

JASMINEからGREX-PLUSへ

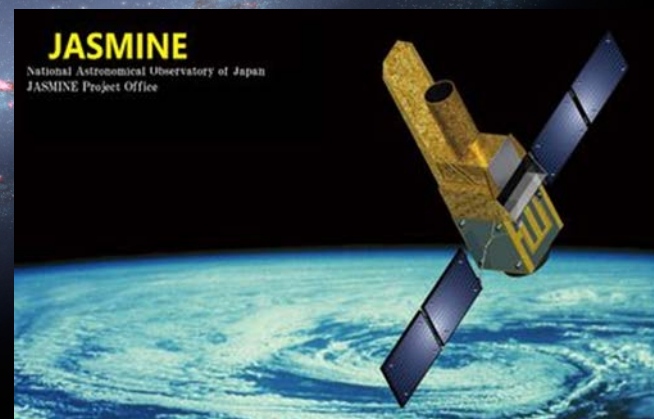
JASMINE : Japan Astrometry Satellite Mission for Infrared Exploration

郷田直輝（国立天文台JASMINEプロジェクト）

- ・JASMINEの全体概要・開発状況
- ・GREX-PLUSとのシナジー



JAXA

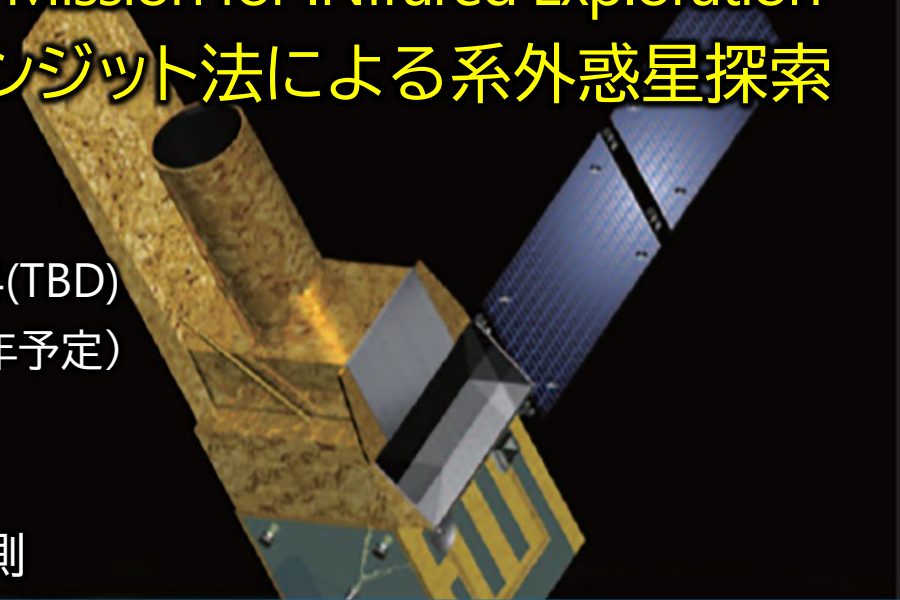




1.JASMINEの ミッションコンセプト

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のアウトプットデータ

* 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。 **銀河中心核バルジ方向の領域サーベイ** (TBD) 春と秋に観測

9等級 $<H_w(1.1\sim 1.6\mu\text{m}) < 14.5$ 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

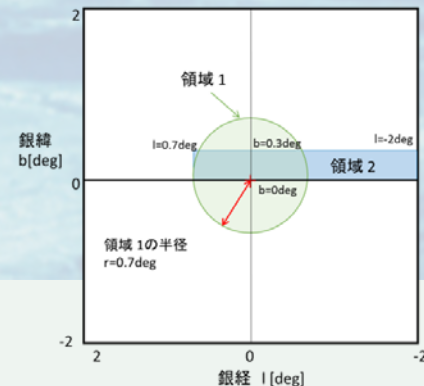
年周視差精度: 25マイクロ秒角 \sim 125マイクロ秒角

(25 μ 秒角 \Rightarrow 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 \sim 125マイクロ秒角/年

(銀河中心での接線速度の誤差が1km/s \sim 5km/s)

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



* 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

2.JASMINEの科学目標

★究極の科学目標

* 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”！

* 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

JASMINE

JASMINEによる天の川銀河探究

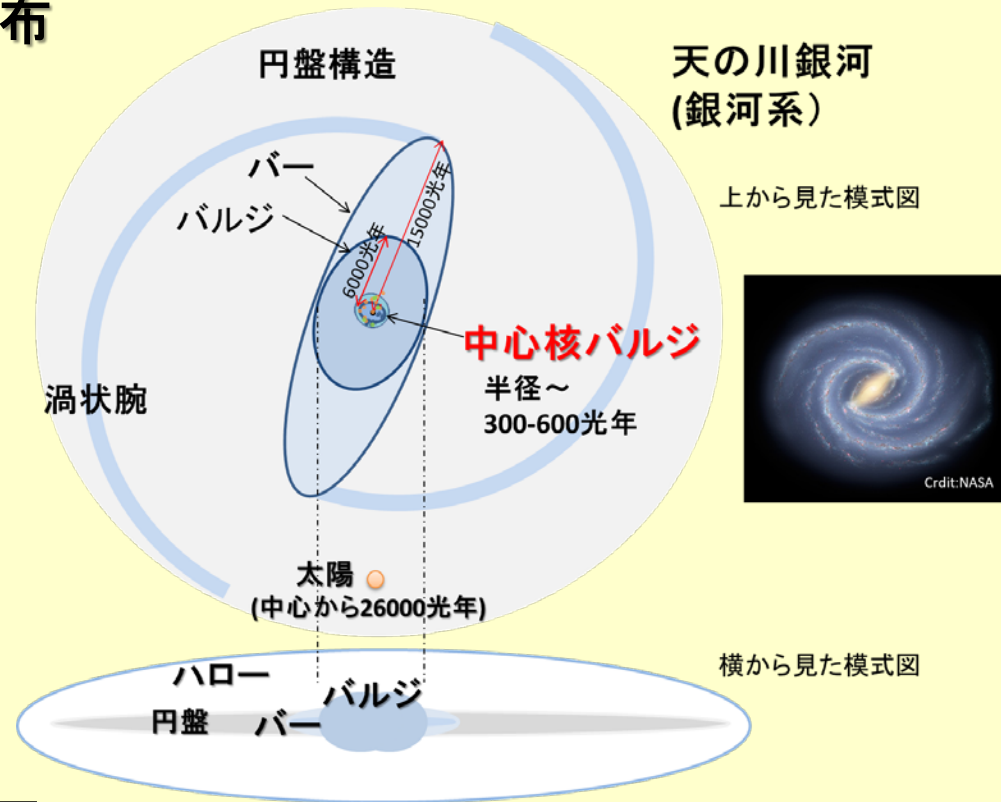
近赤外線(1.1~1.6ミクロン)で、Gaiaが苦手な**天の川銀河中心部**
(**中心核バルジ**)の位置天文観測を行う

