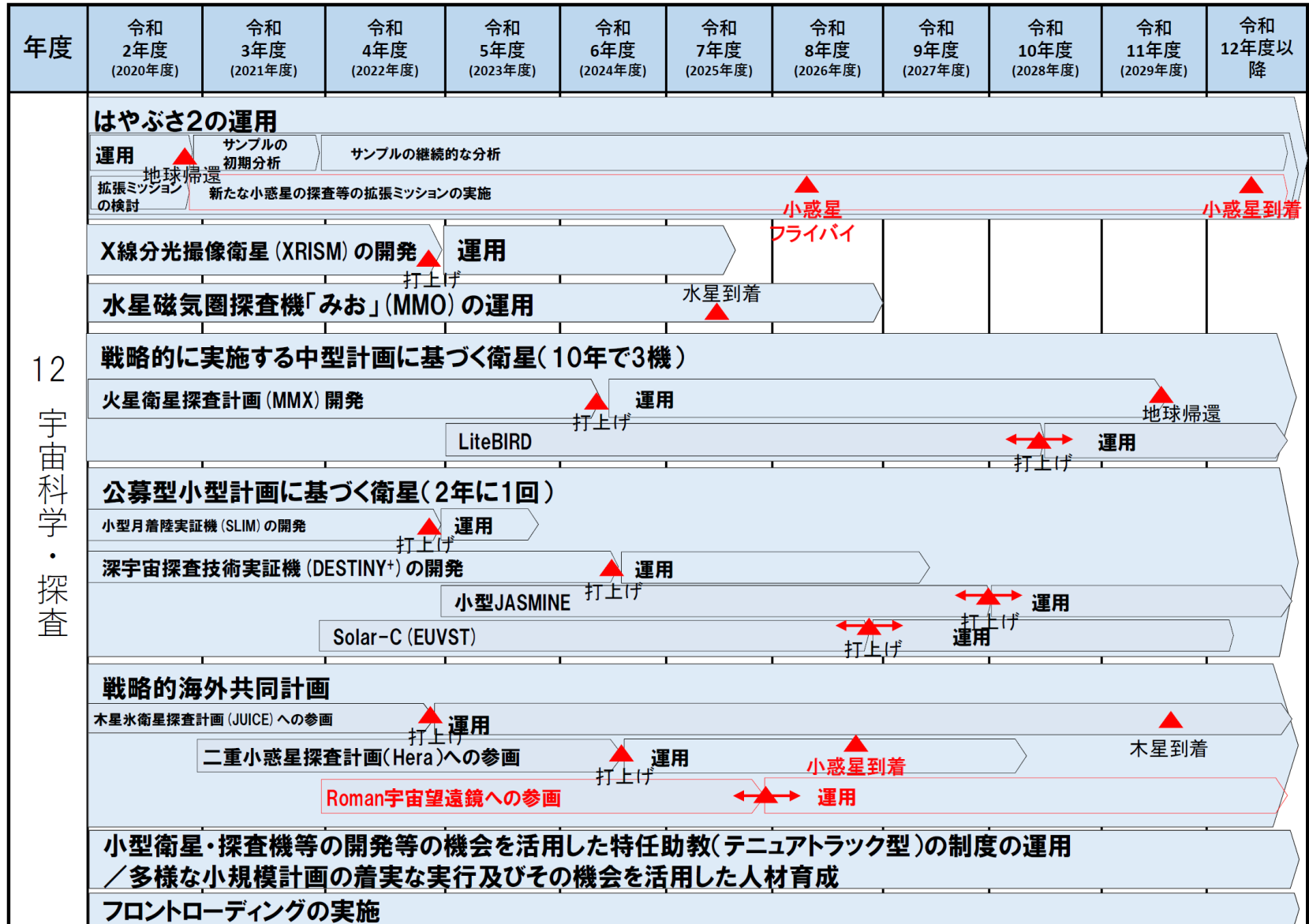


3. JASMINEの経緯

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** Hipparcos、Gaiaのリーダー、Gaia/DPAC、Roman、GRAVITY等の面々 7 名
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
トランジット観測による系外惑星探査の検討開始（チーム発足）
7. 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
8. 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
- 9.2020年6月 国立天文台小型JASMINE-WGによる約1年間の検討の結論：**JASMINEが審査を経てJAXAの次の段階に上がることを国立天文台は後押しするとともに、系外惑星探査を主目標の1つにすることを推奨する**
10. 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
11. 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。
12. 2021年12月 **内閣府宇宙戦略開発本部（首相が本部長）が決定した宇宙基本計画工程表（2021.12改定）においてJASMINEの打上が2028年に位置付けられている。**

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. 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

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)

