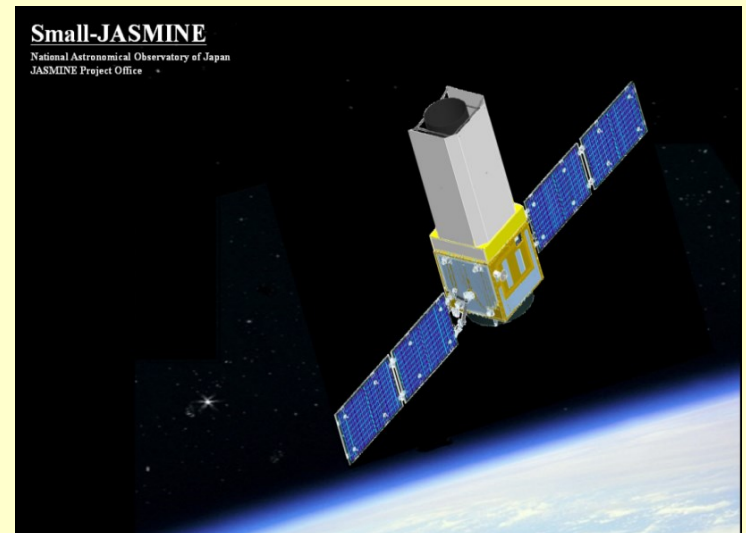
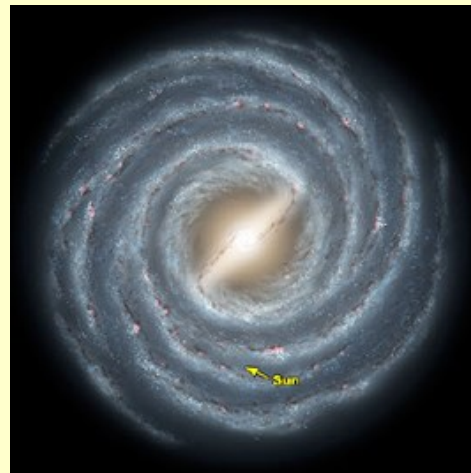


小型JASMINE計画

(JASMINE: 赤外線位置天文観測衛星)

---Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration---

国立天文台JASMINE検討室 郷田直輝
他 JASMINE-WG



§1. 序章

★位置天文観測とは？：

星の天球面上の位置とその時間変化を測定。
らせん運動

位置(方向)、年周楕円運動＋固有運動、

(場合によって) 特殊な動き

観測終了後カタログを作成。

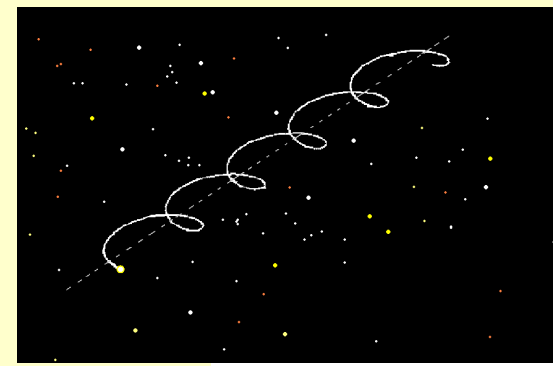
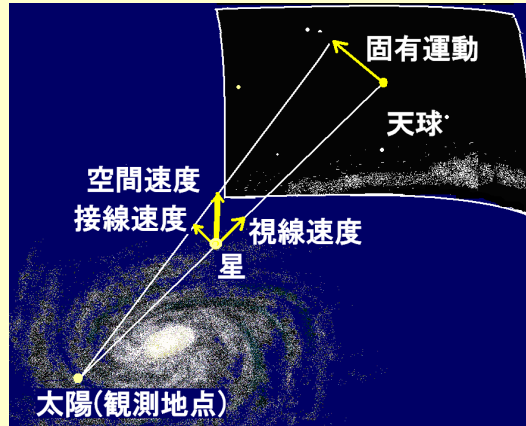
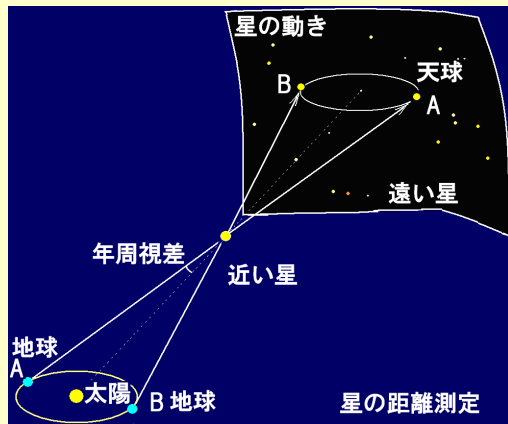
5つの位置天文パラメータ: $\alpha, \delta, \varpi, \mu_\alpha, \mu_\delta$

(赤緯、赤経、年周視差、(赤緯方向の)固有運動、(赤経方向の)固有運動)

＋(らせん運動からの)ずれ

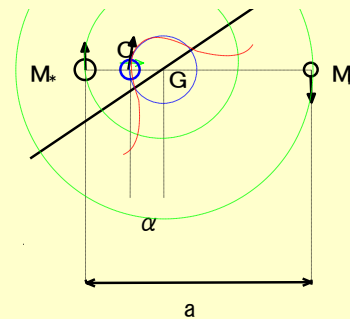
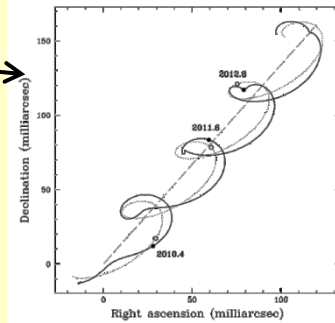
年周楕円運動の長半径
(年周視差) ⇒ 距離

固有運動＋距離 ⇒ 接線速度

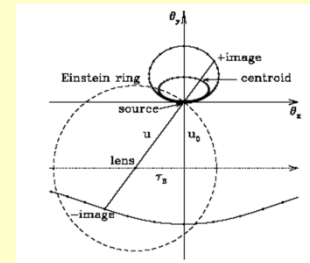


らせん運動からの“ずれ”

惑星系、連星系、
重力レンズ効果
など



連星系(惑星系)



重力レンズ効果

星の重要な基本情報

— 位置天文観測で分かる事 —

年周視差

距離

星の**本当の明るさ**、放出している**本当のエネルギー**
距離はしごのベース=>遠方天体の距離の推定

天球上の位置+距離

星の3次元空間
分布

天の川銀河構造の**サイズ**、**形状**、**構造要素**など
星団の**サイズ**、**形状**など

固有運動+距離

星の**接線速度**

(視線速度に垂直方向)

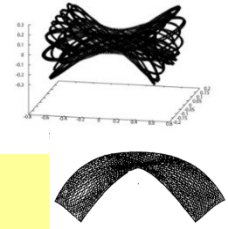
(視線速度情報を加味して) **星や星団の3次元運動**

星の3次元

空間分布+運動分布

重力場や位相分布関数の情報

* (観測できていない) 星や**ダークマター**の
力学構造、軌道



星、星団、銀河系構造の形成、進化の痕跡

見えないものが見える！

特殊な運動(らせん運動(年周楕円
+固有運動からのずれ)

**連星系の軌道、連星の物理情報、系外惑星探査と惑星
の物理情報、重力レンズ天体の物理情報**など

§ II. 今後の主な位置天文観測計画

★可視赤外線 衛星計画

○2020年までの打ち上げを予定、目標:

- * **Gaia**: 可視光(Gバンド:0.33~1.0ミクロン)、全天サーベイ(2方向同時スキャン観測)、
精度: $7\mu\text{as} \sim 300\mu\text{as}$ (星の等級や色、天球上での位置に依存)
 $6\text{mag} < G < 20\text{mag}$ (明るい星は測定できない)、約10億個の星

$$G = V - 0.0257 - 0.0924 \cdot (V-I_C) - 0.1623 \cdot (V-I_C)^2 + 0.0090 \cdot (V-I_C)^3$$

2013年11月17日~12月5日の期間中に打ち上げ予定→5~6年間のサイエンス運用

最終カタログは2021年に公開予定(それまでに、打ち上げをしてから、22、28、40、65ヶ月後に中間リリースを予定)

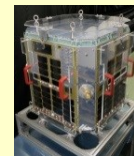


- * **Nano-JASMINE**: zwバンド(0.6~1.0ミクロン)、全天サーベイ(2方向同時スキャン観測)、
2014年12月打上予定、精度:(単独では)~3mas(zw<7.5mag)、



(ヒッパルコスカタログと組み合わせると)固有運動~0.1mas/y、年周視差は0.75mas

データ取得: zw<9mag (明るい星の測定はGaiaの補足になる期待)、約50万個の星



◆Gaia+Nano-JASMINEデータをマージしたアーカイブを作成予定(ヨーロッパで検討予算が採択された)

- * **小型JASMINE**: 近赤外線(Hwバンド:1.1~1.7ミクロン)、

単一方向観測によるframes-link法を用いた、銀河系中心付近($3^\circ \times 3^\circ$)のサーベイ
+特定天体(CygX-1、ガンマ線連星、系外惑星等)観測、

精度: $10\mu\text{as} \sim 70\mu\text{as}$, Hw<12mag(バルジ方向は下限が9mag、多方向は調整可)

約10万個の星、2018年度打ち上げ目標、高時間分解能も他にはない特徴



○2020年以降の打ち上げを目標

- * (中型)JASMINE, WISH, WFIRST, Post-Gaia, ... (マージ、共同!?)

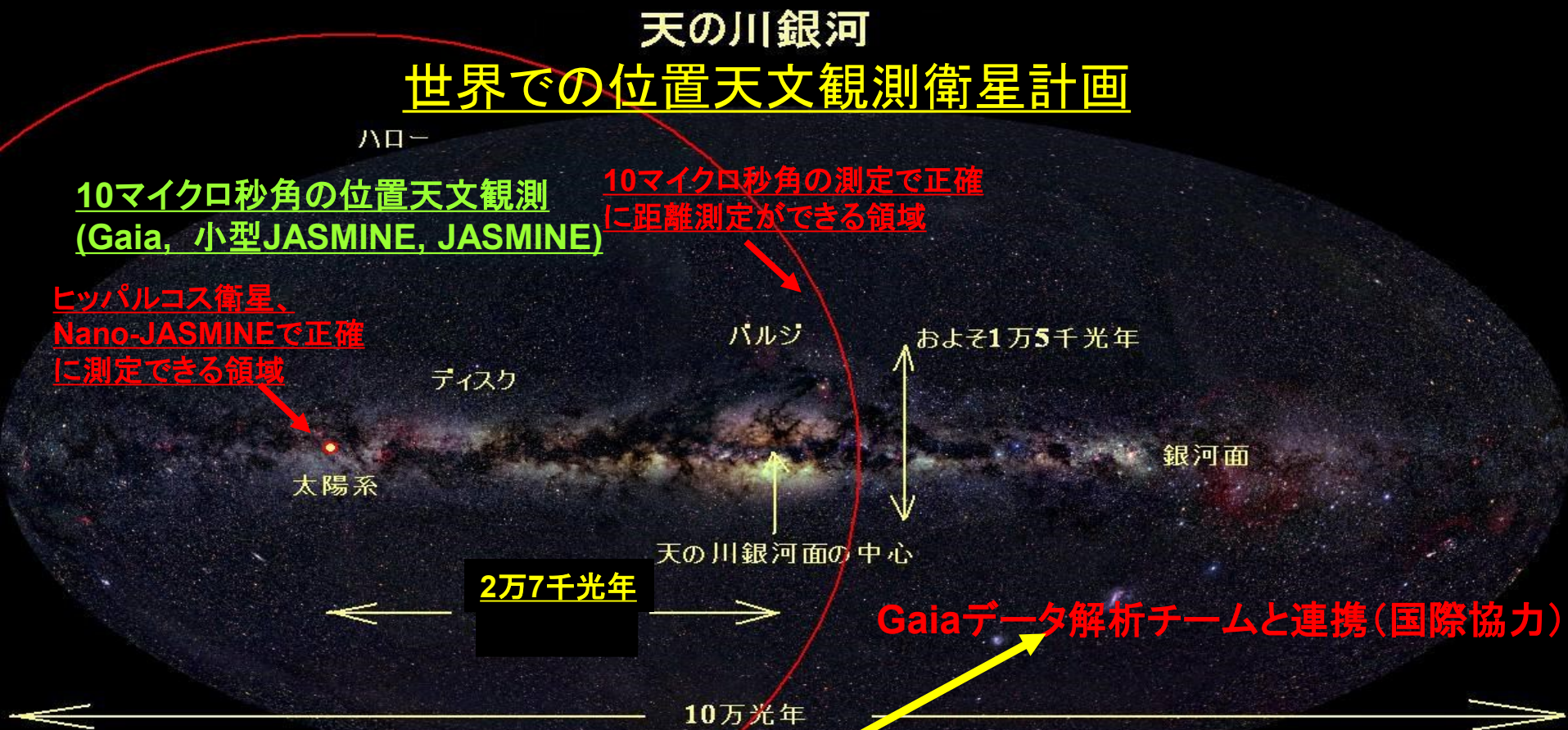
地上計画: TMT(IRIS):ブロードバンド (Y,Z,J,H,K)、狭視野($17'' \times 17''$)、相対精度: $30\mu\text{as}$