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！

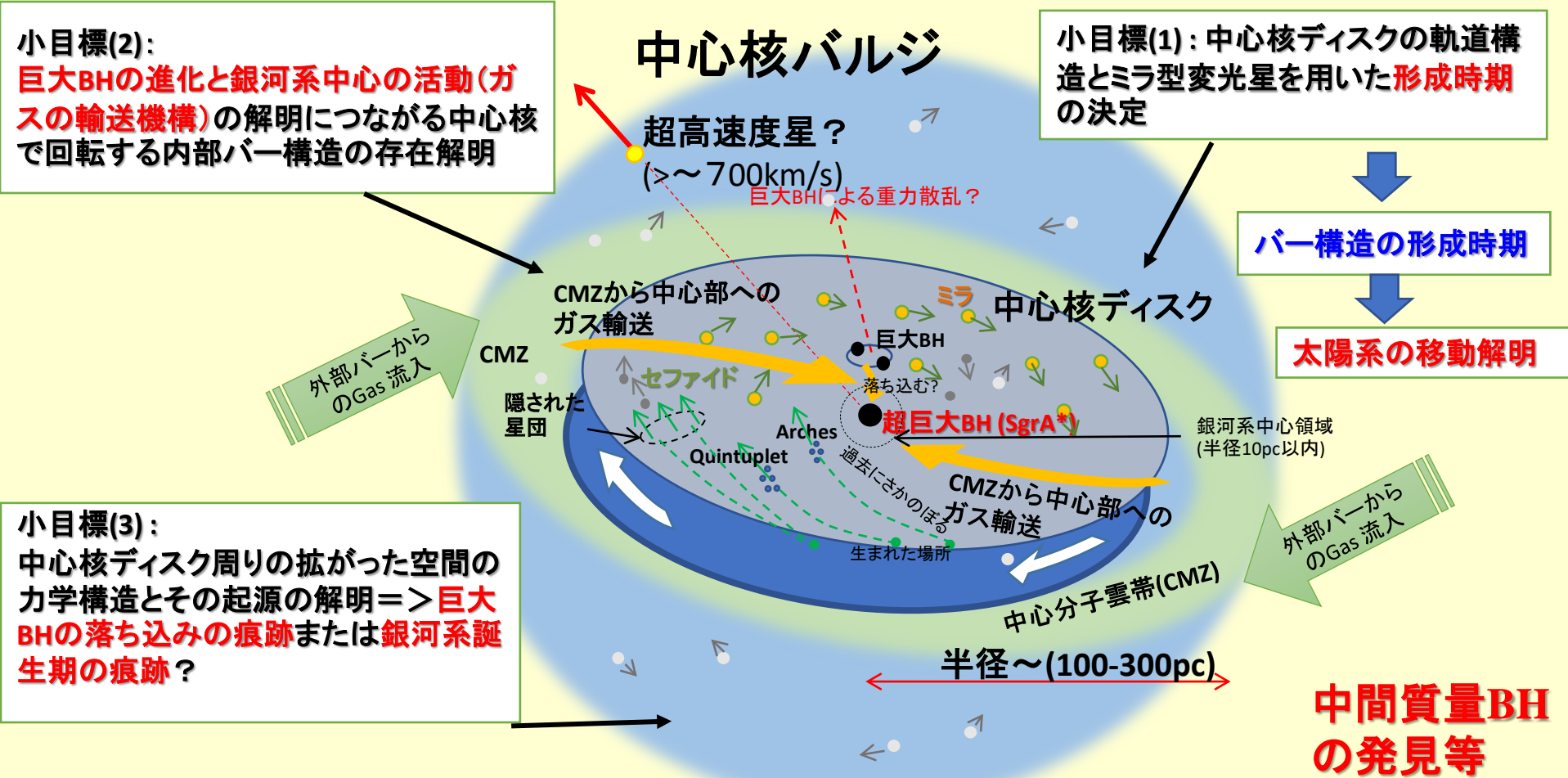


JASMINEによる
銀河中心考古学の遂行



★JASMINEが遂行する銀河中心考古学

—中心核バルジで、JASMINEが世界で初めて解明する研究課題—



*** 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 ***

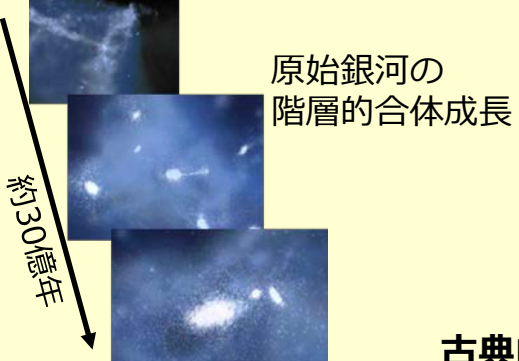
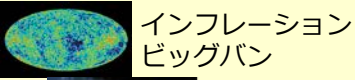
隠された星団の同定
=>星の形成史
(ディスクからのガスの流入史)

星の位置運動情報から星団の誕生した領域を探る。

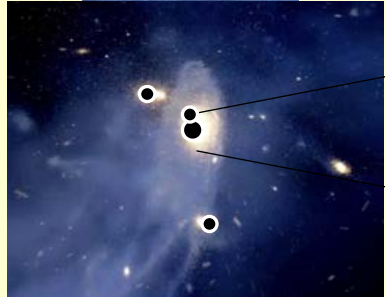
超高速星はどうして存在するのか?

