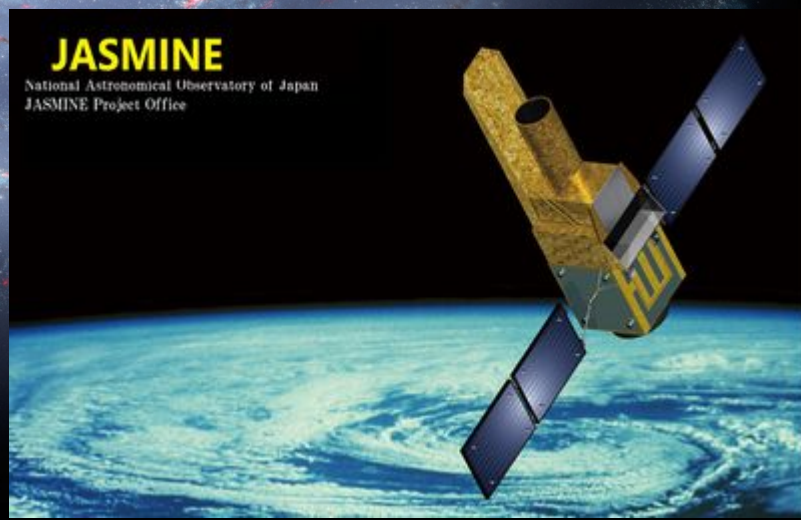


小型JASMINEワーキンググループに関する 報告

JASMINE : Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration

郷田直輝(国立天文台JASMINEプロジェクト)



本報告書の構成

A. 本文 (p.3～p.34) :参考資料を含む

I.ワーキンググループ(WG)の概要

II.WGの開催経緯

III.議論の経緯とoutcomeの概要

1. 科学目標および達成基準

(JASMINEによる系外惑星観測の意義と重要性、そしてその実現可能性を含む)

2. 科学目標を達成するためのシステム性能要求およびシステム仕様の妥当性

3. システム要求仕様の実現可能性に関する検討状況の確認

4. 海外協力体制の現状(欧州と米国の状況と、その枠組み案)

B.補足資料

補足I(科学目標および達成基準関連) : p.36～p.73

補足II(システム性能要求およびシステム仕様関連) : p.74～p.84

補足III(システム要求仕様の実現可能性関連) : p.85～p.113

I. ワーキンググループ(以下、WGと記す)の概要

* WGは、国立天文台科学戦略委員会の下に設置

1. 諮問事項: 小型JASMINE計画の立ち上げに係る広範な事項を、
management advice bodyとして活動する。

* 具体的事項: 1. 科学目標および達成基準の確認

(JASMINEによる系外惑星観測の意義と重要性、そしてその実現可能性を含む)

2. 科学目標を達成するためのシステム性能要求およびシステム仕様の妥当性

3. システム要求仕様の実現可能性に関する検討状況の確認

4. 海外協力体制の現状(欧州と米国の状況と、その枠組み案)

2. 設置期間: 2019年7月1日～2020年10月31日

3. メンバー:

井口 聖 (副台長・共同議長)、満田 和久 (技術主幹・共同議長)、
千葉 柁司 (東北大)、鹿野 良平 (Solar-C)、松田 有一 (ALMA)、
早野 裕 (ATC)、鵜澤 佳徳 (ATC)

* オブザーバー: 常田 台長

* プロジェクト側参加メンバー: 郷田 直輝 (NAOJ)、山田 良透 (京大)、

片坐 宏一 (JAXA/ISAS)、河田 大介 (UCL)、河原 創 (東大)、馬場 淳一 (NAOJ) 3

II. WGの開催経緯

1.開催状況

7回開催(2019/8/9, 9/9, 12/6, 2020/1/24, 3/10, 4/28, 6/12)

毎回、3時間~3時間半程度

第7回目で終了(6/12)

2.各回での議題、議論内容

詳細は議事要旨を参照(別紙)

以下、諮問事項毎に、どのような議論があり、最終的にどのようなoutcomeがあったかの概要を示す。

III. 議論の経緯とoutcomeの概要

1. 科学目標および達成基準

(JASMINEによる系外惑星観測の意義と重要性、
そしてその実現可能性を含む)

JASMINEのプロジェクト目標

→位置天文データカタログの提供(次ページの**参考I-1**)



大きな議論内容:

- 科学目標(キラースサイエンスの要素を含む)は何か?
- 目標としている達成精度と科学目標との定量的関係は?
本当に 25μ 秒角の高精度が必要なのか?