★電波

SKA: 1.6GHz OHメーザー源など、~10 μas * 日本でも位置天文のWGを形成し、サイエンスを検討中

★ 今後の位置天文観測衛星計画

- * 小型JASMINEは**世界で唯一の近赤外線位置天文衛星計画**(IAUのCommission8から推薦)
銀河系中心方向付近のバルジで高精度で測定できる星の数は可視光観測のGaiaが数個レベルに
対して、3桁程度多い。
- * 小型JASMINEは、同一天体をGaiaよりかなりの高頻度(90分毎に1回)で測定→**時間分解能が高い**



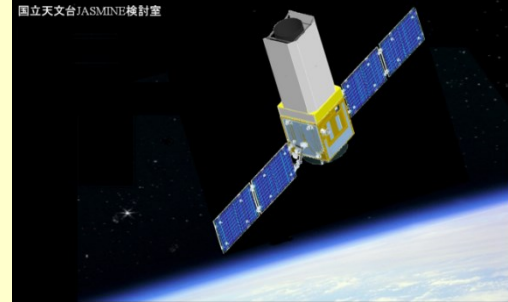
2014年：Nano-JASMINE(全天、zwバンド、精度はヒッパルコス程度:~3mas)

2013年：Gaia (ガイア(ESA)：ヨーロッパの全天可視光位置天文観測衛星、7~300 μ as)

2015年(cancel)：JMAPS(USNO: 全天、Iバンドサーベイ、精度はヒッパルコス程度：1mas) → **検討協力**

2018年頃：小型JASMINE(赤外線観測：銀河系中心付近のバルジ方向+特定天体方向、10~70 μ as)

2020年代：(中型) JASMINE(赤外線観測：バルジ全域方向、10 μ as)



§ III. 小型JASMINE計画概要

小型科学衛星(3号機相当)@ISASのミッション募集へ応募予定 (2013年度)

標準バスの使用、イプシロンロケットでの打上が条件。

打ち上げ目標(3号機の場合): 2018年度頃, 予算: 小型科学衛星の予算枠内であることが条件
(ミッション部: 10億円、バス部(共通の標準バスを使用): 約25億円、打ち上げ(イプシロンロケットを使用): 約38億円)

1. 小型JASMINEの仕様

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: H_w-band (1.1 ~ 1.7ミクロン)

photometry用観測波長: J, Hバンド、HgCdTe (1k × 1k) 2個

衛星重量: 333.6kg

観測精度: 位置、年周視差 10 ~ 70 μ as

固有運動 10 ~ 70 μ as/yr

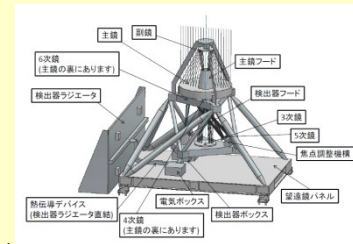
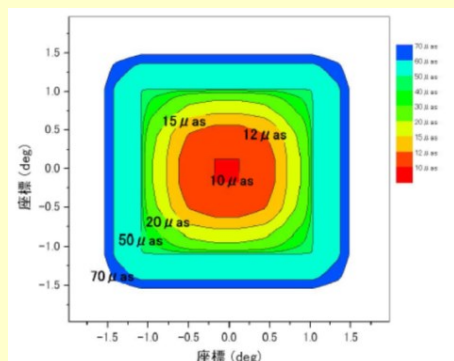
(H_wバンドで11.5等級より明るい星に対して達成)

特定領域サーベイ: 銀河系中心付近の3度 × 3度の領域方向
(約10万個の星数)

+ 特定天体方向 (候補天体例: Cyg X-1、 γ 線連星系、系外惑星系など)

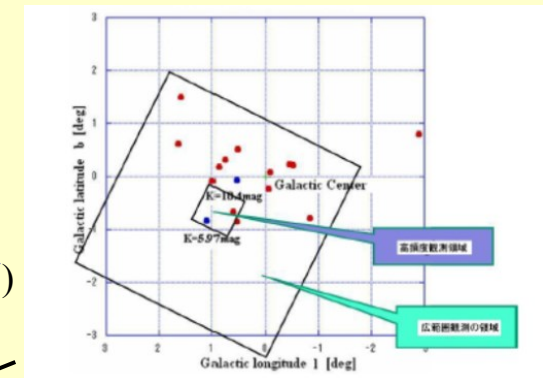
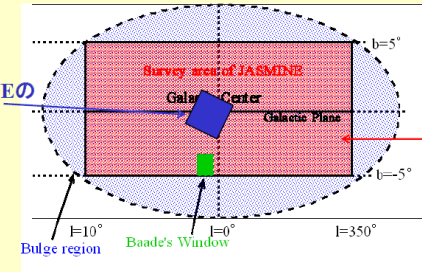
観測期間: 1年間 ~ 3年間程度

年周視差の精度マップ



ミッション装置

小型JASMINEの
サーベイ領域



観測領域候補(銀河系中心付近)

* 領域はまだfixしていない。
今後のサイエンス検討など、
皆様からの意見も参考にして、
fixしていく予定

小型JASMINEの視野に撮像される画像
@銀河系中心付近(2MASSを参考)

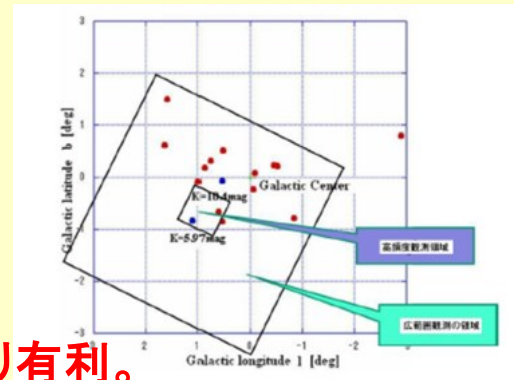
H

2. 小型JASMINEのカatalogの特徴

○位置測定精度: $10\mu\text{ as}$ を近赤外線で達成可能

→ダストによる吸収が大きいところ(バルジ方向)、赤い星、
星形成領域の観測はGaiaより有利。

バルジの星に対しては、高精度な星の観測個数で圧倒的にGaiaより有利。



* 中心付近($3^\circ \times 3^\circ$): ~ 1 万個/平方度 (領域はまだfixしていない)

年周視差の誤差が10%以内(必要条件)

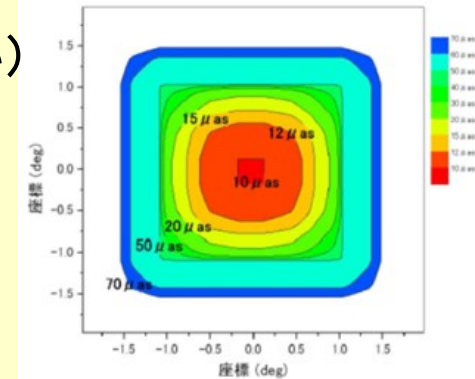
可能なバルジに属する 星の数(見込み)

小型JASMINE(中心付近)の観測領域で比較

小型JASMINE: ~ 1 万個 vs Gaia: 数個程度

高精度($< \sim 70\mu\text{as/year}$)な固有運動が測定できる星の個数もGaiaより大

皆様からのサイエンス提案
をもとに検討予定



○同一天体を観測する観測周期が短い(**90分に一度**: Gaiaは2ヶ月に1度程度)

→時間分解能が高い→**短い周期変動現象(連星や惑星系、変光星など)に
対応可能**

* 候補: CygX-1(植村氏(広大)等と検討中)

ガンマ線連星(山口氏(NAOJ)と検討中)

系外惑星(須藤氏(東大)と検討中)

候補例
LS5039
J1018
LSI+61

○銀河系中心方向以外の観測も可能

* 冬期と夏期(6ヶ月)、観測時間を割り振ることは可能。

→興味ある特定天体の観測の対応も可能

(衛星の熱環境等で観測方向に制限はある)

○ $H_w < 11.5$ で測光精度1% 以内(7秒積分)

→測光データを用いたサイエンスの展開も可能

皆様からのサイエンス提案や
プロジェクト連携の提案をもと
に検討予定

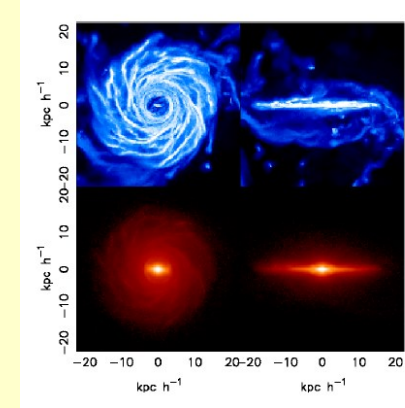
* 候補: _SgrA*の赤外線モニター

→QPOの存在→巨大BHのスピン情報
本間氏(NAOJ)が検討中

3. 小型JASMINEで期待される科学的成果例

概要:

- 世界に先駆けて、星の3次元的位置や運動情報を用いた銀河系中心付近での**バルジ構造とその形成史、バルジ内の星形成史、巨大BHの進化、中心付近での星団形成、星間吸収物質の3次元分布、変光星等**の研究進展。
- X線連星(例: Cyg X-1)やガンマ線連星**の軌道要素決定や構成天体の物理的特徴、**系外惑星探査、星形成領域**などの**特定天体をターゲット**にし、高時間分解能と高精度な運動情報を活かした科学的成果。



小型JASMINEサイエンスワーキンググループ(JASMINEチームメンバー以外からの有志により構成)

代表: 梅村雅之(筑波大)

バルジ班: 長島(長崎大、チーフ)、

羽部(北大)、岡本(北大)、馬場(東工大)、河田(MSSL, ロンドン大学)、斉藤(東工大)、榎(東京経済大)、泉浦(NAOJ)、井上(KASI)

巨大ブラックホール・銀河中心班: 梅村(筑波大、チーフ)、

谷川(理研)、藤井(NAOJ)、本間(NAOJ)

コンパクト天体班: 植村(広大、チーフ)、

川口(山口大)、野上(京大)

星班: 西(新潟大、チーフ)、

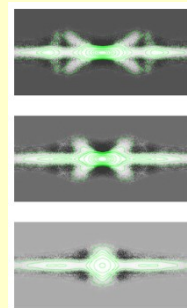
宮田(東大)、田辺(東大)、松永(東大)、板(東北大)、廣田(NAOJ)、中川(鹿児島大)

連星系・重力レンズ・系外惑星班: 浅田(弘前大、チーフ)、

住(阪大)、福井(NAOJ)



**ご興味がある皆様は、
どなたでもご参加を！！**

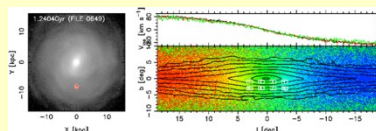


三軸不等
楕円体の力学
構造の初解明

★小型JASMINEで期待される科学的成果例(続き)

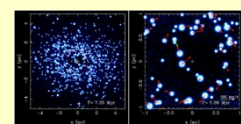
1. バルジの正体の解明: 銀河系バルジのタイプは? その構造形成史は?

- * バルジ星の3次元分布と運動情報 → **バルジの力学構造(X-shape!?)** ⇒ **バルジの重力ポテンシャル**
classical bulge vs pseudo bulge → 形成原因の違い → 銀河形成論、進化論にも影響
- * バルジ星の色一等級図(+化学組成) → 星形成史



2. 銀河系中心付近の物理

- * **巨大ブラックホール形成**の痕跡 → 中心付近の星の速度分布に影響
- * 星団の運動 → 星団の起源、中心付近の重力場情報
- * 内部バーの存在 → 中心付近での星形成への影響
- * SgrA*の赤外線モニター → QPOの存在 → 巨大BHのスピン情報



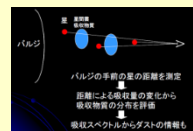
3. コンパクト天体

- * **X線連星の軌道要素決定** → **研究史上の「事件」** → 降着円盤やジェットの基礎的な物理に迫る。
有力候補天体: Cyg X-1: ($l=71^\circ$, $b=+3^\circ$)、周期5.6日 (**Gaiaでは観測不可能**)、
伴星: $m_v \sim 9$ mag (小型JASMINEで検出可能)、位置変化は、**40~50 μ 秒角** → 小型JASMINEで測定可能
- * **バルジ内の共生星X線連星やX線点源の解明**
- * **ガンマ線連星系の軌道要素解析によるガンマ線天体の解明** → **高密度星の正体判別**
放射モデルへの強い制限

候補例
LS5039
J1018
LSI+61

4. 系外惑星 探査 (アストロメトリ法による惑星の検出) + (既知の) 惑星の軌道要素決定

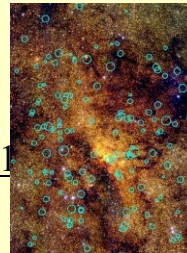
探査では、特に、**主星が低質量星($M_s < 0.1 M_{\text{sun}}$, $V-H > 7$ mag)の場合は、Gaiaより有利**。3ヶ月間で惑星を検出可能。 **褐色矮星周りの惑星が発見されればインパクト大。**



5. 重力レンズ: ワームホール探査! ?