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



原始銀河の階層的合体成長



古典的バルジ

銀河中心考古学イベント①

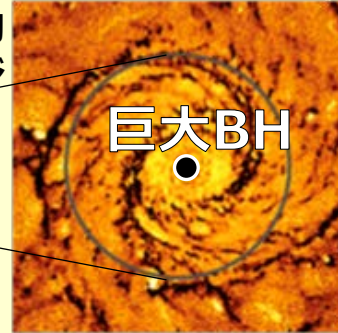
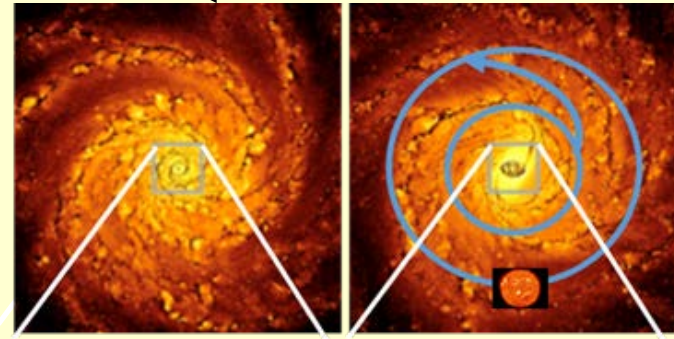
中心部での最初の星形成
→
現在も中心部に残存！？

巨大BHが中心部に落ち込んできた痕跡？

中心核バルジの星の位置・速度の観測から3大イベントの解明を目指す。

バー構造の出現

出現前 ← 約10億年 → 出現後



銀河中心考古学イベント②

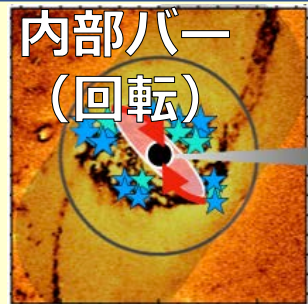
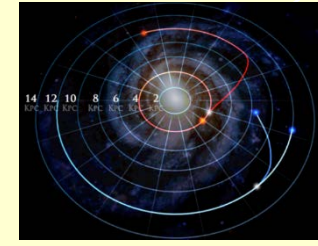
中心核ディスク形成時期
→ **バー構造の形成時期**



Baba & Kawata (2020)

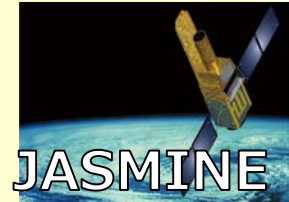
天の川銀河全体への影響

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?



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) ↑



JASMINE

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

Gaia



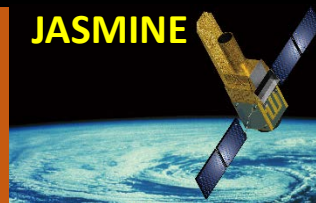
- ・太陽系近傍
- ・広域のハロー星
- ・バルジ/バー構造の上層部
- ・銀河円盤上層部

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



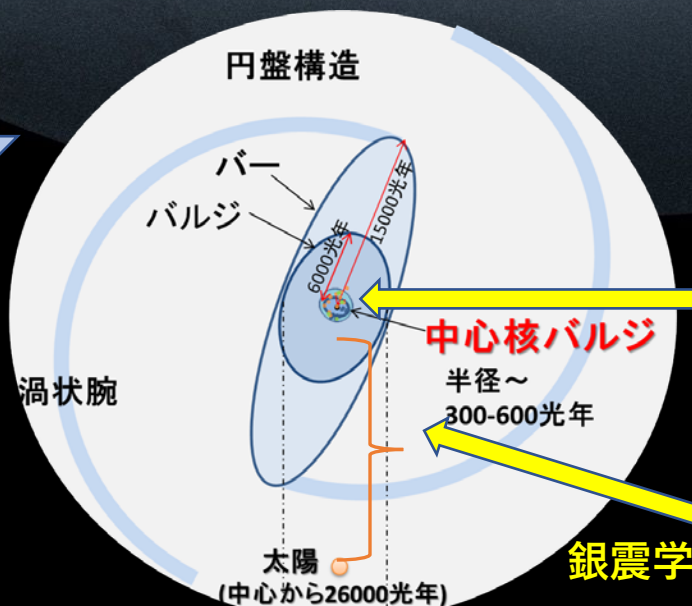
- ・全天サーベイ
- ・3回目公開(2020.12)の中間データでは、約15億個の星の位置天文情報。年周視差精度は明るい星で20~30μas