参考I-1: JASMINEのデータカタログ概要(プロジェクトサーベイ)

- ・Hwバンド(1.1~1.7 μm)の波長域における撮像観測
- ・同じ星に対して約100分に1回の高頻度観測
- ・天体の天球面上での位置の時間変動(時系列データ)とそこから導かれる年周視差と固有運動等の位置天文パラメータの情報等をカタログとして公開。

* 世界同時公開がプロジェクト目標

○サーベイ領域:

プロジェクトサーベイ: 銀河中心核バルジ方向の領域

春と秋に観測

*領域1 => 半径0.7度程度の円の領域
(中心核バルジの半径~300光年程度に相当)

*領域2 => 銀経-2度~0.7、銀緯0.0度~0.3度
(中心核ディスク半径~900光年程度、高さ100光年程度に相当)

○観測精度(目標)

Hw<12.5等級の星

年周視差精度: 25マイクロ秒角以下

(銀河中心での距離の誤差が20%以下)

固有運動精度: 25マイクロ秒角/年以下

(銀河中心での接線速度の誤差が1km/s以下)

12.5等級<Hw<15等級の星

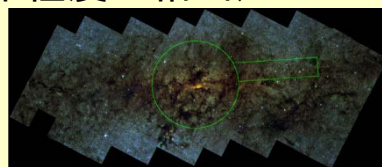
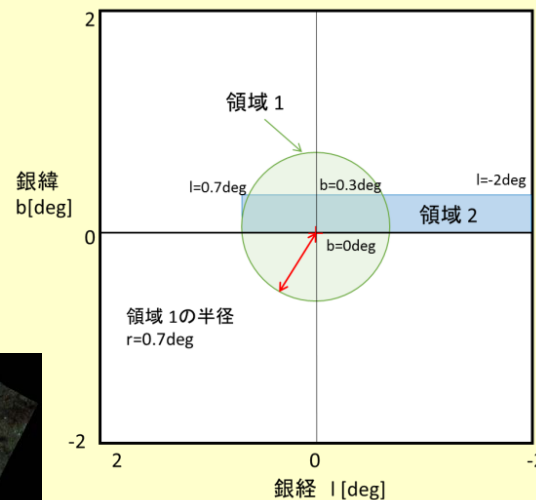
固有運動精度: 25~125マイクロ秒角/年以下

○観測個数(見込み)

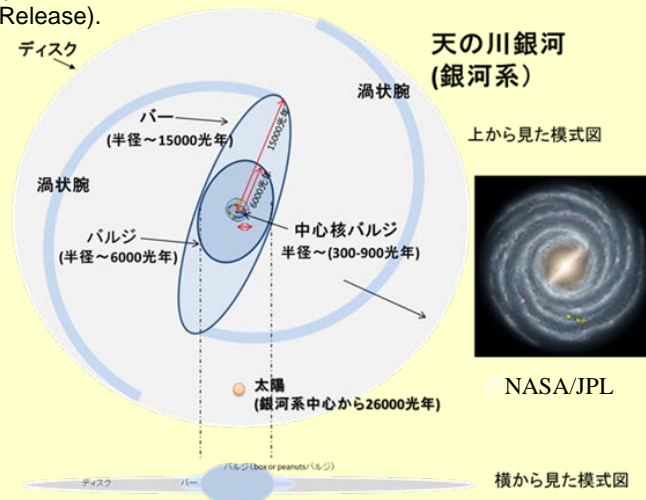
バルジの星: 67,000個(うち7,100個 Hw<12.5)

ディスクの星: 31,000個(うち4,900個 Hw<12.5)

観測領域



Nishiyama et al., 2004 Spring
Astronomical Society Press Release).




(1) 科学目標に関して


★当初の科学目標

「銀河系構造(バルジ、バー、ディスク)と巨大ブラックホールの進化の解明に結びつく中心核バルジ領域の探求を通じた**銀河中心考古学**の遂行」

* 一般にも分かりやすい表現でキラサイエンスを表現すべき(WGからの指摘)

* 主要なサイエンスケース(科学目標をブレークダウンした小目標)を説明、議論(参考I-2、補足I-1を参照) 

→天の川銀河全体の研究に波及する成果(参考I-3)

+新たなサイエンスケースの検討、議論: 銀震学(補足I-2) 