6. 恒星、星形成 * オリオン星形成領域の3次元分布、星間減光物質の3次元分布と性質

- * バルジにあるミラ型変光星(赤いのでGaiaより有利)の年周視差、固有運動



4. 銀河系バルジに関するサイエンスの国際連携

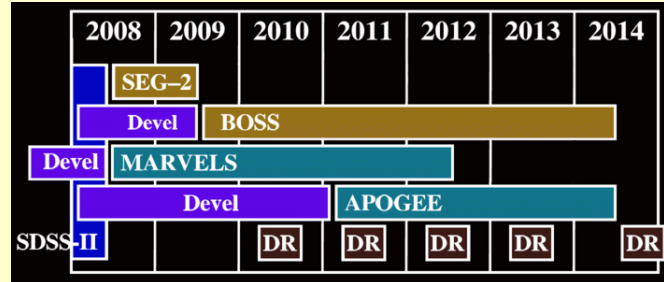
★ APOGEE Sloan Digital Sky Survey III

Gazing at the Inner Galaxy

The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment

PI: S. Majewski (UVA)

High-resolution H-band spectroscopic survey



2.5m telescope at the Apache Point Observatory →

Spring 2011 – Spring 2014

100,000 巨星 to magnitude H=12.5

バルジ星は7000個ほどを観測

R~20000- 30000, S/N~100

波長域 1.52-1.69 μm

velocity error 0.5 km/s

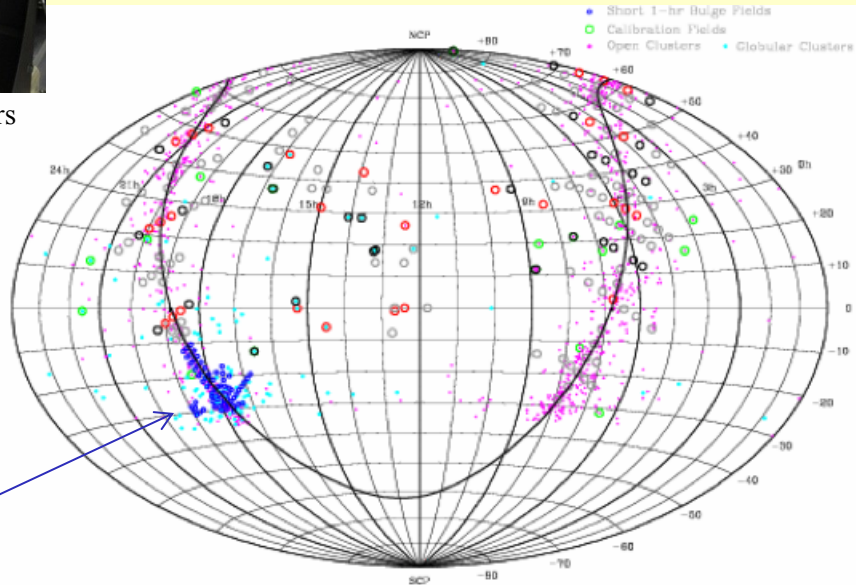
15元素を0.1 dexの精度で測定



APOGEE fibers



2.5m telescope



バルジ

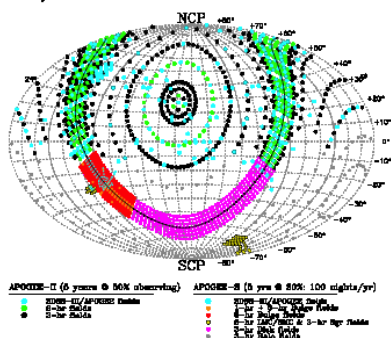
Component	All Stars
All	104,200
Thin disk	87,600
Thick disk	4,200
Halo	6,500
Bulge	6,900

APOGEE-2(South) (SDSS-IVのプロジェクト)



Steven R. Majewski (UVA), Ricardo P. Schiavon (Gemini), Carlos Allende Prieto (IAC), **Nobuo Arimoto (NAOJ)**, Martin Asplund (MPA), Beatriz Barbuy (IAG), Timothy C. Beers (NOAO), Jonathan Bird (OSU), Dmitry Bizyaev (APO), Michael Blanton (NYU), James Bullock (UCI), Joleen Carlberg (DTM), Jeff Carlin (RPI), Marcio Catelan (PUC-Chile), Cristina Chiappini (AIP, Geneva, INAF), Mei-Yin Cho (Academia Sinica IAA), Edgardo Costa (U. de Chile), Jeffrey Crane (OCIW), Ka'tia Cunha (UofA/ON-Brazil), Roelof de Jong (AIP), Damian Fabbian (IAC), Peter Frinchaboy (TCU), Jay Frogel, Anibal García Hernández (IAC), Ana Elia García Pérez (UVA), Doug Geisler (Concepción), Leo Girardi (Padova), **Naoteru Gouda (NAOJ)**, Andy Gould (OSU), Eva Grebel (Heidelberg), Fred Hearty (UVA), Vanessa Hill (Observatoire de la Côte d'Azur), Jon Holtzman (NMSU), Inese Ivans (UU), Paula Jofré (MPA), Jennifer Johnson (OSU), Kathryn Johnston (Columbia), Daniel Kelson (OCIW), Juna Kollmeier (OCIW), David Law (U. Toronto), Sara Lucatello (Padova), Suvrat Mahadevan (PSU), Sarah Martell (Heidelberg), Patrick McCarthy (OCIW), Andrew McWilliam (OCIW), Szabolcs Meszaros (IAC), Dante Minniti (PUC-Chile), Ricardo Muñoz (U. de Chile), David Nidever (UVA), Robert W. O'Connell (UVA), Chris Palma (PSU), Kaiké Pan (APO), Eric Persson (OCIW), Mark Phillips (OCIW), Marc Pinsonneault (OSU), Marina Rejkuba (ESO), Annie Robin (Besançon), Helio J. Rocha-Pinto (UFRJ), Ata Sarajedini (U. Florida), Ralph Schönrich (MPA), Mathias Schultheis (Besançon), Kris Sellgren (OSU), Steve Shectman (OCIW), Matthew Shetrone (HET), Michael Siegel (Swift-PSU), Joshua Simon (OCIW), Michael Skrutskie (UVA), Verne Smith (NOAO), Chris Sneden (UT), Jennifer Sobeck (U. Chicago), Mathias Steinmetz (AIP), Andrew W. Stephens (Gemini), Ian Thompson (OCIW), **Takuji Tsujimoto (NAOJ)**, Elena Valenti (ESO), Kim Venn (UVic), Sandro Villanova (Concepción), John Wilson (UVA), Gail Zasowski (UVA), Manuela Zoccali (PUC-Chile)

AS3 APOGEE-II & APOGEE-S Proposed Surveys
Preliminary Field Selection Plan



Component	APOGEE-1	APOGEE-2	APOGEE-S	Total
All	104,000	186,000	208,000	498,000
Disk	92,000	133,000	71,000	296,000
Halo	5,000	53,000	18,000	74,000
Bulge	7,000	—	80,000	96,000
Core bulge	—	—	19,000	19,000
LMC/SMC	—	—	10,000	10,000
Sgr dSph	—	—	3,000	3,000

The 2.5-m du Pont telescope at Las Campanas Observatory
およそ90000個のバルジ星を観測。2014年から観測予定 (~5年間)

さらに...APOGEE-2(S)とともに**VVV**(VISTA Variables in the Via Lactea: ZYJHKsでのバルジとディスクの測光サーベイ観測)とも連携を開始。**バルジ研究の強力なsynergyを目指す。**

* 10万ドルの予備費が付いたため、2013年1月に今後の協力強化を目指す、会合が Carnegie Observatoriesで開かれた。

* 現在、南半球に設置する、(APOGEE-1と同じタイプの)分光装置の制作費を NSFに提案中

小型JASMINEチームとAPOGEE-2チーム & SDSS-IV Collaborationとで、サイエンス連携のMOUを結んだ。

➡ **小型JASMINEの早期実現がますます期待されている！**

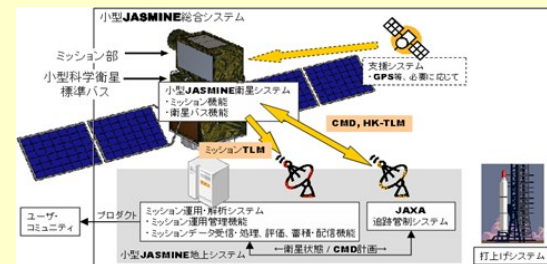
5.最近の進捗状況

検討がかなり進み、衛星の概念設計がほぼできて、ミッション達成に必要な技術的見込みやデータ解析手法の確立と実証、さらにコストや開発体制の見込みがついてきている。
 近いうちに小型科学衛星の提案募集があってもミッション提案できるように準備をしてきている。

★フィージビリティ:

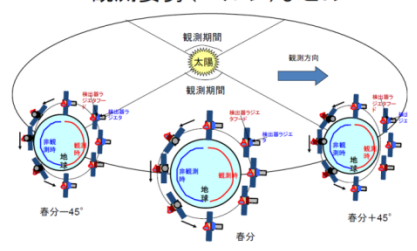
- * ミッション装置(望遠鏡、焦点面、電子モジュール)
- * ミッション部総合システム
(構造、軌道、姿勢、熱、通信、電力、コストなど)
- * バス部とのインターフェース

いずれも、ほぼ成立性の見込みがたってきた。
 実証が必要なものは、TRL4以上を達成の見込み

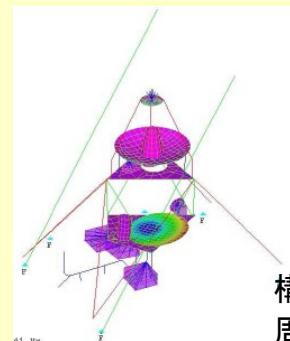


小型JASMINE衛星のシステム

観測姿勢(パルジ)まとめ

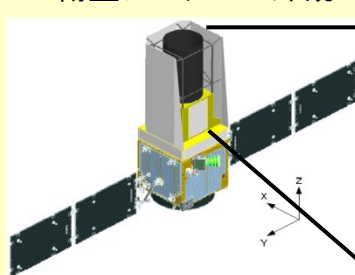


衛星の軌道と姿勢

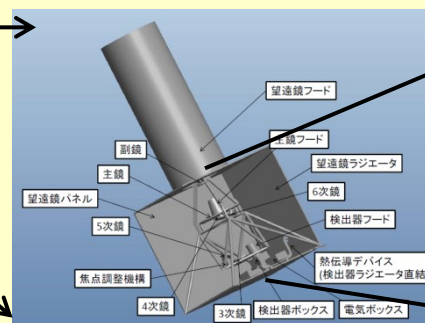


構造解析モデルによる
周波数応答解析

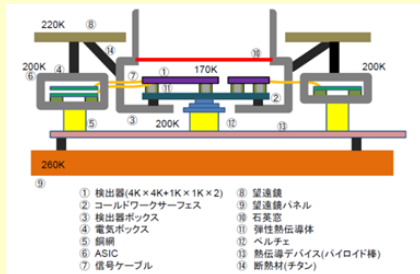
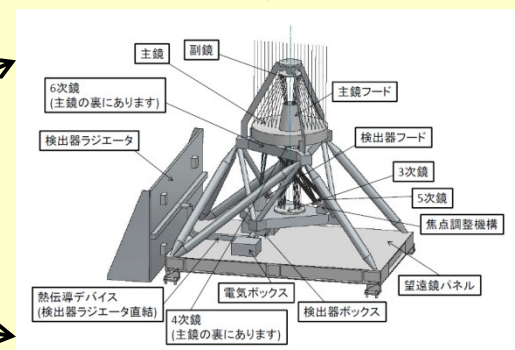
衛星システムの外観



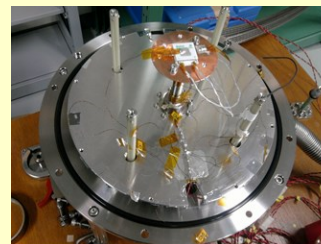
ミッション部内部概観



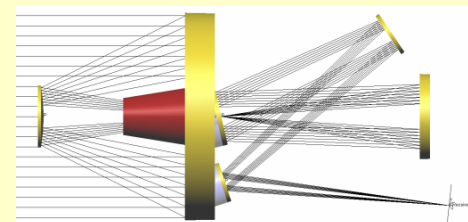
望遠鏡部概観



熱設計



珀ルチェ冷却試験

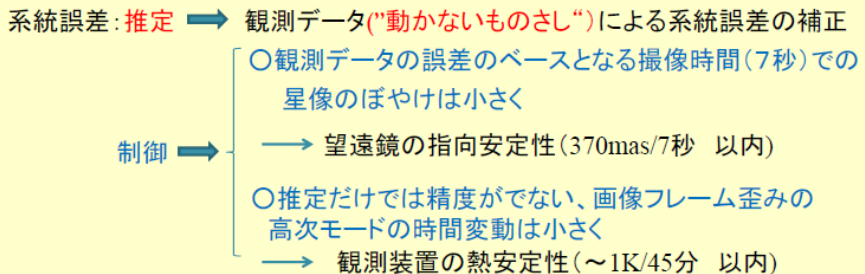


光学系
(コルシュ系: 3枚鏡)

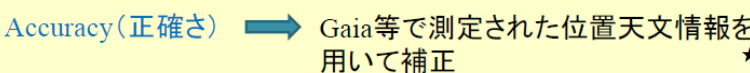
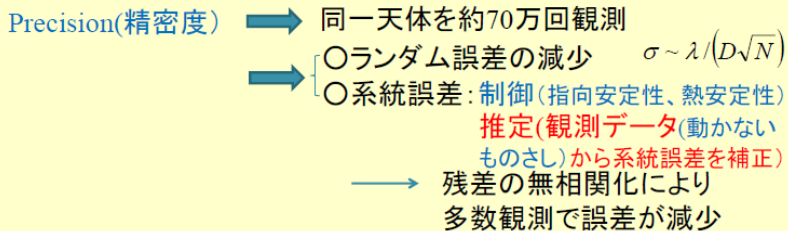
★データ解析手法の実証: 目標精度達成のための誤差対策法の確立