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

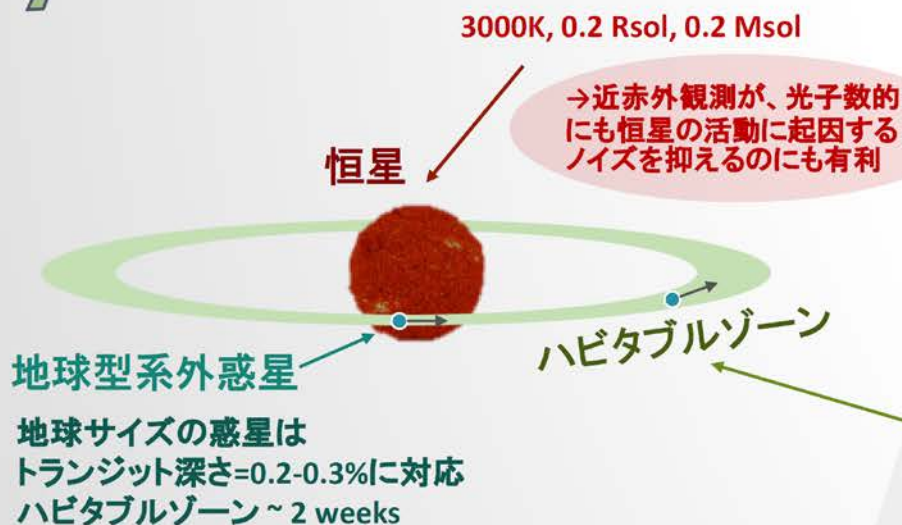
高頻度長時間モニター可能

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

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

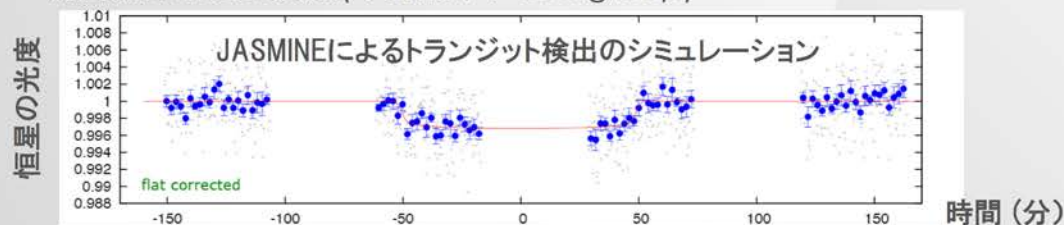
JASMINEの位置天文観測に要する性能があれば、生命探査に適した惑星発見の可能性あり！
 日本で衛星による系外惑星探査観測は初めて！
 (JASMINEでのみ狙えるターゲットであり、他の衛星プロジェクトに対し有利)

精密測光によるハビタブルゾーン地球型惑星検出

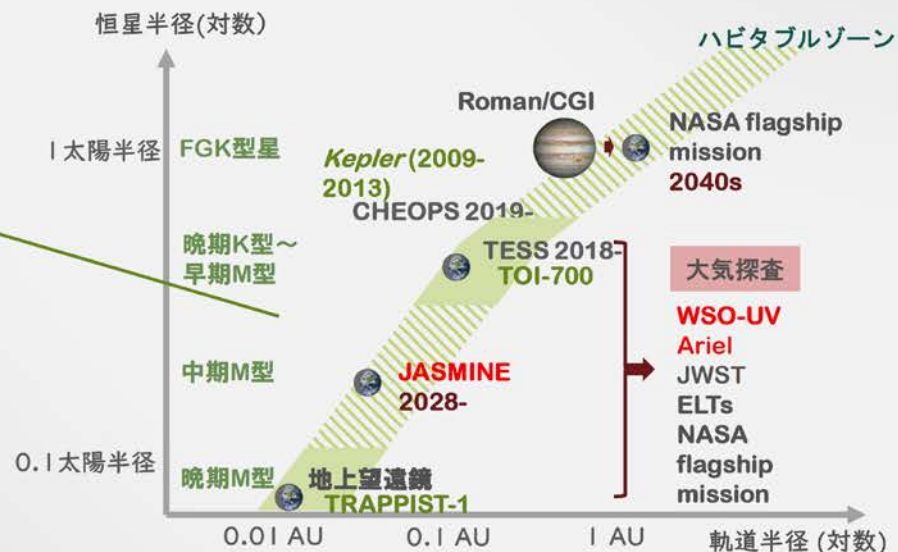


→宇宙からの連続精密測光の必要性

精密測光手法の開発(平野照幸、e2e group)



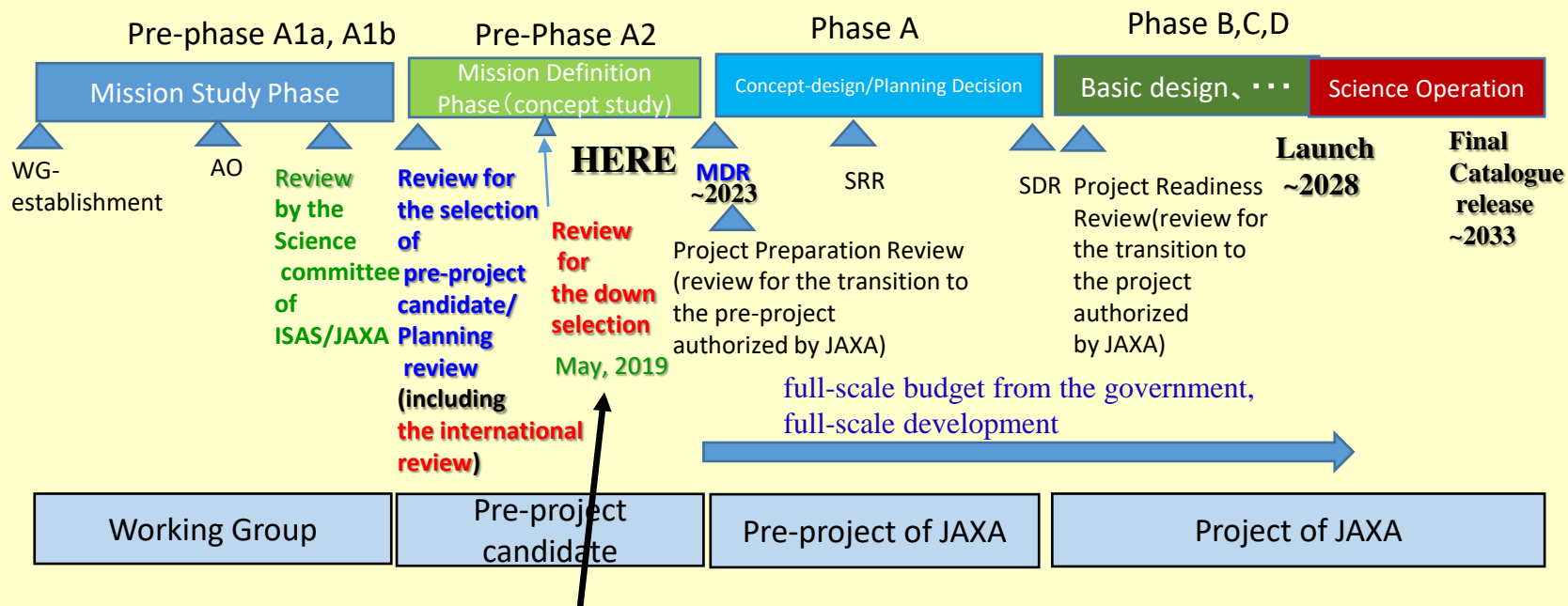
下図:恒星の大きさによりハビタブルゾーンの位置が異なる. 斜線部は未探査領域



→JASMINEで他のミッションでは難しい領域を探る

スライドオリジナル 河原氏(東大)作

3. 開発段階と審査過程(JAXA)



JAXA宇宙研の公募型小型計画3号機

★宇宙基本計画工程表(令和3年度改定)

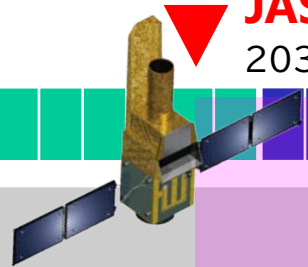
内閣府宇宙政策委員会→

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

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)



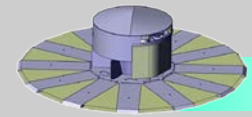
位置天文観測

- 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(?)