「生命を育む惑星が形成された我々が住む銀河である天の川銀河の形成史を明らかにする。」

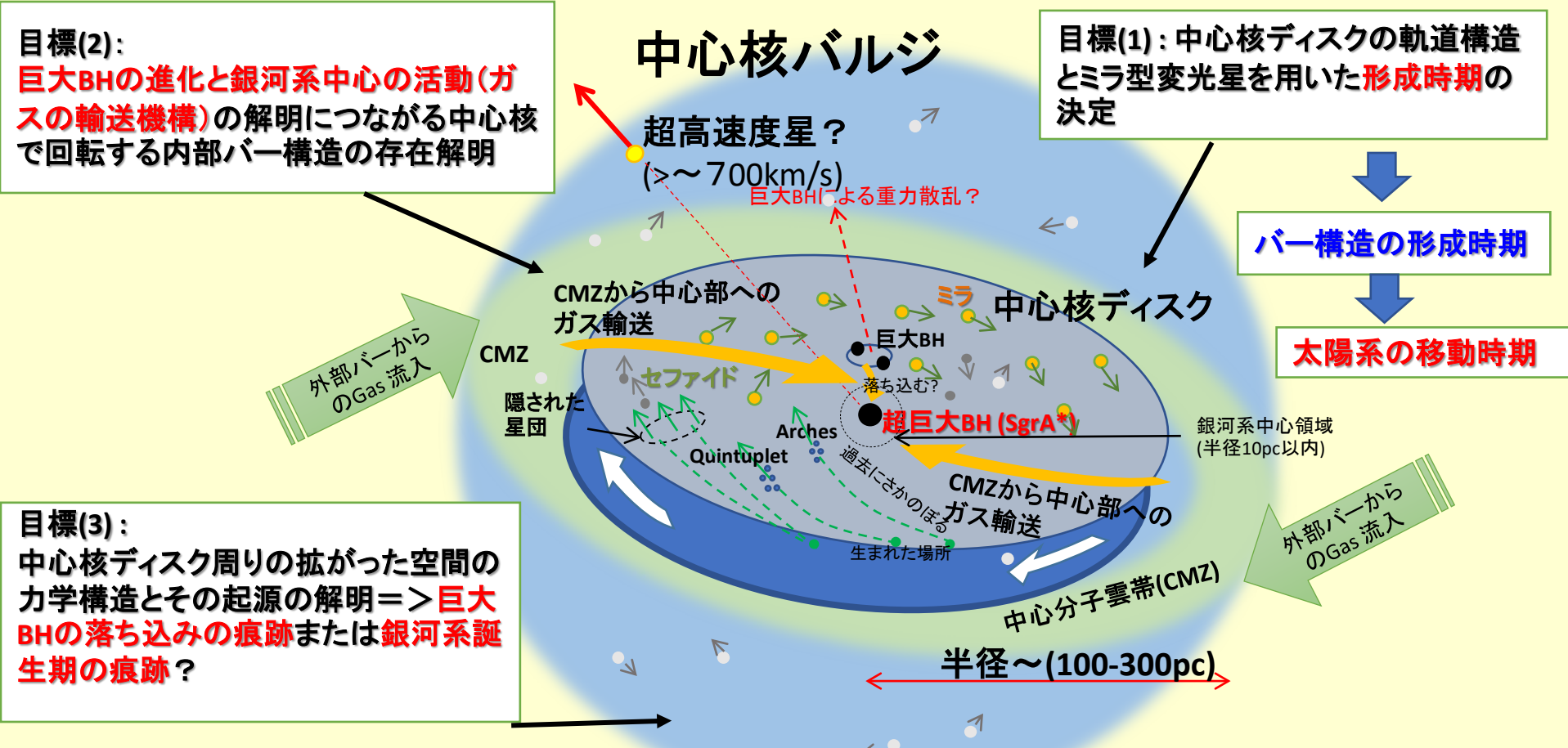
* Gaia後、天の川銀河で残された課題、そのうちJASMINEは、何を解決出来るのか、等の議論

* 科学目標に取り入れるべき要素(WGからの指摘、助言)

- 1)天文学で何が発展できるか、壮大な観点とそこにJASMINEで何が出来るかを盛り込むこと。
- 2)天の川の動的变化をみる、という新しい切口を強調すること。
- 3)天の川銀河の構造が、どう進化していくかを見ることが出来ることも取り込むこと。
- 4)やりたいことをストレートに書くこと。
- 5)トランジット観測による系外惑星探査を取り入れること。

参考I-2: 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
 \Rightarrow 星の形成史
(ディスクからのガスの流入史)

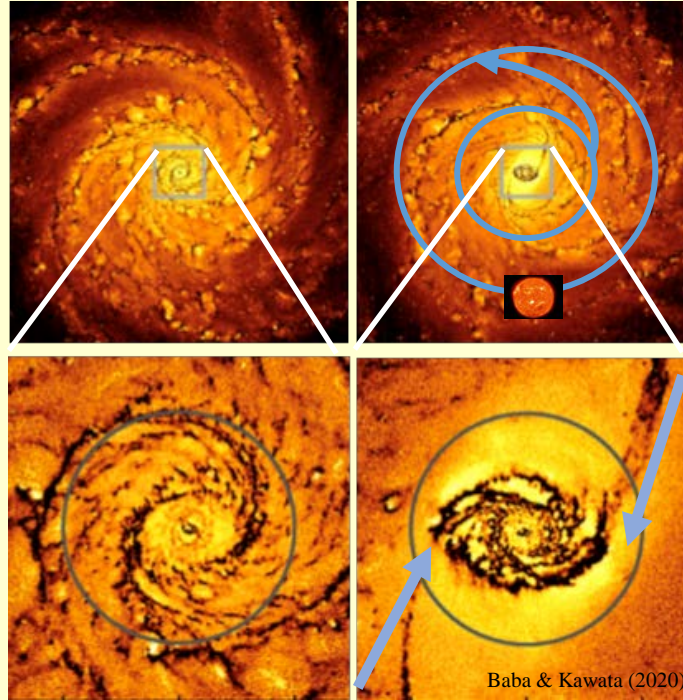
星の位置運動情報から星団の誕生した領域を探る。

超高速星はどうして存在するのか?