小型JASMINE: 1回の観測では達成できない高精度をミッション期間をかけて、
同一天体の多数回観測(約70万回)による統計処理で実現

目標精度達成のための手段: 技術とデータ解析



* 精度と推定について



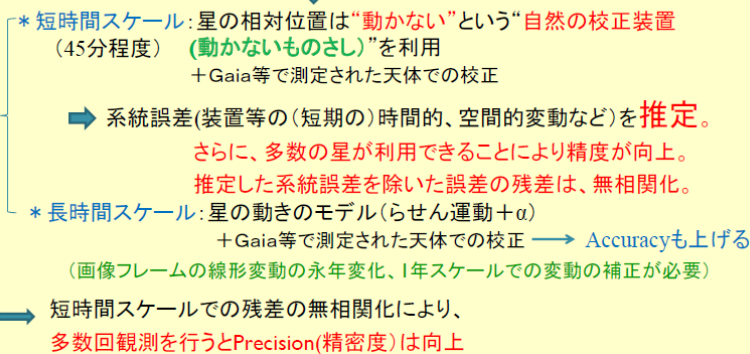
推定の方法: 動かない基準(ものさし)を使う
短時間で星は動かない。星間の角距離が“不変”。
不変性を利用し、観測装置歪み量補正。

* 長時間では星の動き(らせん運動)のモデルと同時解析可能(他で測定された校正天体も使用)
(基準は観測装置ではなく天空にある)

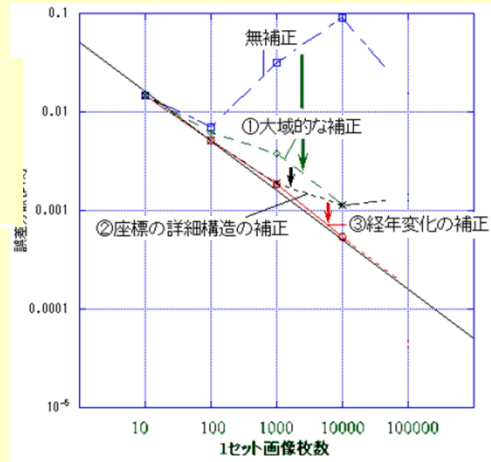
解析方法や検証手段:
統計数理研究所 石黒真木夫先生他
と相談の上、進めている。

◎観測データを用いた系統誤差の推定

- 局所的誤差(光学系や検出器による星像の形状に関わるもの)
*星像中心決定アルゴリズムにより系統誤差も推定し、中心位置決定誤差の低減化が可能(アルゴリズムとしては、重心法、または主成分分析を取り入れたPSF fitting法)
- 大域的誤差(光学系distortion、検出器のピクセルむら、観測装置の時間変動など)
同一天体の多数回観測、同一画像上に多数の星が存在



★星像中心決定に関する実験:
系統誤差のランダム化の実証
・星像中心位置決定精度が $10^{-4} \sim 10^{-5}$ pix(10mas)に相当を達成できる事を確認する実証実験
・多数枚の撮像データから系統誤差を適切に取り除き、ランダム誤差として、 $\sqrt{N}$ 分の1則に従い誤差分散が低減していくことを確認を進めている。
・熱変動など、一部の系統誤差を補正し、10万枚のデータでは実証済み(下図)。
現在、さらに検出器の系統誤差補正も含めて実験し解析中。



6. 現在想定しているスケジュール

2013年度: JAXA宇宙研による小型科学衛星(3号機相当)の募集(予定)に応募(ミッション提案)

* 以下は、3号機に採択された場合の想定スケジュール

2014年度: JAXAによる選考審査を受ける。もし採択され、予算化した場合は、詳細設計、開発を開始。

2014年度～2018年度頃: 小型JASMINEの詳細設計、開発、衛星の試作、製作、試験

2018年度頃～2021年度頃: 衛星打ち上げ、衛星運用(目標は3年間)

(2018年度頃)～2022年度頃: データ解析

* 2020年度頃: カタログの中間リリース

2022年度頃: 最終カタログの公開

* 3号機(相当)に不採択の場合は、審査結果に応じて概念設計、技術課題などの見直し、改善を行い、4号機(相当)の募集への応募を目指す。それに従って上記スケジュールがずれる。

7. 実行体制計画

主要推進組織:国立天文台JASMINE検討室、JAXA/宇宙研、研究開発本部、京都大学理学部

PI:郷田(NAOJ)、ミッション部プロマネ:山田(京大)、ミッション部開発総括:小林(NAOJ)、総括補佐:矢野(NAOJ)。さらに、ミッション部サブシステムには責任者を割り当て、企業連合体制も組んでいる。また、JASMINE検討室では、研究員2名のほか、専門的知識、経験豊かな支援員を2名雇用中。将来的には、特定契約職員クラスの3名程度の増員を希望。

*** Michael Perryman氏 (Univ. of Bristol(UK))が正式メンバーに加入 (expert adviser)**

ヒッパルコスリーダーかつ2007年までGaiaのリーダー

*** RISE月惑星探査プロジェクト(NAOJ)が開発、試験の協力予定**

*** WISHチームとの連携協力もスタート。**

* JAXA/宇宙研の小型科学衛星専門委員会のもとにJASMINE-WGが2009年1月から設置されている。

その他の協力組織:

○国内サイエンスWG:

JASMINEチーム以外の研究者有志(25名)からなるサイエンスWG(代表・梅村雅之(筑波大))が別途形成され、具体的な科学的成果の検討が進んでいる。

バルジ班:長島(長崎大、チーフ)、

巨大ブラックホール・銀河中心班:梅村(筑波大、チーフ)、

コンパクト天体班: 植村(広大、チーフ)、**星班**: 西(新潟大、チーフ)、

系外惑星班:浅田(弘前大、チーフ)

○国内企業グループの連合:

ミッションシステム全体:A社、光学系:B社、構造:C社、
熱:D社、電気:E社、(標準バス部:NEC社)

○海外協力グループ:

* 上海天文台など： 科学データの中国での受信協力

* JMAPSグループ@米国海軍天文台: 指向安定性、

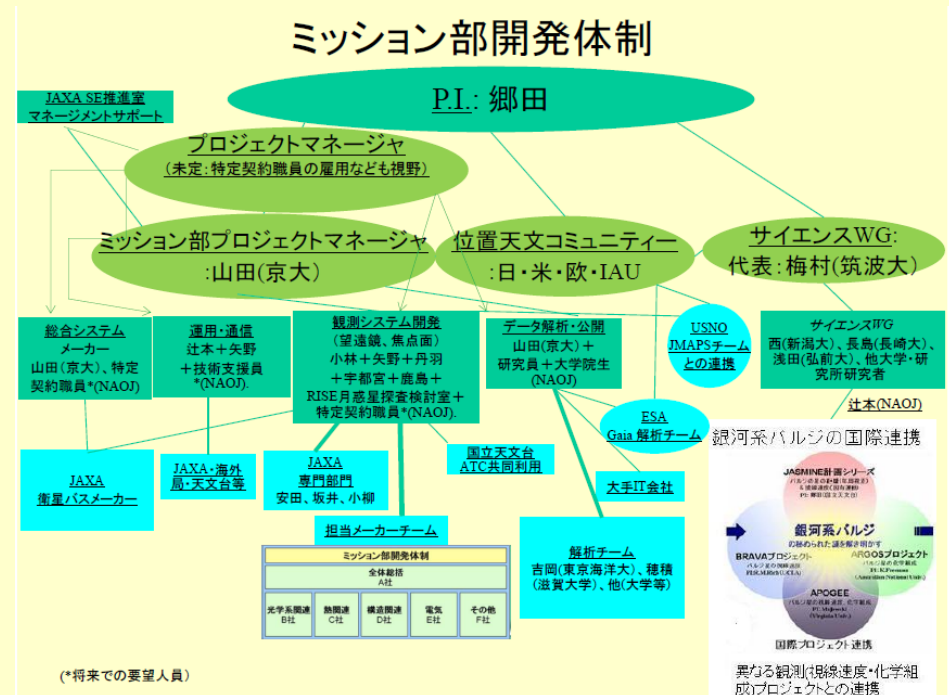
迷光、データ解析などの共同検討

*** Gaiaデータ解析グループ: 小型JASMINEのデータ解析への協力**

*** APOGEEチーム (PI: S.Majewski) とのAPOGEE-2計画**

(南半球での高分散近赤外線分光観測)への

共同プロポーザル提出。さらに、小型JASMINEとAPOGEE-2、SDSS-IV collaborationとでサイエンス連携のMOUを締結した



8. 国内の他の計画との関連

○スペース計画との関連、連携

- * 月面天測望遠鏡(ILOM)計画@RISE月惑星探査検討室との協力:
共同実験(星像中心決定実験)や情報交換(迷光対策など)
- * WISH計画との協力、連携: 情報交換、共通の技術課題対策(検出器など)
- * Solar-C計画、SPICA計画との協力: 情報交換(迷光対策、アウトガス対策、指向安定性など)
- * Nano-JASMINE計画: 日本初の位置天文観測衛星計画

(観測波長: 0.6~1.0ミクロン(zwバンド)、精度は3mas程度)
バス部は東大工学部中須賀研究室が開発
2014年12月: 打ち上げ予定

(ウクライナ製のcyclone-4ロケットを用いてブラジルから打ち上げ)
衛星のFMは完成。運用訓練、データ解析(Gaiaチームとの
共同開発)の準備が進行中。

- * ヒッパルコスカタログと組み合わせると固有運動の
精度がヒッパルコスより1桁向上($\sim 0.1\text{mas/yr}$)。

* Gaiaでは測定できない明るい星(6等星以下)の測定!

- * (中型)JASMINE計画: 小型JASMINEの次の計画として、主鏡口径を80cmクラスに拡大して、
バルジのほぼ全領域方向を 10μ 秒角の精度で測定する。

全面的な国際協力(WFIRST, Post-Gaiaと協力?!)、または
国内の他の計画とのマージ(候補: WISH計画)

小型JASMINE(&Nano-JASMINE)での経験、技術的蓄積をもとに、国内外での他の光赤外スペース
計画への協力、連携に貢献したいとも考えている。

○地上の位置天文観測との連携: VERAとの科学的成果の連携

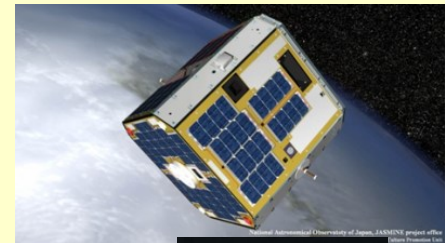
○地上の計画との連携: TMTとの位置天文観測に関するサイエンス連携

IRISによる高精度(30μ 秒角)狭領域($17\text{秒角} \times 17\text{秒角}$)での相対位置天文

→非常に暗い星まで測定可能

SKAとのサイエンス連携(SK: 1.6GHz OHメーザー源などの位置天文測定、 $\sim 10\mu\text{as}$)

* 位置天文のWGに参加し、サイエンスを検討中



Cyclone-4 ロケット
@ユジノエ社



組み立てが完成した
Nano-JASMINE衛星の
打ち上げ実機(FM)





○観測手法: 手法は確立。

○データ解析方法: 目標精度達成→高頻度観測によるデータ解析(calibrationをもとに“推測”)

○観測装置の仕様:

- * 集光、結像性機能: Korsch光学系、主鏡口径30cm、アストロメトリ用検出器(Hawaii-4RG)1台
- * 迷光対策機能: バッフルフードと低反射率の内面処理素材の使用で要求値を満たす。
- * アウトガス対策: ミッション部からのガスは要求値以下の見込み。軌道上でのベーキングも検討。
- * 望遠鏡の指向安定性: バス部からの擾乱は要求値を満たす。共振も特に問題無い見込み。
- * 熱安定機能: データ解析によるシステム要求の緩和と技術実証実験による確認。

○観測系システムの仕様

- * 望遠鏡構造とフェアリング搭載性: 安定なトラス構造の設計終了とフェアリング搭載性の確認
- * 軌道、姿勢: 太陽同期軌道で高度550km、重量上限402kgとの飛行解析結果。
- * 非観測時の地球待避姿勢と熱環境: 待避姿勢等の工夫により、熱環境要求を満たすことを確認。
- * 熱環境(熱モデル): ペルチェにより望遠鏡温度より更に冷却し、検出器温度の要求を満たす。
- * 科学データ通信: 必要データを通信可能。水沢観測所、上海天文台の受信サポートも検討中。
- * データ処理: 設計終了。バス部とのインターフェースも問題無い見込み。
- * 電力: 供給電力内に十分おさまる見込み。
- * 質量、質量中心: 十分なマージンで許容範囲内。
- * 標準バスとのインターフェース: I/F条件を満たし、バス部への改修要求等は無見込み。