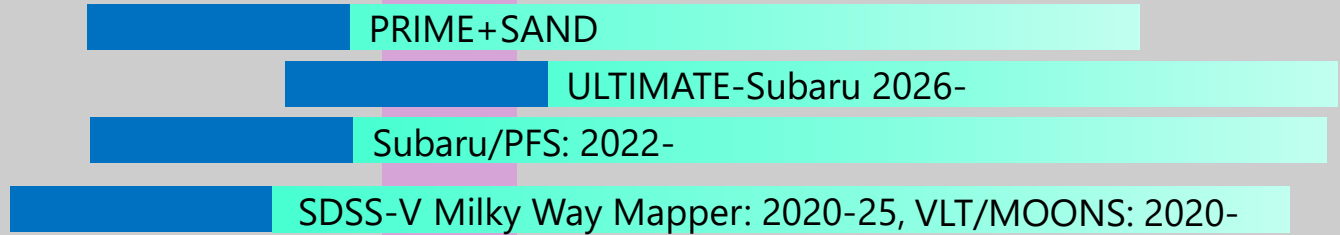


Gaia: 2013-25(?)



GaiaNIR: 2045(?)-

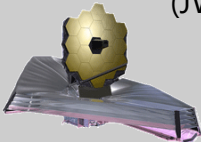
地上観測とのシナジー
(可視光・赤外線)



- 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がある
サンプル数の拡大

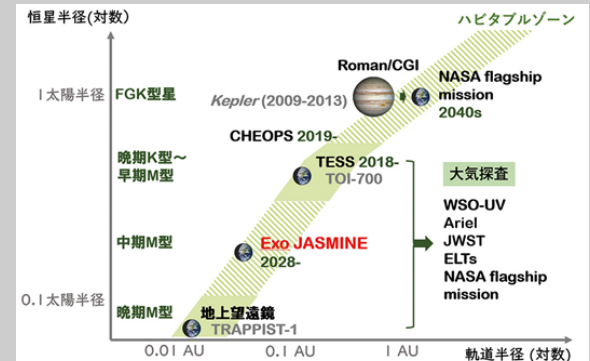
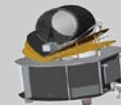
系外惑星探査



JWST: 2021-2031(?)

ARIEL: 2028-2032(?)

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



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 **H4RG(Teledyne社)**

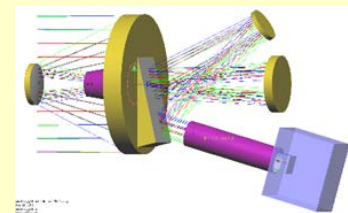
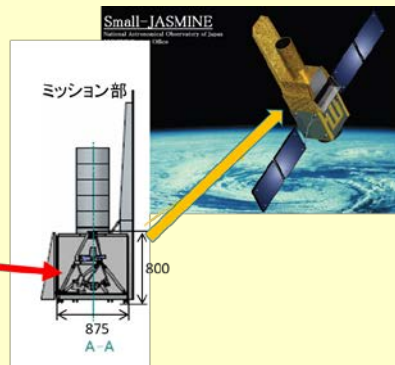
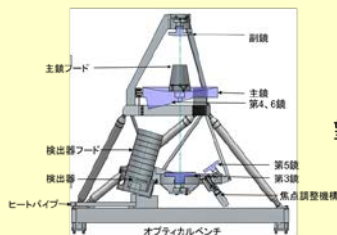
アストロメトリ用観測波長: 1.1~1.7ミクロン → **1.1~1.6ミクロン**

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)



**国産赤外線センサー
の宇宙用化開発へ
切り替え**



○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(高度約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

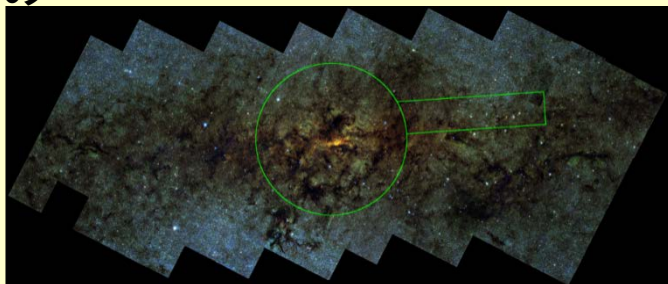
約50分間の非観測時間、 **銀河中心方向の観測領域**

そして再度 約50分間の

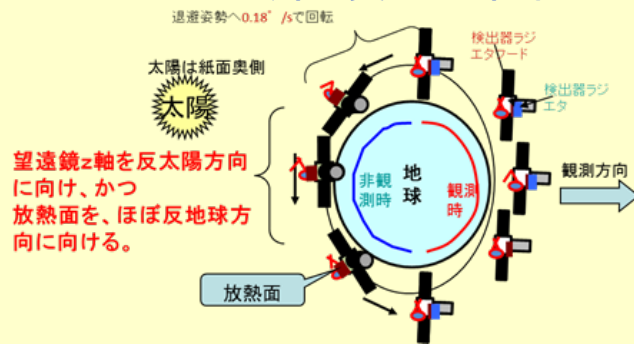
連続撮像データ。

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)