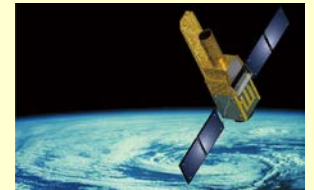
多様な天体の探求:
重力レンズ天体、コンパクト天体等

約100億年以上前 → ?十億年前 バー構造の出現 → 現在の天の川銀河

天の川銀河の種になる
小さい原始銀河が誕生後
銀河同士の合体
(→衝突銀河の残骸の
一部はハロー構造)



JASMINE



中心部での最初の
星形成：古典的バルジ

ガス流入による中心核ディスクの形成

中心核ディスク年齢=バー年齢

バーの形成 ⇒ 星の半径方向の移動

バー出現が太陽誕生（46億年前）の前か後かを
解明することで、太陽の軌道に与えた影響を探究

中心核ディスクを含む
銀河中心の星の詳細な
運動の解明

測光時系列データに
よる地球型惑星の発見

ディスクから中心核への
ガスの流入史 (←中心核での星団形成史)

ディスク構造の形成

BHの種の形成 BHの成長、内部バーの影響？BH合体の痕跡？ $4 \times 10^6 M_{\odot}$
中心巨大BH





*最後の詰めはWGメンバーとJASMINEチームの共同作業を行った。

★科学目標(Scientific Goals)最終案

*但し、将来、JAXA宇宙研で実施されるMDR
(ミッション定義審査)で最終的に確定される。

1. **赤外線による超高精度位置天文観測により、距離2万6千光年に位置する星の距離と運動を測定し、天の川銀河の中心核構造と形成史を明らかにする。**

To reveal the Milky Way's central core structure and formation history by measuring the distances and the motions of stars located as far as 26 thousands light-years away with high-precision astrometry observations in the near-infrared band.

2. **太陽系や惑星をもつ星の移動を引き起こす原因となる銀河構造の進化の過程を明らかにし、人類誕生にも関わる天の川銀河全体の形成史を探求する。**

To explore the formation history of the Milky Way related to the origin of human beings by revealing the evolution of the Galactic structures, which caused the radial migration of the Sun and other stars with their planetary systems.

3. **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、生命居住可能領域にある地球に似た惑星を探査する。**

To find Earth-like habitable exoplanets, taking advantage of the time-series photometry capability required for the precision infrared astrometry.

さらに、国立天文台JASMINEプロジェクトの組織としての
設置目的とミッションも共同作業の上、決定(補足I-3参照)

参考I-4. 科学目標から期待できる成果



科学目標1

➡ 中心核バルジに今も存在する様々な年齢をもつ星の空間分布と系統的な運動分布により、中心核バルジの力学構造とその歴史を理解する（**銀河中心考古学**）。

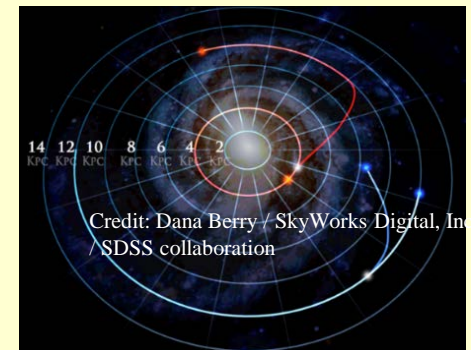
具体的には、中心核バルジ内の中心核ディスクの形成時期の決定（➡バー構造の形成時期を制限。10億年程度の差）、銀河系が誕生した際の中心核バルジ領域の力学構造や中心に存在する巨大ブラックホールの成長過程、ディスクからのガス流入に伴う星形成史等に関する知見を得る。

科学目標2

➡ 中心核ディスクの形成時期、内部ディスクの物理情報（非円運動、ディスク面振動など）

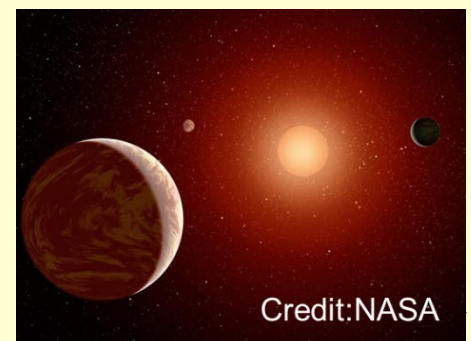
➡ バー構造の形成時期、バーの回転速度変化

➡ 太陽系や惑星をもつ恒星が誕生した場所や銀河系内を移動してきた軌跡を明らかにする研究が飛躍的に進展できる。



科学目標3

➡ 生命居住可能領域にある地球型惑星が見つかり実際に**生命探査が開始**できる。



(2) 25 μ 秒角の精度要求に関して

本当に必要か？125 μ 秒角ではだめなのか？
(必要性はキラースサイエンスと結びつく必要がある)



- * 銀河中心考古学(小目標1~3)と年周視差、固有運動の精度に関する定量的議論
- * 銀震学の遂行と固有運動の精度に関する定量的議論



簡潔、かつ明確な根拠は？

バルジにあると間違えてしまう

ディスク星の割合(コンタミの割合)を検討

結果



コンタミの割合が10%以下であることを要求すると
年周視差精度は25 μ 秒角以下の要求となる

(補足I-4参照) 