○コスト: ミッション部の予算条件内におさまる見込み。

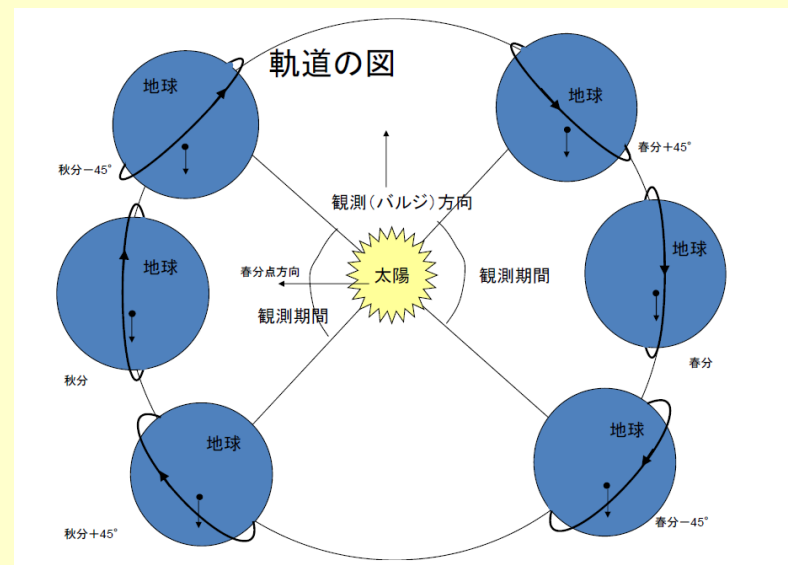
○データ解析: 手法検討は進み、Gaiaチームとの協力、大手IT企業とのソフト開発も進行中。¹⁸

★観測手法

主として春、秋の期間

(夏の一部期間も可能性あり)

銀河系中心付近のバルジ方向の
観測



バルジを観測できない冬と

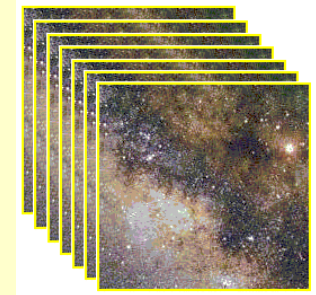
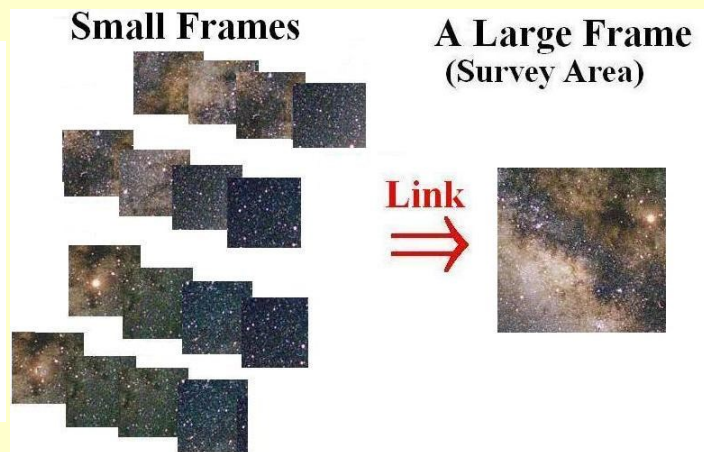
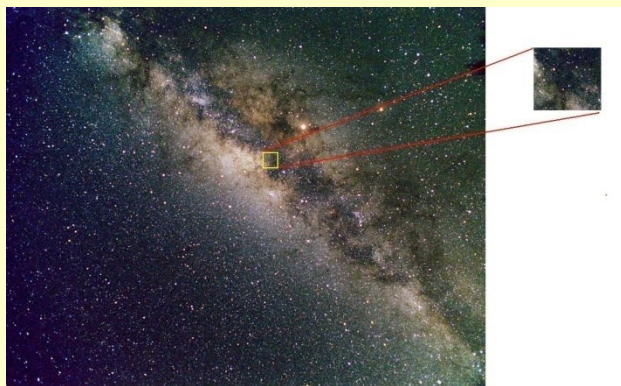
その他バルジを観測しない期間:

バルジ方向の観測に最適化したシステム仕様を用いた上で、
観測が可能な(科学的に興味ある重要な)特定天体方向の
観測(例: CygX-1)

バルジ方向(中心付近)の通常観測モード

貼り合わせ法(frames-link method)

- Stage 1: 7秒間撮像。同じ視野に対して、16回繰り返す。その16枚のフレームのセットを**小フレーム**とよぶ。
- Stage 2: 望遠鏡の向きをすこし移動。前の視野と半分程度重なる視野に対して、Stage 1と同様にして、小フレームを作成。この作業を、約45分間行うことで、全観測領域を16枚の小フレームで覆うことができる。こうしてできた全領域のフレームを**大フレーム**とよぶ
- Stage 3: 作業2までのプロセスをミッション期間中、繰り返す。最終的には、約1万枚の大フレームが作成される。この大フレーム上の星の軌跡から、年周視差、固有運動を求める。
- この際、大フレーム毎のサイズ変動、distortionの変動は、較正天体(VERA、Gaiaなどで測定された天体)を用いて同時に解く。



★小型JASMINEにおけるデータ解析

◎目標精度: $10\mu\text{秒角} \sim 70\mu\text{秒角}$

目標精度達成のための手段: 技術とデータ解析

Precision(精密度) $\longrightarrow$ 同一天体を約70万回観測
 $\longrightarrow$ $\left\{ \begin{array}{l} \bigcirc \text{ランダム誤差の減少} \quad \sigma \sim \lambda / (D\sqrt{N}) \\ \bigcirc \text{系統誤差: 制御(指向安定性、熱安定性)} \\ \text{推定(観測データ(動かないものさし)から系統誤差を補正)} \end{array} \right.$
 $\longrightarrow$ 残差の無相関化により
多数観測で誤差が減少

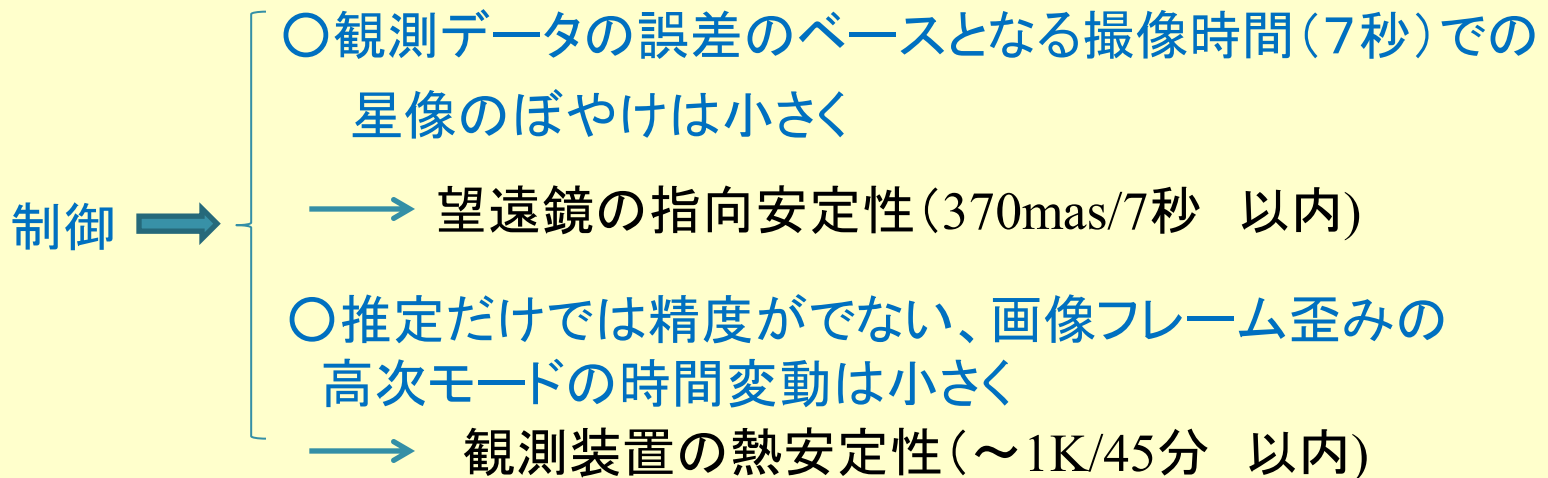
Accuracy(正確さ) $\longrightarrow$ Gaia等で測定された位置天文情報を用いて補正

★目標精度達成のための誤差対策

一般：除去、制御、測定、推定

小型JASMINE: 1回の観測では達成できない高精度をミッション期間をかけて、
同一天体の多数回観測(約70万回)による統計処理で実現

系統誤差：推定 → 観測データ(“動かないものさし”)による系統誤差の補正



◎観測データを用いた系統誤差の推定

○局所的誤差(光学系や検出器による星像の形状に関わるもの)

*星像中心決定アルゴリズムにより系統誤差も推定し、中心位置決定誤差の低減化が可能
(アルゴリズムとしては、重心法、または主成分分析を取り入れたPSF fitting法)

○大域的誤差(光学系distortion、検出器のピクセルむら、観測装置の時間変動など)

同一天体の多数回観測、同一画像上に多数の星が存在



- * 短時間スケール: 星の相対位置は“動かない”という“自然の校正装置(45分程度) (動かないものさし)”を利用
+ Gaia等で測定された天体での校正
 - ➡ 系統誤差(装置等の(短期の)時間的、空間的変動などを推定。
さらに、多数の星が利用できることにより精度が向上。
推定した系統誤差を除いた誤差の残差は、無相関化。
- * 長時間スケール: 星の動きのモデル(らせん運動+ α)
+ Gaia等で測定された天体での校正 ➡ Accuracyも上げる
(画像フレームの線形変動の永年変化、1年スケールでの変動の補正が必要)

➡ 短時間スケールでの残差の無相関化により、
多数回観測を行うとPrecision(精密度)は向上

★“推定”の実証実験

星の相対位置は“動かない”という“自然の校正装置(動かないものさし)”を利用して、系統誤差(装置等の(短期の)時間的、空間的変動など)を推定する。推定した系統誤差を除いた誤差の残差は、無相関化していることを示す。

* 実験と現実の差についてもコメント

- 大フレーム作成時間の45分間では、星の相対位置は動かないと見なせるが、より長時間スケールでは、星の相対位置は変動する。ただ、星の動き(軌跡の形状等)はモデル化できるため、その軌跡のパラメータ推定に関して、多数回観測したときのprecision(精密度)の向上は、“動かない”と仮定した場合と同等に扱える。しかし、画像フレームの永年的な線形変動、年周運動と同期する1年スケールでの変動に関しては、Gaia等で測定された天体の位置天文情報で校正する必要あり。
- 実験では、1次元(1軸方向の)星の位置しか使っていない。実際には、2次元データを利用可能。
- 実験では、星のペアは1組のみ利用。しかし、実際では多数のペアの情報を利用可能。

推定の実証実験

推定の方法: 動かない基準(ものさし)を使う

短時間で星は動かない。星間の角距離が“不変”

不変性を利用し、観測装置歪み量補正

(基準は観測装置ではなく天空にある)

相関性を見つけて補正

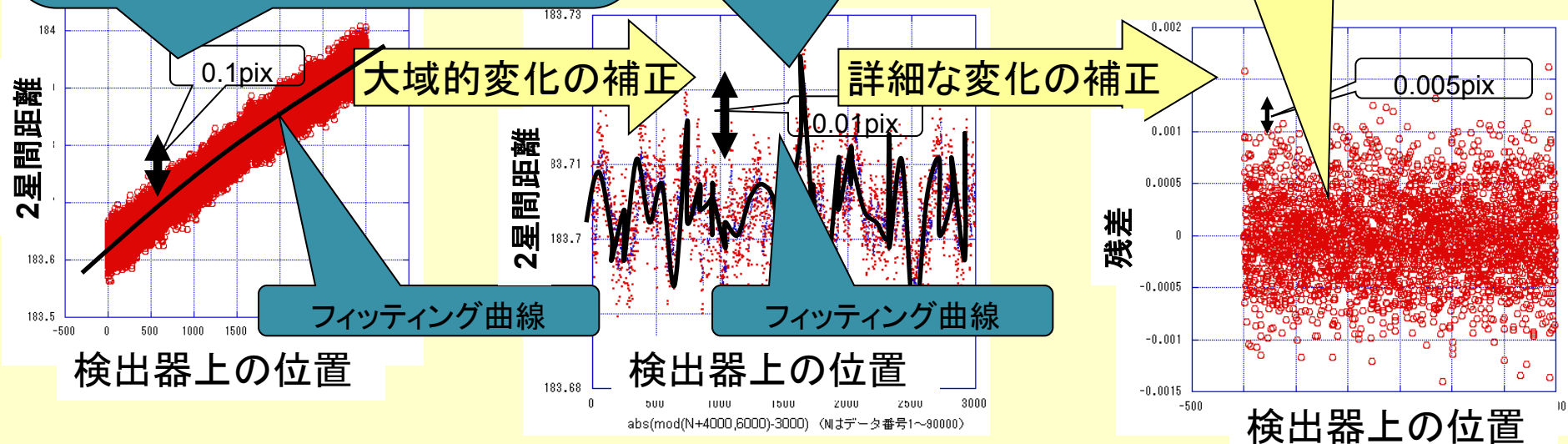
測定された星間の距離変化 = 観測装置から発生する系統誤差 + ランダム誤差

検出器上の位置に伴う系統誤差の補正

① 検出器上の位置に応じて変化する、2星間距離の大域的変化をフィッティングする。検出器上の場所に、ほぼよらないように補正。

② 大域的補正後、ピクセルレベルスケールでの2星間距離の変化(系統誤差)をフィッティングし、補正する。

無相関化
⇒ 枚数に応じて
誤差低減

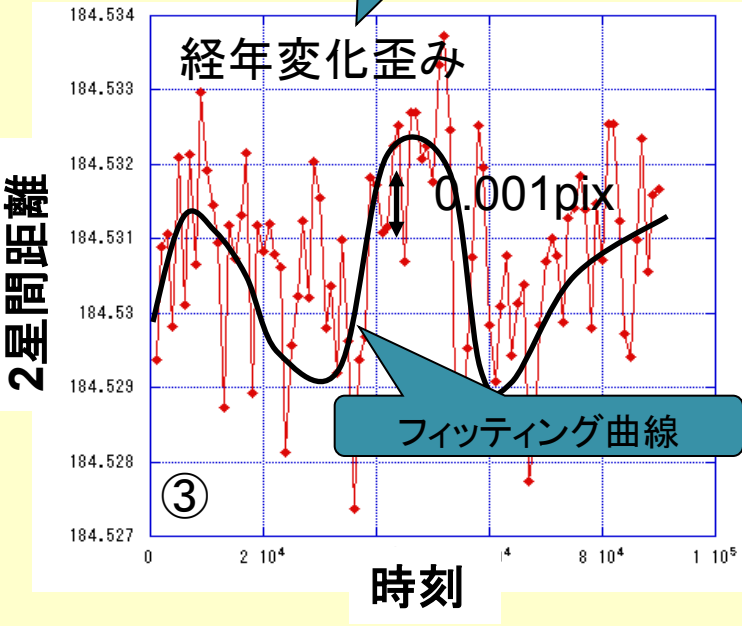


実験とデータ解析:

解析方法や検証手段:統計数理研究所 石黒真木夫先生他と相談の上、進めている

時間に伴う系統誤差の補正

③経年変化
フィティングを行い、時間変動にともなう誤差を補正

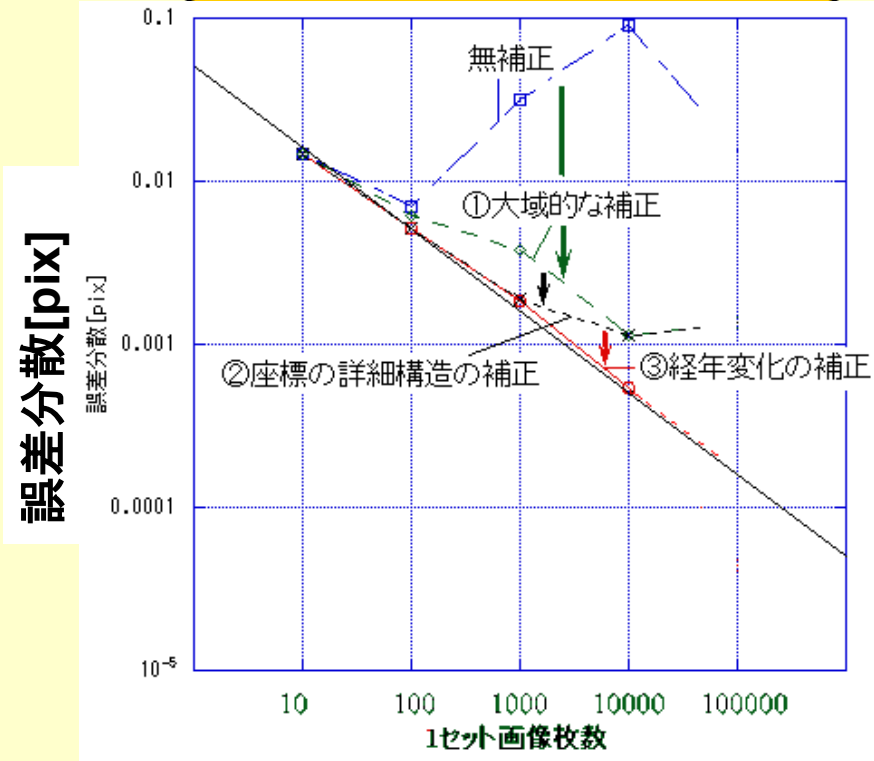


実証実験結果

①②座標に伴う系統誤差

③時間に伴う系統誤差

以上補正後、
枚数に応じたの誤差結果



★観測装置の仕様

○集光、結像性能機能➔

望遠鏡の主鏡口径:30cm、焦点距離: 3.9m

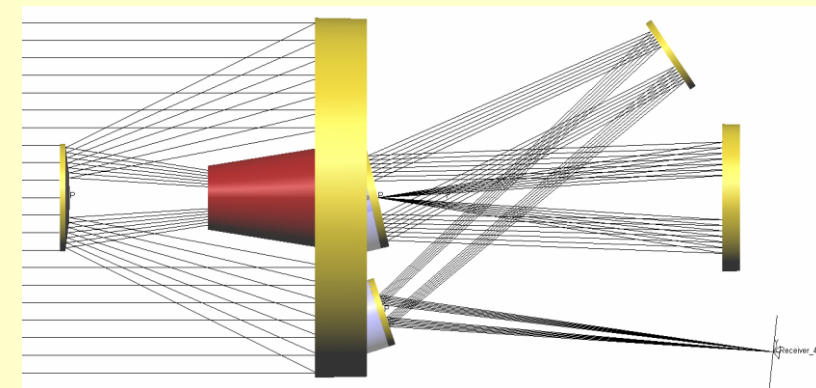
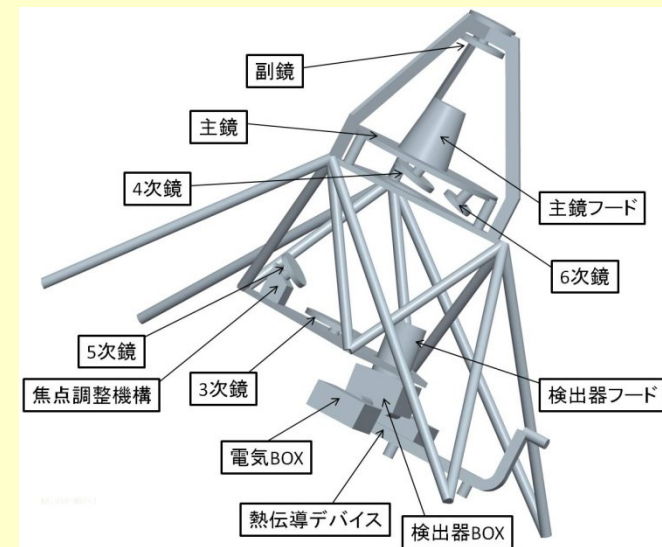
視野面積:0.6度×0.6度

* 鏡素材:合成石英、構造素材:インバー合金とCFRP

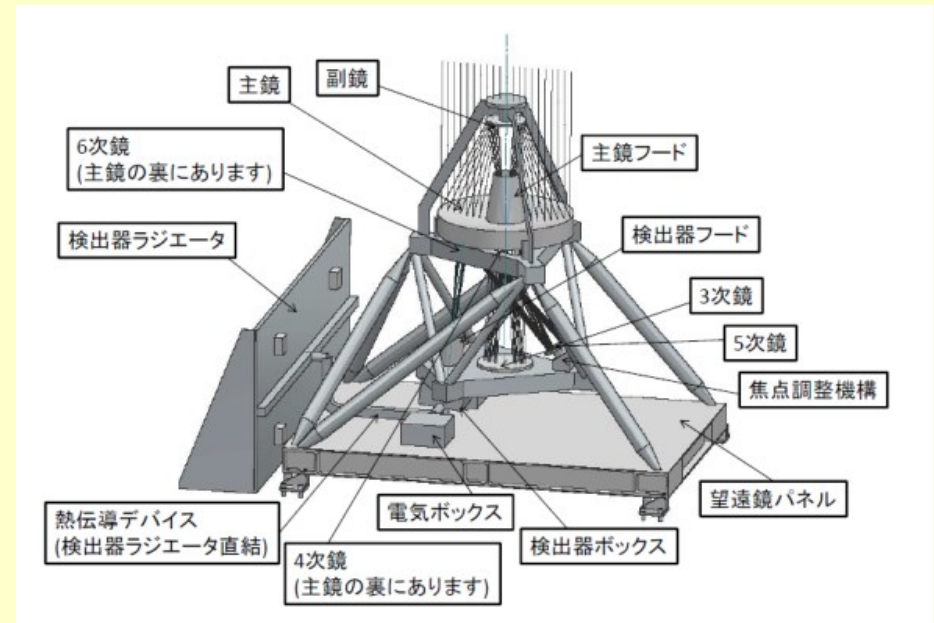
アストロメトリ用検出器:HgCdTe(4k×4k)1個

アストロメトリ用観測波長:Hw-band(1.1~1.7ミクロン)

色識別用検出器:HgCdTe(1k×1k) 2個



光学系(コルシュ系(3枚鏡))



★迷光防止機能

観測時間確保のため太陽、地球の位置が観測にとって厳しい場合でも観測を行うが、その場合でも十分な迷光防止が出来るようなフードが必要

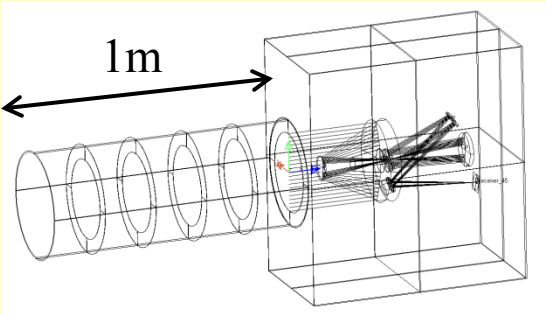
以下のようなフードにて**迷光が防止できる事を確認**している

バッフルフード

バッフルフード

主鏡フード

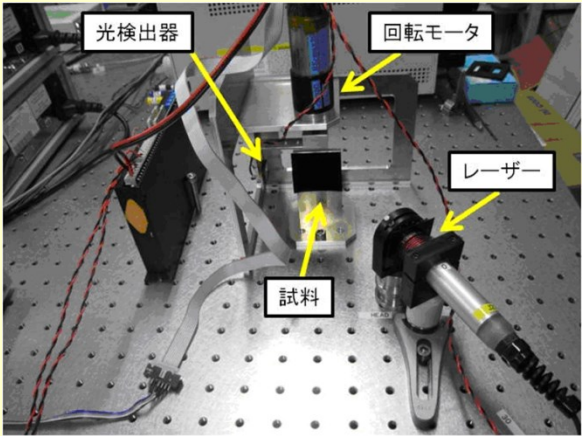
副鏡フード



さらに、内面処理素材を利用：

現在の候補素材(宇宙仕様)の

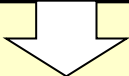
半球反射率は1%以内、フードのダウンサイズが可能



候補素材の中から何が適しているかを
選定するため、散乱強度分布の簡易的な測定。

★アウトガスなどによるコンタミの検討と対策

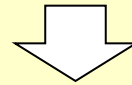
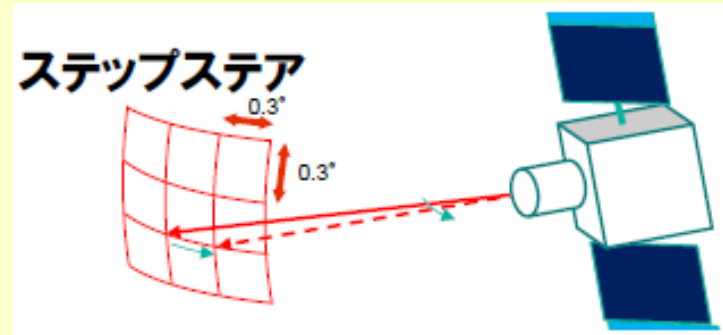
コンタミの影響	対象期間	要求
星像中心位置のずれ	45分間	分子コンタミ $\sim 0.01\text{nm}$ (コンタミの屈折率1.5の場合)
スループットの低下	3年間	分子コンタミ $\sim 10\text{nm}$ (コンタミの光吸収係数 $1\mu\text{m}^{-1}$ の場合) 粒子コンタミ $\sim 11\text{cm}^2$ (主鏡付着の場合)



- 想定される分子コンタミ(DEHP等)に対して付着厚の見積中⇒現時点で要求に収まっている
- 望遠鏡周辺にヒータを搭載し、定期的に軌道上ベーキングを行うことも検討している²⁸

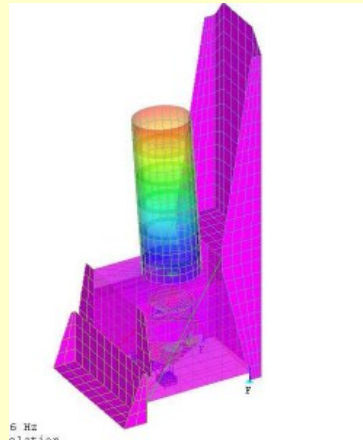
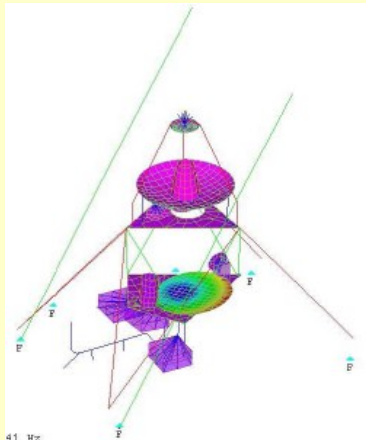
★望遠鏡の指向安定性(要求)

姿勢マヌーバー	0.3 deg
マヌーバー時間	30sec
露光時間	7.1sec
指向安定度	370mas (1 σ)/7.1sec
指向目標	慣性固定
指向制御精度	~0.1 deg



擾乱源の見積: 小型標準バス仕様のリアクションホイール、IRUなどからの影響
合計で<300mas(1 σ) → 指向安定度の要求以内！！

さらに詳細検討として構造数学モデルを用いた主要コンポーネントの周波数応答解析を実施



問題となる擾乱の周波数帯域と主要コンポーネントの共振がかぶらない構造設計になっていることを検討



- これまでに、主要モードは90~100Hz付近にあり、問題がないことを確認済み
- ローカルモードは鏡の取り付け構造によって回避する見込み。

* 今後も、擾乱回避や減少方法の考察を詳細設計等の検討を通じて継続していく予定。

★熱安定性機能→

観測装置が熱変動すると星像の位置が変動するので安定化が必要

焦点面上での画像変位の変動が0.1nm以下/45分 (for 3次以上の変位)