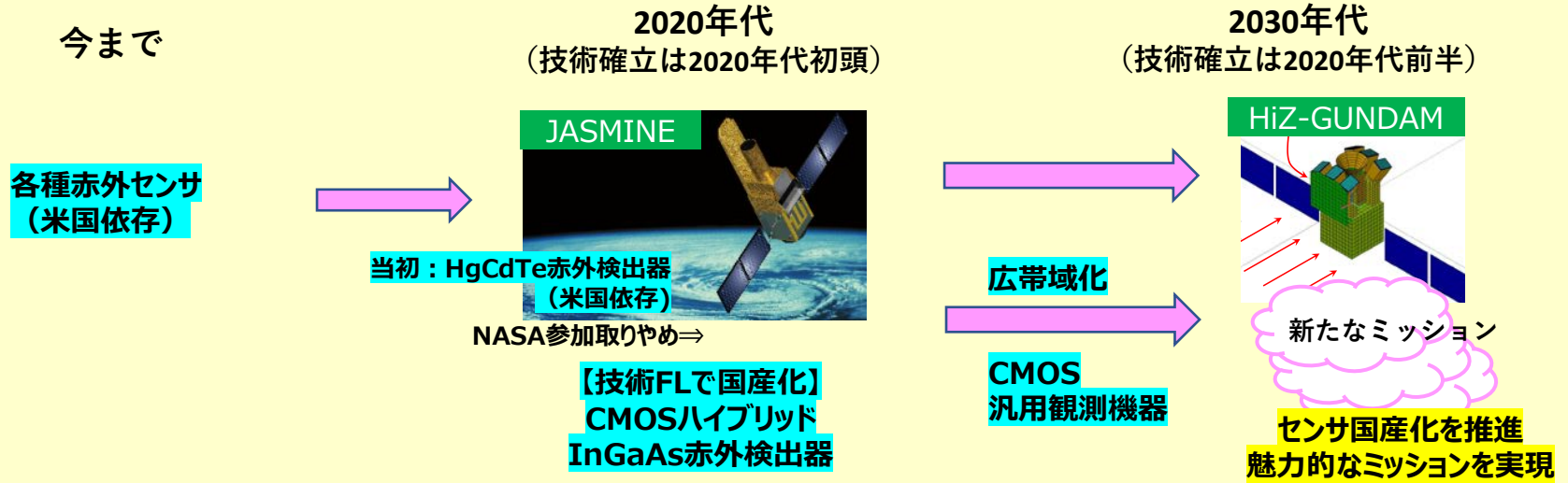
| | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 画素数 | 1280×1280 |
| 画素サイズ | 15μm×15μm |
| イメージエリア | 19.2mm×19.2mm |
| 出力ポート | 2ポート or 4ポート |
| 読み出し時間 | 4.2秒 or 1.0秒 (200k pix/s/portの時) |
| 読み出しノイズ ・ダブルサンプル ・マルチサンプル | 約10e- 約4e- |
| 暗電流 | |

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

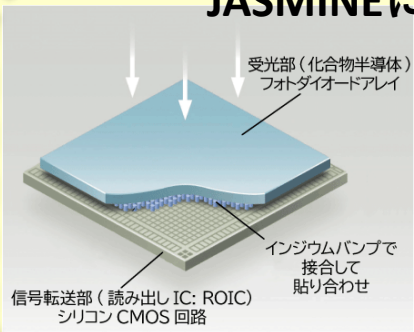
* 内閣府宇宙政策委員会宇宙科学・探査小委員会(2021.11.12)資料 appendix(第47回宇宙科学・探査小委員会ISAS報告資料)より抜粋(一部変更)

- 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)

JASMINEに向けた技術開発



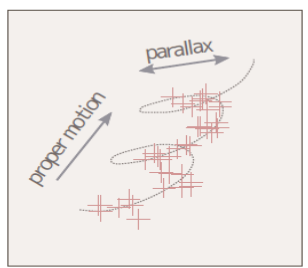
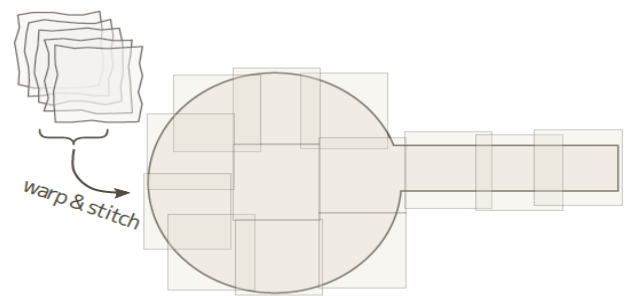
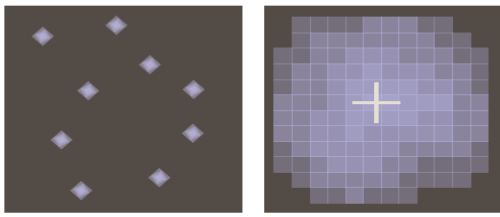
近赤外線波長域での多様な宇宙科学・探査ミッションへの応用

幅広い波長帯の検出器

汎用な宇宙用観測機器

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。また、測光精度の評価を行った。
 - ✓ 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)