*ミラ型変光星も長周期(250日以上)の若いミラは
周期-光度関係による距離評価は、星周ダストの
影響で困難。距離評価に年周視差が必要。

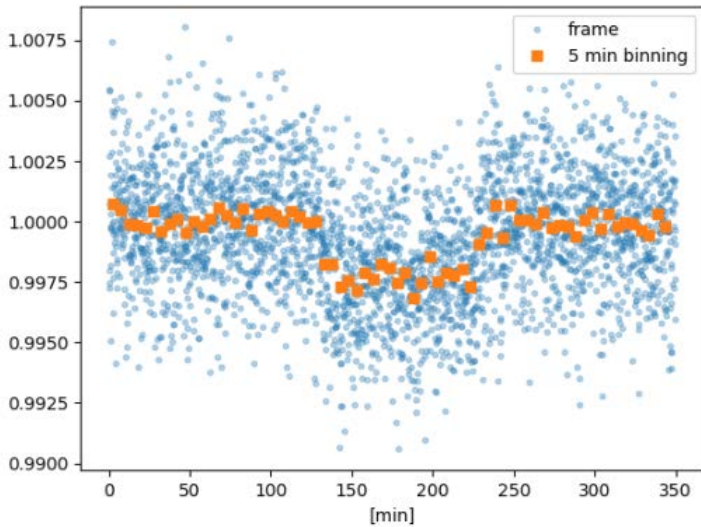
(3) JASMINEによる系外惑星観測の意義と重要性、 そしてその実現可能性

結論

- * JASMINEの科学目標として重要(参考I-5)
- * 他のミッションと比較して優位性も理解できる(参考I-5)
- * 実現可能性は現時点では問題ないが、引き続き
詳細検討(検出器性能、ポインティング精度など)
が必要。(参考I-6)

参考I-6 測光精度の検討（現状）

Intra/interpixel fluctuationによる系統ノイズ



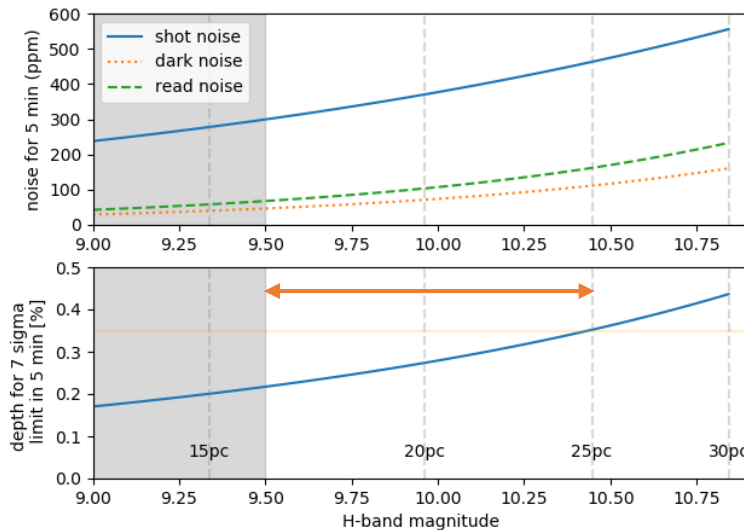
1 検出器のinterpixel, intrapixelによる systematicsは、補正無しでも0.2%のトランジットを検出できるレベルである。

2 ただし、ポインティングの精度がどのようになるかによって、検出器全体のムラを補正しないと行かない。
ポインティングのシミュレーションができたのち、これを評価する。

3 検出器のノイズは光子ノイズが卓越する。16-25pc程度に存在するターゲットならば、光子ノイズに対し、トランジット深さが卓越する

4 Persistenceの影響は、最近のH2RGのレベルであれば測光には影響しない。
ただし、 ρ の値は検出器の個性（や運用温度）に依存して異なるためH4RGの運用温度でのレベルを今後、調べていく

統計ノイズ



(4)サイエンスケースについて

WGからの指摘:

科学目標を達成できるミッション

→様々な分野での科学的成果が期待できることも示すべき。

JASMINEに総合性、多様性、他分野への拡がりがあることも重要



サイエンスケースの整理(12項目)を行い、WGで理解を頂いた。
(補足I-6参照)



(5) JASMINEの意義・独自性について

* 意義、独自性について整理を行い、WGで理解を頂いた。

- 人類が住む天の川銀河の探求
- 世界初の高精度赤外線位置天文観測衛星
- M型星まわりの生命居住可能領域にある地球型惑星の探査は有利




* 補足I-7を参照




(6) ミッション要求について

科学目標＋観測戦略

→ ミッション要求 (観測領域、観測精度、観測個数など)
(→ システム要求 → システム仕様 → 観測データ仕様)

* ミッション要求の書き方に関してアドバイスを頂き、
表現方法の改訂を行った。(補足I-8参照) 
(システム要求等の変更は伴わない範囲)

(7) 国際協力(サイエンス関連)

* 以下の国際協力に関して説明、議論(補足I-9参照) 

1. APOGEE-2(分光観測:視線速度、元素組成)
2. Milky Way Mapper & Moons
(分光観測:視線速度、元素組成)
3. GALACTICNUCLEOUS(測光観測:固有運動など)
4. WFIRSTとの連携(赤外線位置天文観測)
5. 将来の国際的位置天文観測衛星への橋渡し
(TheiaとGaiaNIR)