5. ミッション概要

○JASMINEの仕様案(現案)

最近、ベースライン案の
総点検、見直しを行った

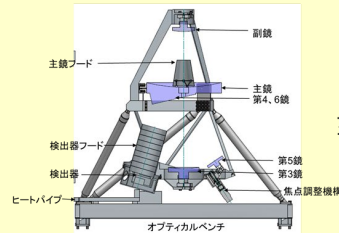
主鏡口径:36cm、焦点距離: ~4.4m

視野面積:0.5度×0.5度

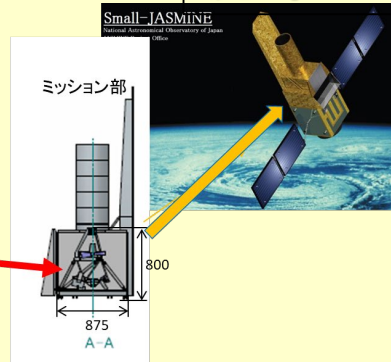
赤外線検出器:InGaAs(2k×2k) 4個

観測波長:1.0~1.6ミクロン

衛星重量:約550kg(RCS込み)



望遠鏡



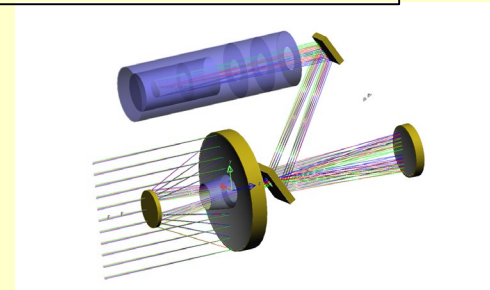
片坐氏の講演(Z202a)参照

鹿島氏の講演(Z209c)参照



国産赤外線センサー
の宇宙用化開発

鹿野氏の講演(Z208c)参照



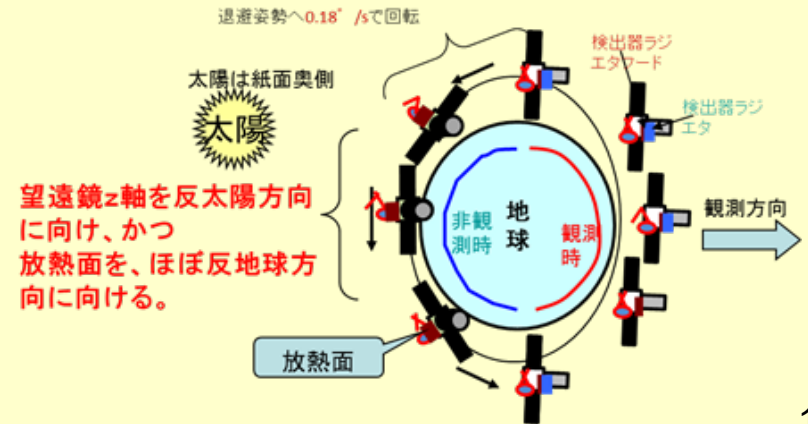
○軌道:太陽同期軌道(高度約550km以上)(tentative)

○観測期間:3年間程度

○位置測定の時系列データは、春と秋に
おいて、約50分間の連続撮像、その後
約50分間の非観測時間、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。

○夏、冬期間は、系外惑星探査のための
トランジット観測を行う。

イプシロンSロケットでは打上能力が
変更されるため、高度は再検討中



6. 開発状況の概要

6-1 衛星システムの検討

片坐氏の講演(Z202a)参照

- * 観測系全体の構成要素の整理と主要な誤差要因の追求。
仕様ベースライン案の変更。
- * 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候補と検討を
進めている

6-2 運用・地上系の検討

磯部氏の講演(Z210c)参照

- * 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。
- * バックアップ対策も兼ねて、米国(USNO等)によるサポート、
民間地上局利用の検討も進めている。

6-3. 赤外線センサ開発

鹿野氏の講演(Z208c)参照

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

- * センサチップ開発を順調に進めている
- * 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製造の予定

○インハウスでの冷却評価試験の整備を進めている

○フラット補正技術の開発、検出器特性精密測定方法

* シングルモードファイバーによるピクセル間感度むらの測定→フラット補正

* 2本のシングルモードファイバーによるピクセルの歪みやサイズのばらつき測定

諸元(既存の地上天文観測用)