温度安定性(～1度/45分) + 低膨張率素材 + 望遠鏡構造の工夫により成立の見込み

安定度要求

撮像画像変形量
＜0.1nm

変形要因
●望遠鏡・鏡面熱歪み
●望遠鏡・支柱熱変形
●検出器の熱歪み

変形の安定度要求
10mK (0.1nm) /45分
⇒非常に難しい

ストラテジー

温度安定化
～1K (10nm) /45分

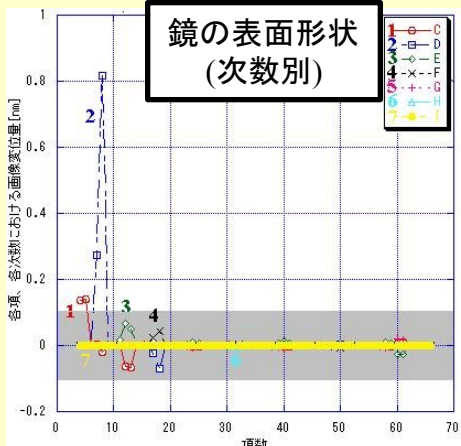
画像変形量(xy多項式展開)
●1次(拡大縮小) >0.1nm
●2次(勾配) >0.1nm
●高次の画像変形 <0.1nm

1次、2次の変動量はパラメータ化
⇒星の相対距離が短時間で
“不変”という条件から推定可能
“天球上に自然のキャリブレーション装置がある”

観測する星の数が多いためこのストラテジーが成立

数値シミュレーションによる確認

- ①望遠鏡構造モデル作成
 - ②光学系まわり直方体6面の熱境界条件の計算
 - ③温度分布に基づいた光学系熱歪み量の計算
 - ④光学系熱変動の画像歪みへの影響の検討
- ⇒3次以上の変形成分の時間変動が
0.1nm以内に収まっていることを確認



Gaia: 数mK/数時間
Nano-JASMINE: 0.1K/100分
同一天体を違ったフレームで多数回
撮像しないため、キャリブレーションは
衛星内の装置の安定性
=> 温度安定性の要求が厳しい

★熱安定性機能➡

実証試験による確認

数値シミュレーションが妥当であることを検証

熱変形の時間変動測定

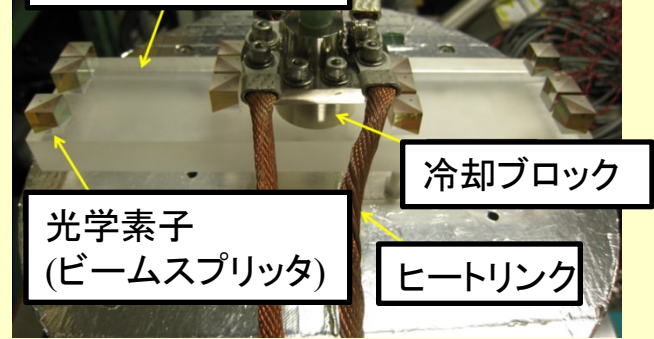
高精度変位センサー
(ヘテロダインレーザー干渉計)



感度(RMS値): 100pm/1h以下

合成石英プレート
(200mm×50mm)

試料周辺部



冷却ブロック

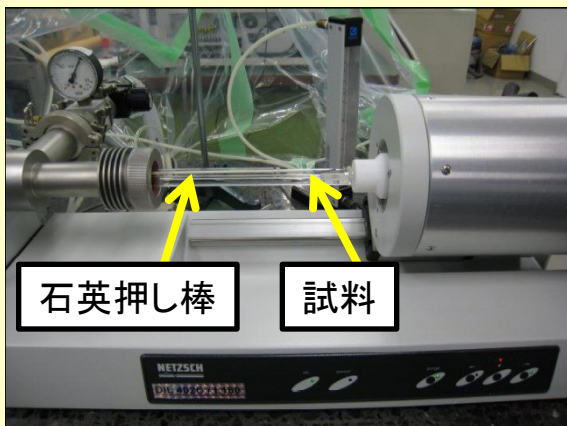
光学素子
(ビームスプリッタ)

ヒートリンク

合成石英・シリコンウエハの熱変形量を3次のモードまで測定

低温(180K)熱物性値測定

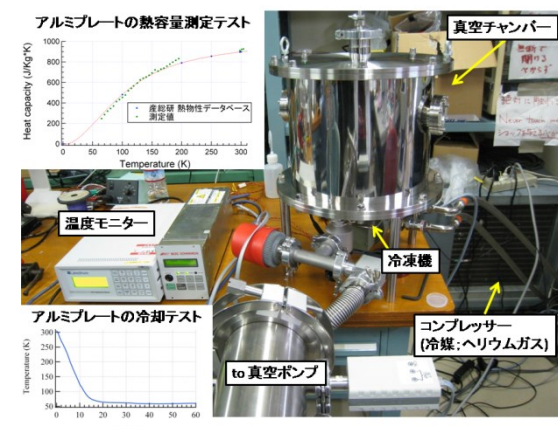
熱膨張率測定@NAL



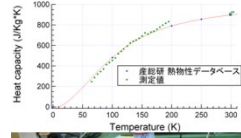
石英押し棒

試料

熱容量測定

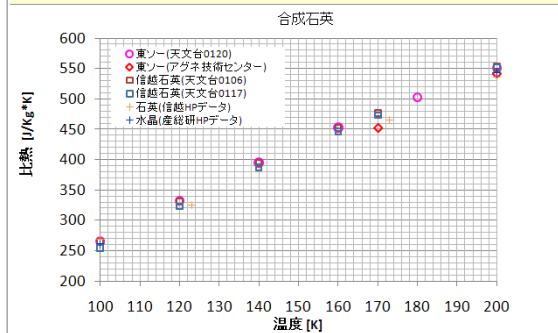
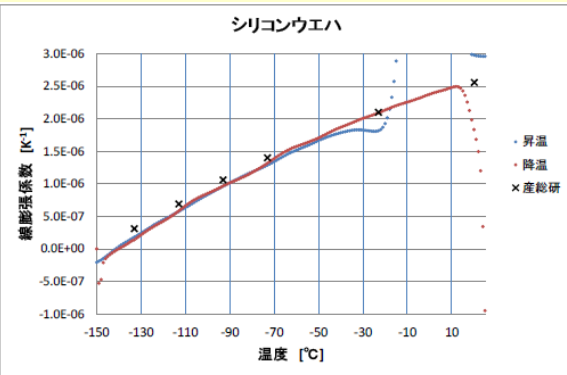
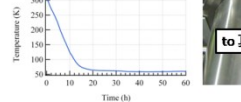


アルミプレートの熱容量測定テスト



温度モニター

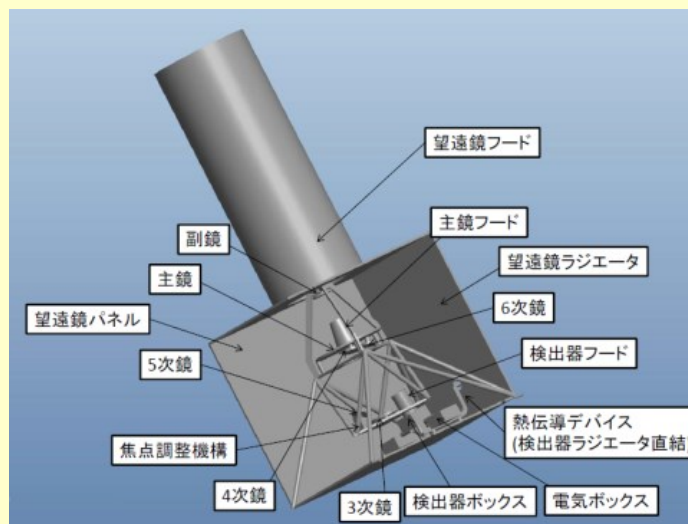
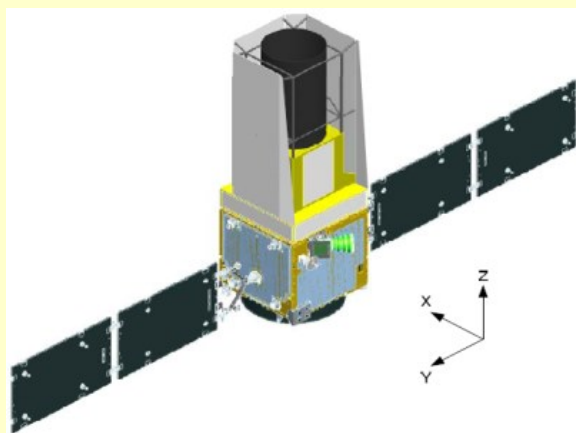
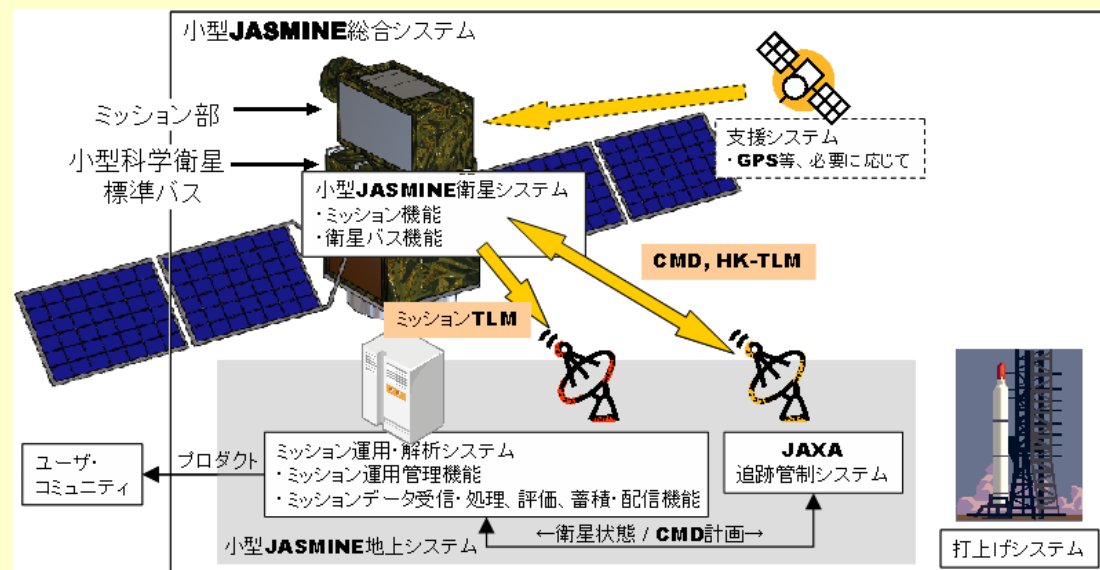
アルミプレートの冷却テスト



低温熱物性値データベースを作成 31

★ 観測系システムの仕様

衛星と望遠鏡構造、軌道、姿勢、
熱環境(冷却機能を含む)、通信、電力、質量など

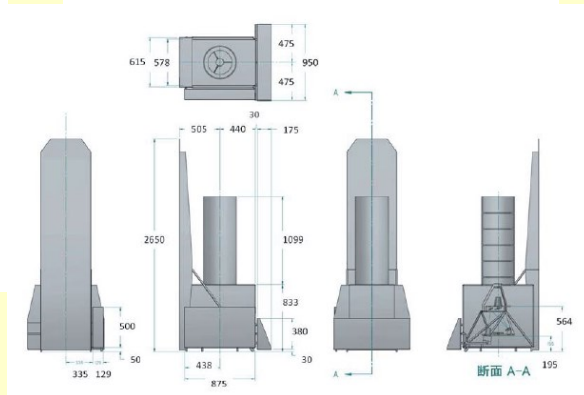
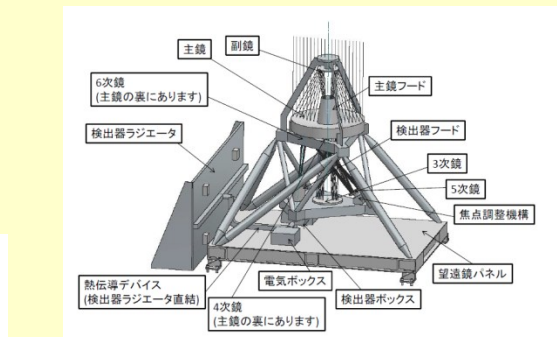
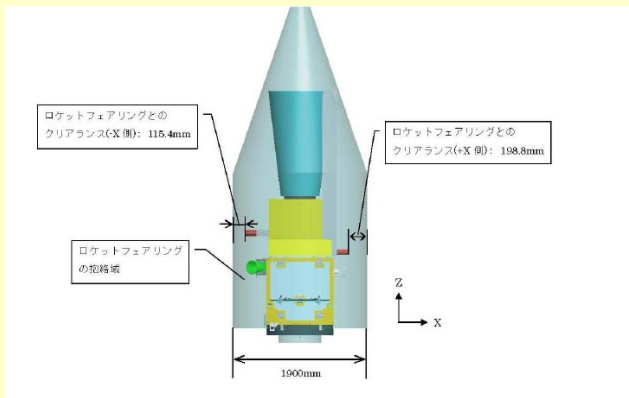


○望遠鏡構造とフェアリング搭載性

*トラス構造(衛星取り付け部に静定トラスにより直接支持)