* WGからのアドバイス→

すばるPFSとの連携に関しても検討を進めること。
1つの望遠鏡で一様にJASMINEのフォローアップを
できるメリットは大きい。

(8) その他、WGからのアドバイス

本ワーキング・グループで得られてきたサイエンス検討の結果等はJASMINE側でホームページ等を活用し、積極的に公開するのがよい。

(9) 打上げ年について

* 当日の資料参照



III. 議論の経緯とoutcomeの概要(続き)

2. 科学目標を達成するためのシステム性能要求 およびシステム仕様の妥当性

***衛星システムの概要→参考II-1, 2**

参考II-1 衛星概要

衛星軌道: 高度550kmの太陽同期軌道

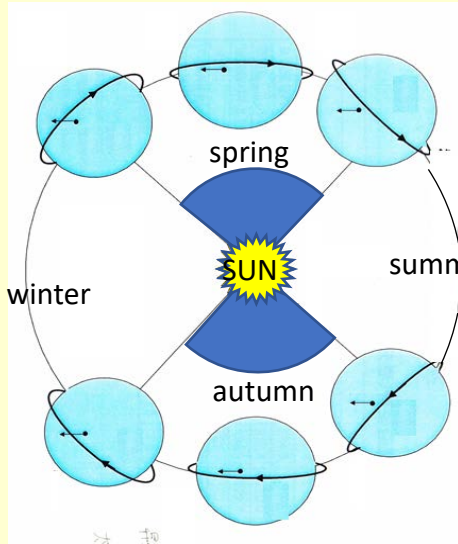
姿勢制御: 半周回はバルジ方向を観測、地球が視野に入る半周回はアルベド入射に対する回避姿勢。

サンシールドを常に太陽に向ける姿勢制御

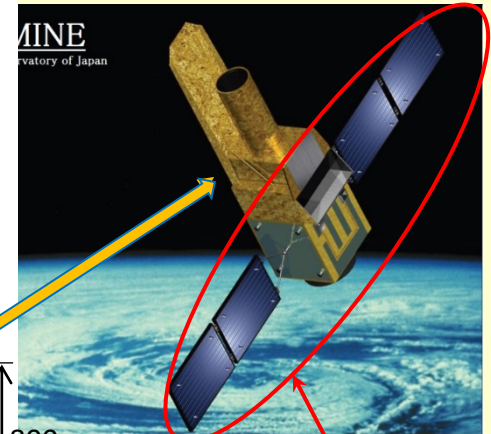
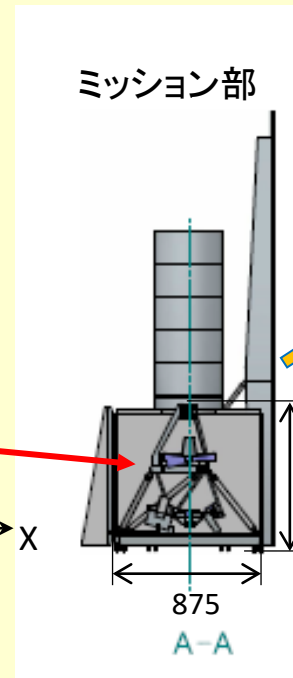
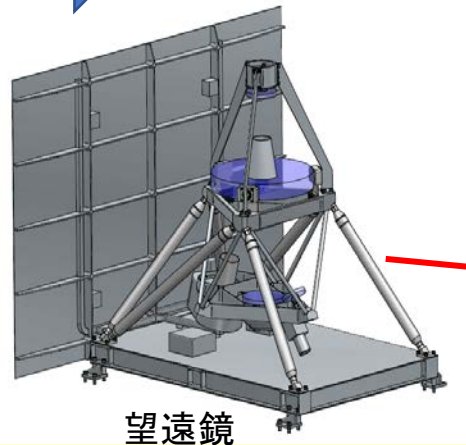
観測期間: 春秋分前後の各3か月、3年間観測。温度が不安定となる夏冬季はバルジ方向以外の天体を観測。

衛星バス: 衛星メーカ選定結果より形状は異なる。

耐宇宙環境: 本軌道における宇宙環境について考慮済み。太陽同期軌道でSAA通過の際は観測が出来ない可能性があるが、その期間のデータを運用延長で相殺するなら15%、3ヶ月程度の運用延長で良い。

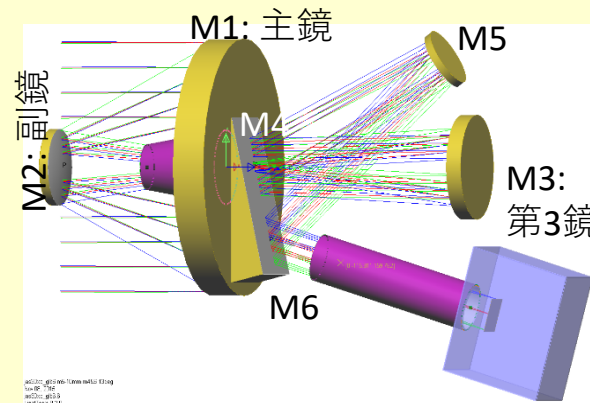
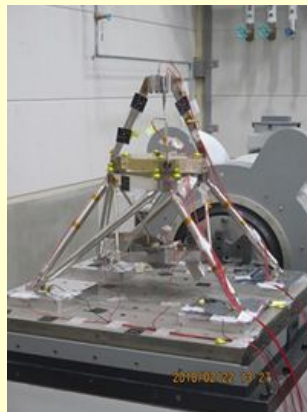