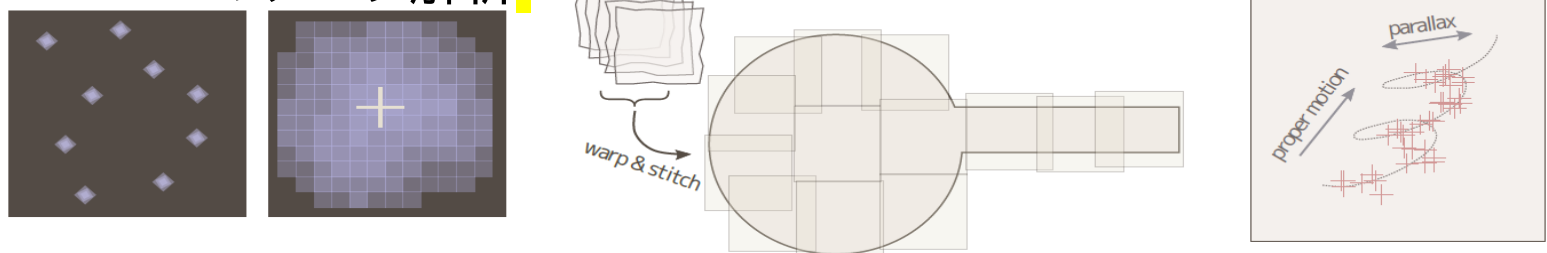
画素数	1280×1280
画素サイズ	15μm×15μm
イメージエリア	19.2mm×19.2mm
出力ポート	2ポート or 4ポート
読み出し時間	4.2秒 or 1.0秒 (200k pix/s/portの時)
読み出しノイズ ・ダブルサンプル ・マルチサンプル	約10e- 約4e-
暗電流	

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)

多田氏の講演(Z222a)参照

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

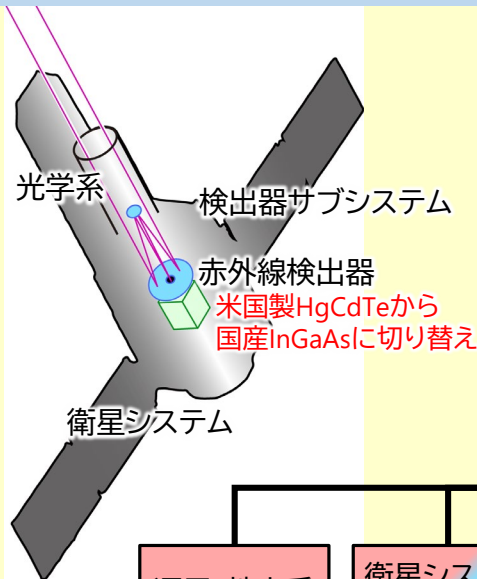
E2Eチームとして、国内外の大学研究機関から約20名が開発に参加。
*GitHubを用いたコードの共同開発。Slackによる日常的議論、毎週の全体会合
*Gaiaメンバー(ハイデルベルグ大学、バルセロナ大学)が参加

- 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の開発、測光精度
 - ✓ 星像中心位置推定方法の確立。
 - ✓ 光学歪補正により、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の確立。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)