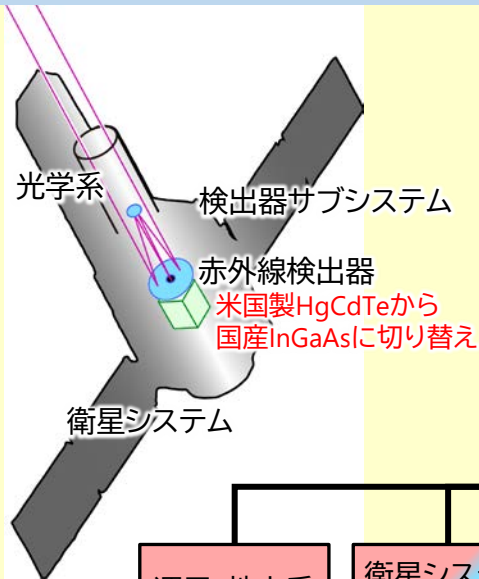
③ さらに現実に起こりうる(天体起源等の)擾乱源を考えた評価

- 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

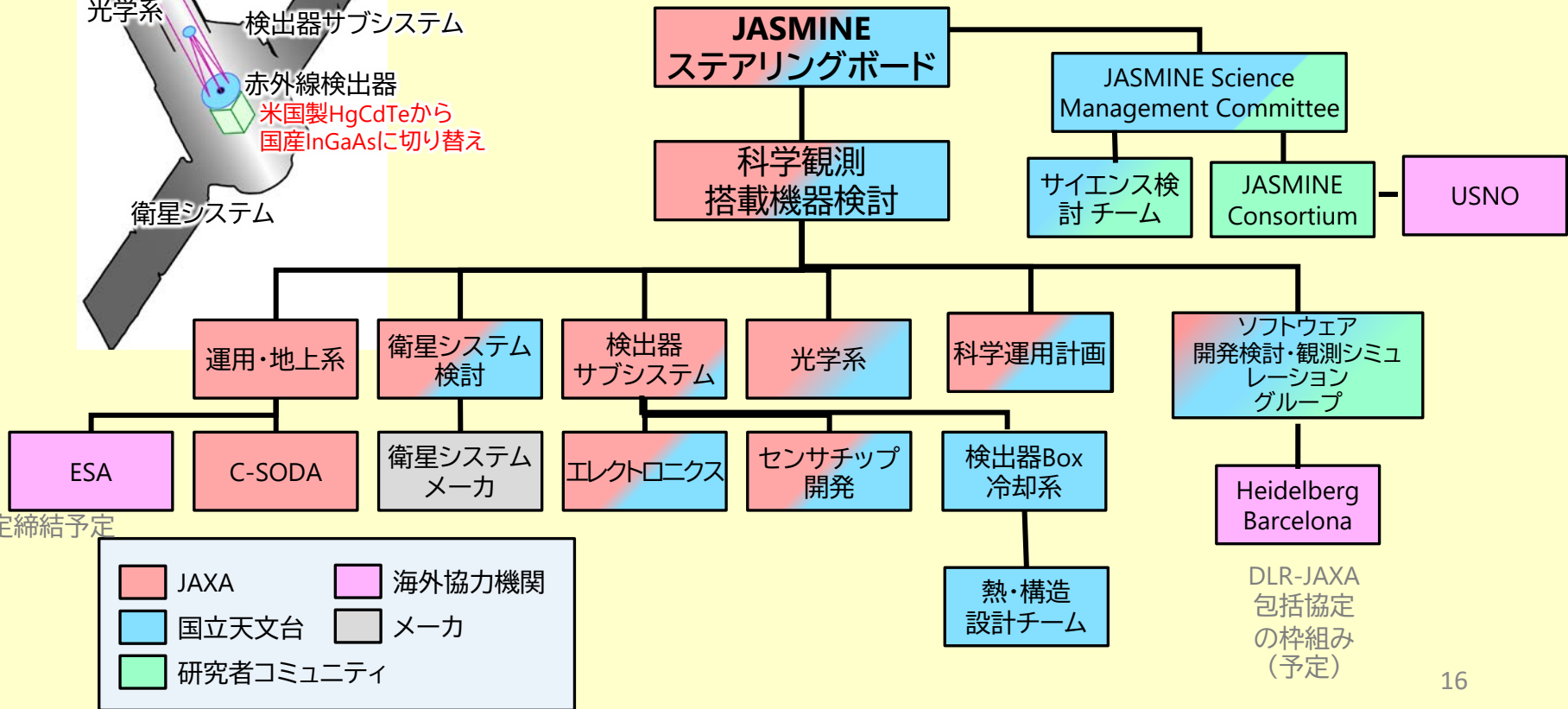
④ 実データによるノイズの推定 (打ち上げ後の実際の観測データ)

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)



7. 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 助教公募選考中

プロジェクト長: 郷田直輝
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、宮川浩平(22.4.1~)

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



★ GREX-PLUSとのシナジー

1. GREX-PLUSによる天の川銀河探究

銀河系中心はおもしろい！

多様な天体と複雑な天体現象

- (i) 近赤外線と中間赤外線観測を合わせた、星、星形成領域やガスの運動、分布など中心核活動の探究(X線・電波観測とも連携)

← GREX-PLUS

- (ii) 近赤外線

→ 恒星の運動

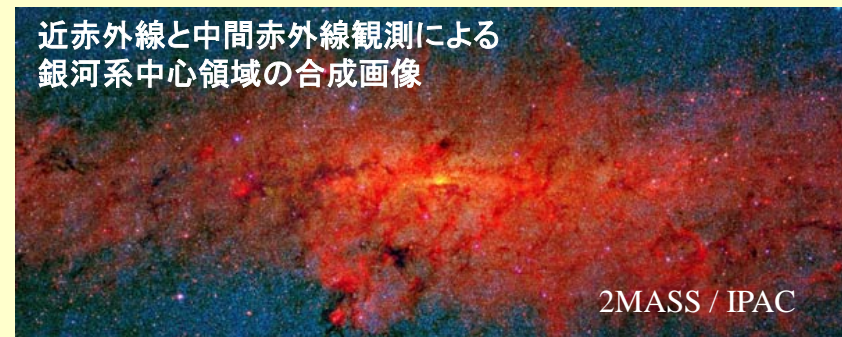
→ 銀河中心考古学

BH探査(BH連星、重力レンズ)、ダークマター探究 etc.