*フェアリング搭載性

(イプシロンロケットによる打ち上げ)



○軌道、姿勢

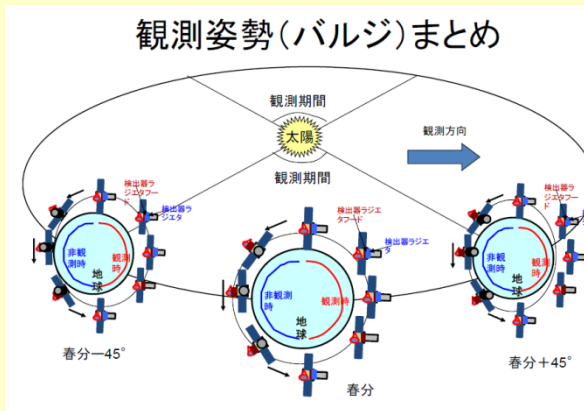
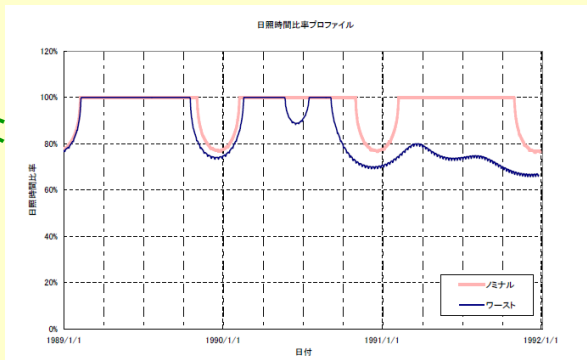
*地球周回軌道(昇交点地方時6h太陽同期軌道)

*軌道高度550km

ロケットチームによる飛行解析結果:

高度550kmの太陽同期軌道に重量402kgを打ち上げ可能

(注)RCSがなくても、軌道投入が
ノミナル通りならば、運用を行いたい
3年間の全日照は保証される。
仮に最悪ケースの場合でも
フルサクセスレベル達成可能な
1年半程度は保証される

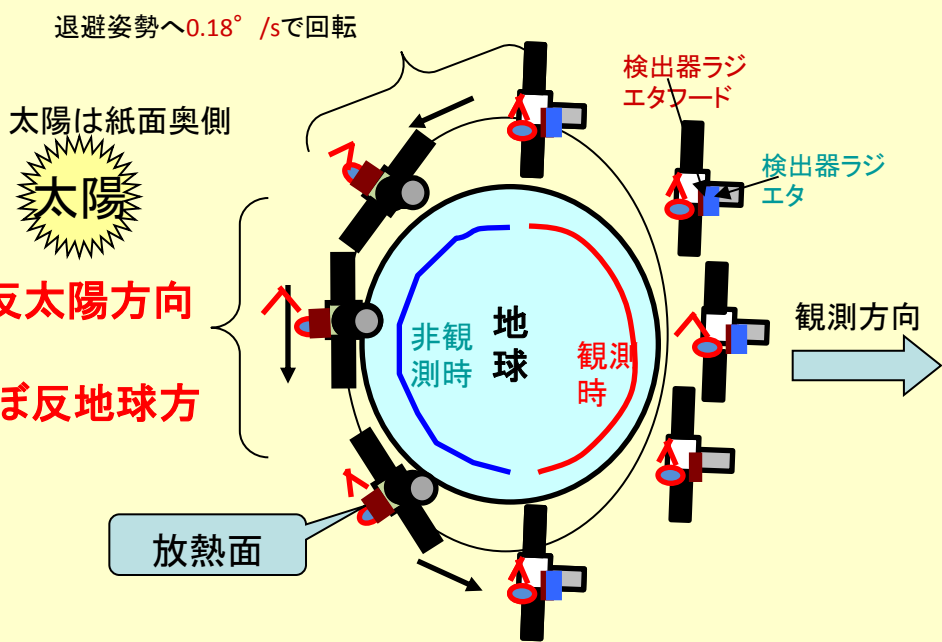


○非観測時の地球待避姿勢と熱環境(観測装置周りの温度)

非観測時の退避姿勢：

太陽、地球赤外輻射とアルベドを
放熱面から遠ざける姿勢をとる。

望遠鏡z軸を反太陽方向
に向け、かつ
放熱面を、ほぼ反地球方
向に向ける。



熱環境(観測装置周りの温度)

	要求		計算結果	
	目標温度	目標温度変動 (45分)	達成温度 (春分-45度、春分+45 度)	達成温度変動 (45分)
望遠鏡部(主鏡)	~220K以下	~1K以内	210-216K	~0.04K
検出器	~180K以下	~1K以内	137-163K	~0.3K
検出器ラジエタ	~200K以下	—	165-193K	

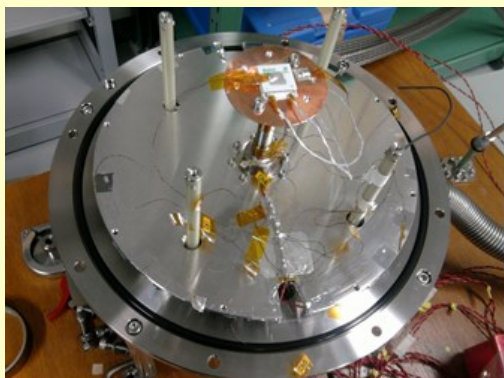
クリア

クリア

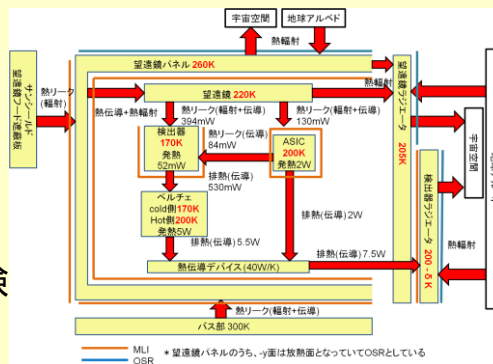
ペルチェ冷却
込み

○熱環境(観測装置周りの温度)

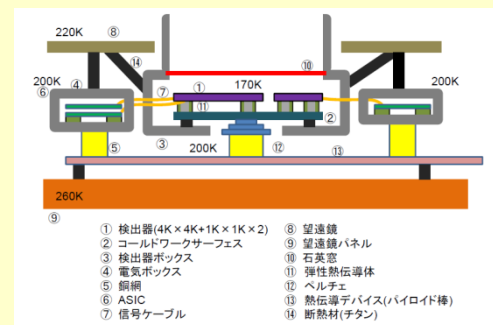
Hwバンドの採用にともおない、望遠鏡温度は $\sim 220\text{K}$ に維持し、検出器周りをペルチェにて $170\text{K} \sim 180\text{K}$ に冷却し運用をおこなう。



ペルチェ冷却試験



熱モデル



熱設計

○科学データ通信(Xバンド)

* 科学データ量

0.94GB/day for 5×5 pixels stellar window

2GB/day for 7×7 pixels stellar window

→ $\sim 10\text{Mbps}$

* 地上受信局:

可視時間解析より、40分前後が可視(日本、ウルムチ)

上海天文台より、ウルムチ局を含む中国国内での受信協力の申し出あり

圧縮・欧州局利用等のオプションができれば、より大きなwindowをdownlink可

JAXA(日本)、**国立天文台水沢VLBI観測所(10mアンテナ)**、

中国の局(上海天文台より協力の申し出)、ESA(打診中) → 国際協力の一環

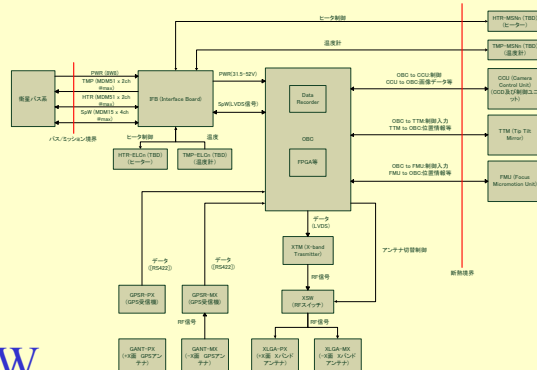


Xバンド通信機

○データ処理系

○電力

ミッション部最大消費電力 63.9W
 <バス部からの供給電力150W
 (全体の消費電力(姿勢マヌーバーモード時)
 475.6W<SAPからの供給電力 900W)



	消費電力 (W)	最大消費電力(W)	ミッション時稼働率	平均消費電力(W)
冷却領域外				
OBC	5.0	5.0	1	5.0
XTM	25.0	25.0	0.018	0.5
GPSR-MX	5.0	5.0	1	5.0
GPSR-PX	5.0	5.0	1	5.0
冷却領域内				
CCU	0.3	0.3	0.5	0.2
TTM	1.0	1.0	0.5	0.5
FMU	10.0	10.0	0	0.0
PCU	3.0	3.0	1	3.0
合計		54.3		19.1
変換効率考慮の合計		63.9		22.5

○質量

イプシロンロケットチームによる
 飛行解析の結果、高度550kmへの
 投入質量上限は、402kg
 →衛星質量は333.6kgで上限以内
 *ミッション部質量96.2kg+バス部237.4kg
 質量中心高さも許容範囲内

No.	冷却領域内	
1	フード・バップル	2.18
2	望遠鏡パネル	20.755
3	ラジエータ	4.72
4	サンシールド	9
5	鏡(M1~M6)	6.37
6	検出器ボックス	1.62
7	ASICボックス	0.55
8	焦点調整機構	2.3
9	望遠鏡構造	24.32
10	ヒートパイプ	0.33
11	望遠鏡系ハーネス	2
12	熱制御材	2.9
	合計	77.045

No.	冷却領域外	
13	電気ボックス	8.25
14	IFB	0.3
15	OBC	1
16	XTM	3
17	XSW	1
18	XLGA-PX	0.5
19	XLGA-MX	0.5
20	GPSR-PX	1
21	GPSR-MX	1
22	GANT-MX	0.3
23	GANT-PX	0.3
24	電子系ハーネス	2
	合計	19.15
	総計	96.195

ミッション部質量内訳

○標準バス部とのインターフェース

インターフェース条件を満たすとともに、ミッション部からバス部への影響(変更要請)は極力与えない、バス部からの影響も最小限にする検討が行われ、ほとんど問題が無い見込み。コスト増加も現時点ではほとんど無い見込み。さらに、次のフェーズ以降の設計段階において(コストアップになる可能性もあるため)詳細に検討すべき事項を識別した。

★コストに関して

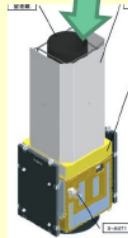
小型科学衛星ミッション部の予算は、マージンを加えても条件を大きくオーバーすることは無い見込み

- * 小型JASMINEでは、フライト実績があるサブシステム、部品を採用し、開発要素が少ないことが特長
- * 望遠鏡は主鏡口径30cmであり、さらに特別な要求もなく、既存の開発実績を十分活用できる。
- * 小型科学衛星は、コスト制限の割には、重量制限に余裕があるため、望遠鏡構造の一部(特に複雑な構造部分)は、多少重くても今までに十分な実績があるインバー合金を用いることができる。
- * 標準バスの変更やバス部からの影響のため、ミッション部コストに及ぼす評価：
バス部メーカーからコスト増になりそうな懸念事項を30点以上ご指摘いただいて、要求を再整理し、検討を十分に行ってきた。仕様や要求値を設定し直すことで、標準バスに対する変更要求を加えることなくミッションを成立させる解(ベースライン)を得ることができ、コスト増は現時点では無い見込みとなった。
- * 中小規模の会社の連合体によって、ミッション部の開発、試験、製作を行う予定³⁷

★データ解析

望遠鏡・検出器の熱変形などの系統誤差は装置モデルに含まれる

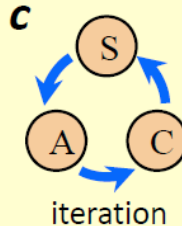
装置モデル: 星からの光が最終的に結像する様子は、望遠鏡や検出器特性、さらには像としては見えない背景の暗い多数の星の分布などにも依存する。



PSF/検出器応答モデル

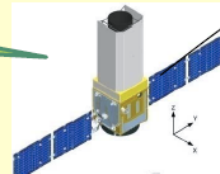


基本データ: 星が検出器面上の基準線を通過する時刻と、スキャン垂直方向の検出器座標を、それぞれ1/100 pixelレベルの精度で求める。



a

衛星運動モデル: 星からの光が観測装置に入る方向は、衛星の軌道位置(視点)・軌道速度(光行差)・姿勢(機体座標と天球座標の回転変換)に依存する。



position at reference epoch (α_0, δ_0)

proper motion (μ_α, μ_δ)

path of star on the sky

parallax (ϖ)

s

星の運動モデル: 天球上の恒星の運動は、5つのパラメータで書ける。ある時刻での位置、横断速度、年周視差である。

c

星からの光伝搬モデル: 星からの光は、木星など大きな惑星や太陽、その他の天体の影響を受け、重力レンズ効果で曲がる。

要求精度を達成する方法

- * 短時間では星の相対距離は“不変”と見なせることをキャリブレーションに使える。
- * 長時間変動は動きのモデル化により同時に解析。
- * Gaia等の高精度測定データもキャリブレーションに使用。

- * Nano-JASMINEのデータ解析準備で経験を蓄積
- * Gaiaのデータ解析チームとの協力を予定。
- * 大手IT企業とのソフト開発の共同研究を実施中。

ご支援、ご協力をよろしく御願いたします。

Jasmine