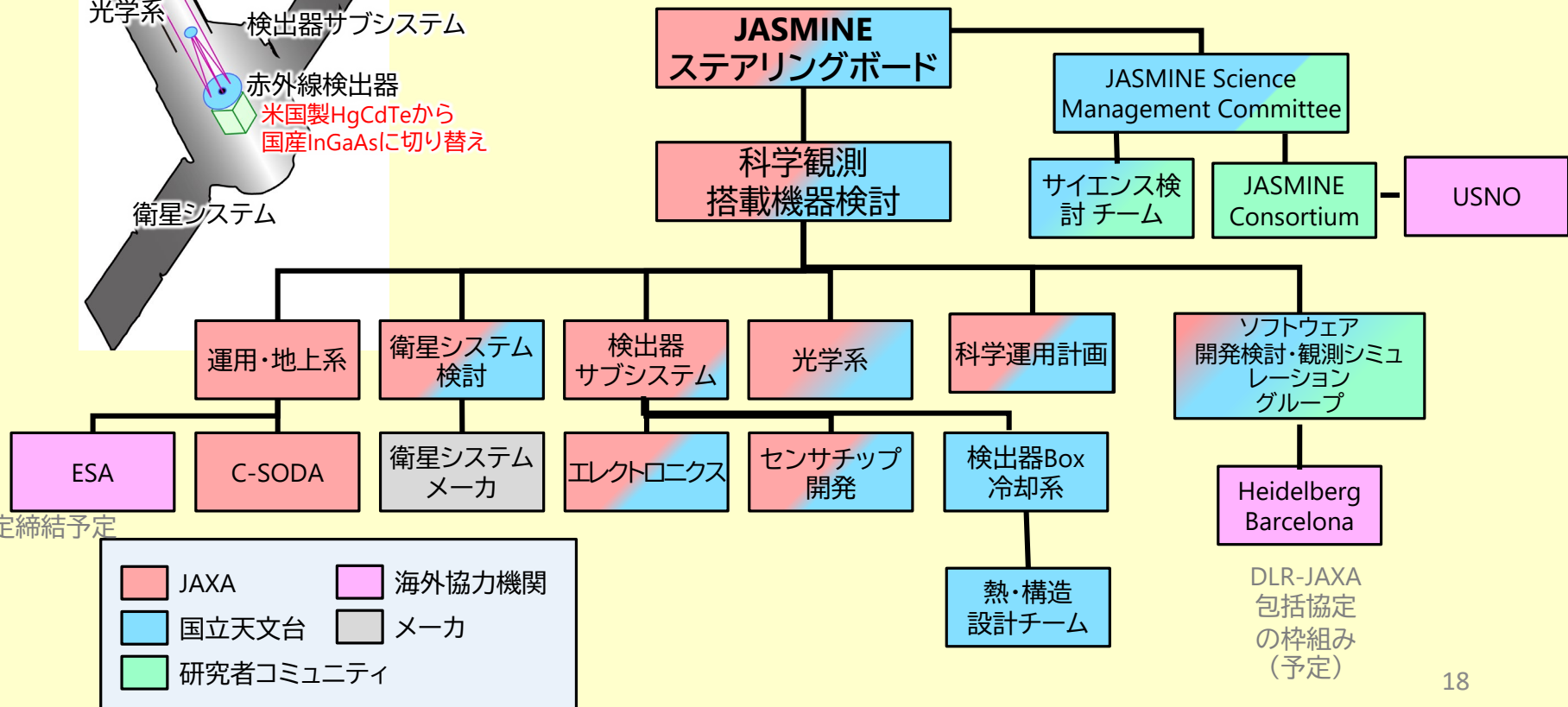
平野氏の講演(Z221a)参照

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)



★JASMINE Consortium (JC)の活動

(代表:河田(UCL): 60名程度(2021.4現在)の研究者)

サイエンス検討(様々な分野)

コミュニティ: 光赤外、理論、X線天文学、電波天文学、重力波...

研究対象: 銀河系力学・進化、巨大BH、星団・星形成、
BH・ダークマター探査、...

+ 他の観測
プロジェクト
との連携

WG-A: Data Analysis

データ解析手法の確立とソフトウェア開発

* ビッグデータを扱う光赤外観測プロジェクト、系外惑星観測、...

* Gaiaのデータ解析チームとの国際協力

WG-B: Science Verification and Preparation

科学目標達成に向けてのシミュレーションデータ
(模擬カタログ)などを使っての準備

WG-C: Outreach

JASMINEの成果を広く社会に還元するためのアウトリーチ活動

* 公開のJC meetingを毎年度開催。Science Workshopも兼ねる。

* ULTIMATE-Subaruや国内プロジェクトとのシナジー等も検討

9 国際協力

1. APOGEE-2(分光観測:視線速度、元素組成)と

JASMINEはサイエンス協力でMOUを締結済み

→APOGEE-2のPI(S. Majewski)がJASMINEのWP執筆に協力

2. VVVとGALACTICNUCLEOUS(測光観測:
固有運動など)

PIと直接会った折に今後協力していくことに。

3. Romanとの連携(赤外線位置天文観測) 担当者と相談

4. Milky Way Mapper & Moons
(分光観測:視線速度、元素組成) 今後、連携を希望

5. 将来の国際的位置天文観測衛星への橋渡し
(TheiaとGaiaNIR)

TheiaとはMOU締結。GaiaNIRのWP作成に参加(河田、郷田) 21

9 国際協力(続き)

6. データ解析関連の国際協力

★ Gaiaのデータ解析チームからの参加

- (i) アストロメトリデータ解析:ハイデルベルグ大学とドレスデン大学から 小型JASMINEへの参加意思表明の正式レターを受け取っている。

また、ドイツ宇宙機関からJASMINEへの参加に対するLOIが届いている。

* ハイデルベルグ大学のメンバーから大学へも申請し、ドイツー日本を行き来する旅費の獲得をしてくれている。
さらに、現地での専門員雇用費用が採択され2名を雇用(JASMINE専任)

- (ii) Photometryデータ解析:バルセロナ大学から参加表明

10. 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

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、電波観測

X線観測等との連携

→ 日本発信の科学成果を最大限にする。

10. コミュニティとの連携と将来のミッションへ(続)

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

JAMSINE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 verification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

10. コミュニティとの連携と将来のミッションへ(続)

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

10. 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。
- ◎ 国内の将来ミッションにつなげる
- ◎ 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