← JASMINEからのリレー



チャンドラX線観測衛星と南アフリカ共和国の電波望遠鏡の20年以上にわたる370の観測データをつなぎ合わせた画像



2MASSのJバンド(1.25ミクロン)を青、同じく2MASSのKsバンド(2.17ミクロン)を緑、そしてMSXのAバンド(6~11ミクロン)を赤として、3色疑似カラー合成の画像。銀河面を中心に、縦2度、横5度の範囲。 AstroArtsより：
<https://www.astroarts.co.jp/news/2000/08/14-2mass-msx/index-j.shtml>

★ GREX-PLUSとのシナジー(続)

GREX-PLUSによる位置天文観測？！

◎ K-バンドでの銀河系中心領域の(銀河面にそって)
より暗い多数の星の位置天文測定

(i) GREX-PLUS単独での高精度位置天文測定

JASMINEのデータ解析手法、コードの適応

* 仮に主目標の1つにする→ミッション要求→システム要求:技術、コストの問題！？

現実的なのは

* 従来の主目標→ミッション要求→システム要求→システム仕様案
→システムが満たす範囲の精度で測定(どの程度の精度か要検討)

精度に応じて必要な校正 ← JASMINEの
e2eシミュレーションコード
を活用

(ii) JASMINEデータをcalibrationに使い、高精度を達成

参考情報：～25 μ sの精度を達成するためには？

矢野氏(JASMINEプロジェクト/NAOJ)の検討結果
いずれも非常にアバウトな評価です。

* 近赤外線検出器(2.0-2.6 μ m):2個 ← 仕様案

* 視野サイズ: 148arcmin² (8.8×8.8分角×2個) ← 仕様案

* PSFとピクセルの比: $\frac{\lambda}{D} \cdot \frac{f}{w} = 1.53$ ← 仕様案 ← 星像中心推定に適している

(λ : 中心波長、D:口径、f:焦点距離、w:ピクセルサイズ)

* 指向安定性: ～100mas/20秒 ← 仕様案参照(100mas/300秒)

* 熱構造安定性: ～1nm/5時間(焦点面上の星の位置ずれ変動)
(→ 望遠鏡周辺の温度変動 ～0.1K/5時間) ← 仮の想定)

観測例

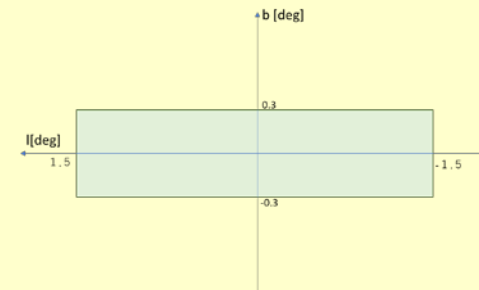
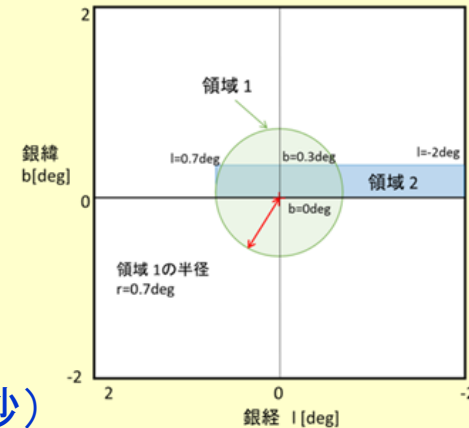
銀河系中心領域のRed Clump(RC)が
対象範囲に入る

(1) **K<15 mag**, 観測領域: $-1.5^\circ < l < 1.5^\circ$, $-0.3^\circ < b < 0.3^\circ$
5年間の運用(想定)、春秋期に各々14日間(28日間/年)

(2) **K<14 mag**, 観測領域: $-1.5^\circ < l < 1.5^\circ$, $-0.3^\circ < b < 0.3^\circ$

(i) 5年間の運用(想定)、春秋期に各々7日間(14日間/年)

(ii) 3年間の運用(想定)、春秋期に各々12日間(24日間/年)



参考情報

1. 観測手順(例)

- 観測例(例5)をもとに観測手順を記す。
- 20s積分撮像20回(400s)
- ポインティングを変更しながら以上作業を繰り返し42回程度行うことで観測領域内を覆う(以上の操作に要する時間は5時間程度)。
- 観測領域を覆う撮像を680回程度繰り返す。

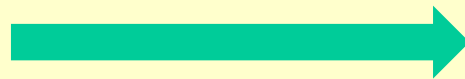
2. システムへの要求(例)

| 事項 | 要求値 | 備考 |
|----------------|------------------------|--|
| 指向安定性要求 | 100mas/ 20s | GREX-PLUSの姿勢安定要求100mas/300秒。これを満たせばここでの試行安定性要求は満たされる。 |
| 焦点面変動量 | 1nm / 5h (焦点面) | 5hは観測領域 $ b <0.3, <1.5$ を1面撮像する時間。系統誤差(補正残差)は25 μ asに対して小さい |
| 温度安定性要求 | ~ 0.1 K/ 5h | 5hは観測領域 $ b <0.3, <1.5$ を1面撮像する時間。最終的には焦点面の変動で決まり、この値は目安。 |
| 膨張率 | 10の -7 乗以下 (望遠鏡部) | 望遠鏡の構造、温度安定性と関連している。最終的には焦点面の変動量で決まり、この値は目安。 |
| 姿勢制御精度(絶対指向精度) | ~ 0.01 deg | 検出器視野角0.07degに対して十分小さい事。 |
| 姿勢マヌーバ+静定 | 0.07degを30s | 検出器半分の角度を30sでマヌーバできる事。 |

★ GREX-PLUSとのシナジー (続)

2. 系外惑星探査→生命探査へ

測光観測



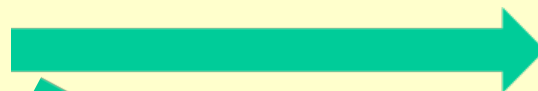
分光観測

トランジット観測による
候補惑星の探査

大気やバイオマーカの観測
による個々の惑星の特徴付け

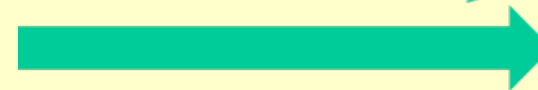
JASMINE

なるべく多数の
候補惑星
を見つける



JWST
WSO-UV
ARIEL

JASMINEのlegacyを
活かした系外惑星
探査専用の公募型小型衛星



GREX-PLUS

★ GREX-PLUSとのシナジー (続)

3. JASMINEの技術的legacyの活用

* 衛星システム、観測システムの開発、試験の経験

* 国産赤外線検出器の開発: より長波長へ(?!)

★まとめ

JASMINEからGREX-PLUSへ

サイエンス & 技術 (装置開発 & データサイエンス) の
リレー → うまく連携を！



国内での人材の育成、技術の継承！！

よろしく御願いたします

Jasmine