Dawn-Dusk 軌道



参考II-2 システムのベースライン

望遠鏡	主鏡口径30cm、回折限界光学系、5°Cで運用。(設計上の温度の誤差が5°C程度あるとして、0~10°Cの意味)
検出器	テレダインH4RGで、1.1 μm ~1.7 μm のフィルタを搭載、180K以下(目標170K)で運用
視野変更	Step Stair方式
通信	15等級より明るい星の、9x9 pixelの星像を切り出し、搭載Xバンド通信機で地上へダウンリンク。
熱・構造	感度解析より、望遠鏡ボックスを $\pm 1\text{K}$ で制御すると、望遠鏡は $\pm 0.1\text{K}$ で安定する。CTE 5×10^{-8} 以下のスーパースパインバを開発しており、これを構造部材に使うことで寸法安定性を実現。
解析	位置天文パラメータの導出は地上解析で行う。
打ち上げ機	イプシロンロケットを使用



システム性能要求と仕様の妥当性

(ミッション要求→)25 μ 秒角の精度達成は見通しが立ち得るか？

- ・JASMINEの位置天文の精度要求を満たすためには、地上での後処理が必須。 (参考III-1)
 - ・精度要求を満たすための性能要求→衛星データと地上処理それぞれの要求にbreak down。
(地上データ処理の方針を決定し、そのデータ処理を前提に衛星データが満たすべき要求を明確化)
 - ・衛星データが満たすべき要求→ミッション観測装置を含めた衛星の仕様要求。
 - * 精度達成の方法についての基本的な原理についてプロジェクトチーム側から説明 (参考II-3, II-4)。
 - * さらに、目標精度達成から要求される仕様を決めているキーについても説明(参考II-5)。
- その後、様々な議論。

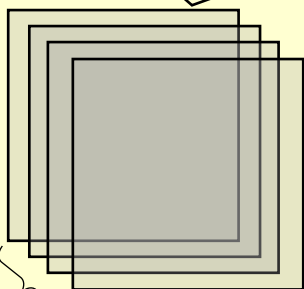
Outcome(指摘事項、助言を含む)

- * 精度達成の基本原理については、理解、共通認識がWG内で出来た。ただ、実現するためには、様々な課題があるため、さらなる検討を続ける必要があることも認識された。
- * 具体的には以下のような指摘、助言があった。
 - 熱仕様の洗い出しは運用計画に沿って行うべきである
(⇒衛星メーカーでの運用に関する詳細検討を行った上で解析を実施することとする)
 - 検出器特性については継続的に検討すること。
 - キャリブレーションの実現可能性、データ解析の妥当性を示すシミュレーションが必要である
(⇒現時点では、シンプルな条件でend to endのシミュレーションコードはメーカーで開発済み。今後、現実的な条件に拡張予定。JASMINEコンソーシアムをもとに、²³データ解析ワーキンググループを組織。体制も強化中。)(参考II-6)

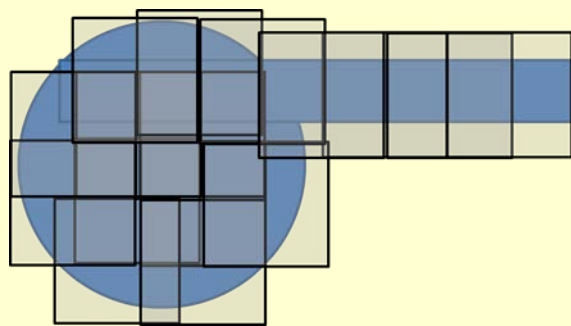
参考II-3 観測手法の概要

単位フレーム(7.1秒間撮像した視野サイズの画像) :

(A) 星像中心位置の推定



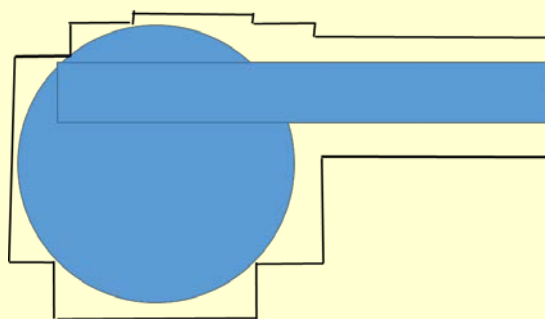
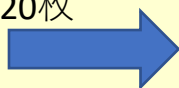
(ほぼ同一視野の) 単位フレーム約20枚
=小フレーム



小フレーム(視野サイズ)

(B):16枚の小フレーム⇒大フレーム
(地球半周回の約50分間)

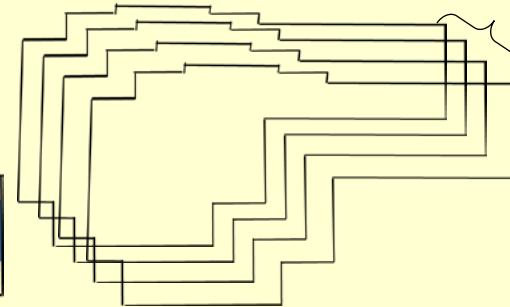
画像歪み補正



大フレーム
(銀河系中心方向の観測領域全域)

約3年間の運用期間
(1年のうち、春と秋の約半年観測)

↓
大フレーム約8000枚

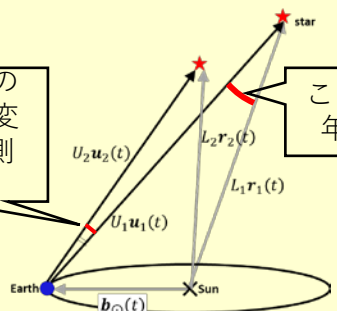


(C):
系統誤差補正
年周視差・固有運動導出

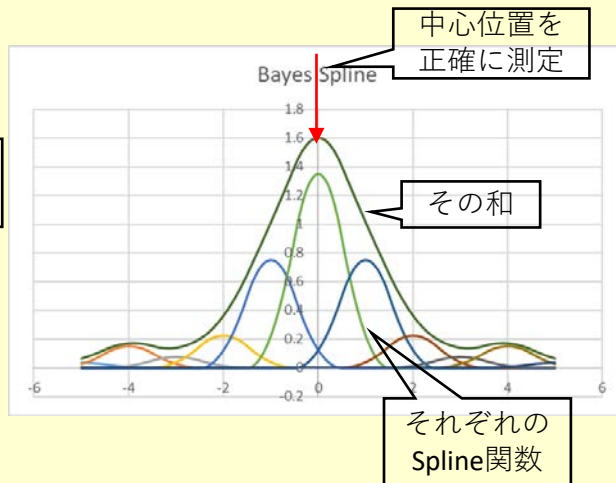
参考II-4 JASMINE 精度達成方法

同じ天体の多重撮像(15万~60万回) 星の相対位置データを用いた系統誤差の推定 (Self-calibration)

この角度(星の相対距離)の変化を正確に測る



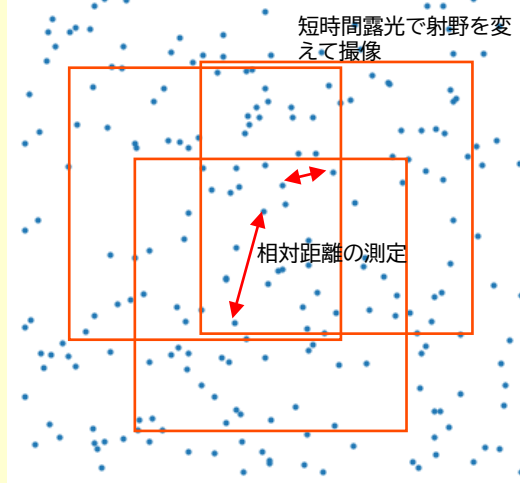
この角度が年周視差



- 星像形状の関数形は分かっていない。
- Bayes-Spline fitを行う
 - 同じカーネル関数の振幅をパラメータとする重ね合わせ。
 - ノード数は、ABIC(赤池情報量基準のBayes Spline版)で、オーバーフィットにならないことを確認する。
- 推定したPSF形状に基づいて、像の中心を1/150 pixel精度で求める。性質が良い星像が得られることが必要。

システム要求

数万個の星が視野の中に



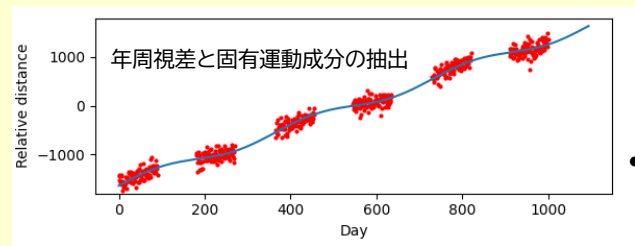
- 相対角距離を測るので、絶対指向要求は低い($\sim 0.1^\circ$)。
- 1枚の大フレーム作成期間(50分)では、星の相対位置は不変とみなせるので、その条件から画像歪み等を推定できる。ただし、観測データの有限性の制限から画像歪みのモデルはなるべく簡潔な関数で表現できることが要求される。

- 画像歪みは双多項式モデル(5次)を採用。
- 2次以上は時間変動しないこと
→50分での安定性
- * 0次(指向、指向軸周りの回転)、1次(伸び縮み)は毎撮像ごと変動して良い→Gaiaで校正。

システム要求

Gaiaで見えている。JASMINEの校正に使う

JASMINEでしか見えない



- 大フレーム同士の貼り合わせでは、大フレームの収縮・膨張成分は、Gaiaで既知の固有運動値を使って校正
- 大フレームの年周期のノイズは、Gaiaで既知の年周視差値を使って校正



参考II-5 仕様のキー

光学系	3枚鏡系を用いることにより、良像広視野を得る
望遠鏡熱制御	望遠鏡ボックス内部を $\pm 1^{\circ}\text{C}$ で、望遠鏡を遠くから制御することで、望遠鏡の温度を $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ で制御する。
検出器熱制御	振動源となる冷凍機を使わず、望遠鏡 5°C 、検出器周辺部200Kを放射冷却で、検出器170Kを電子冷却で行う。
熱構造安定性	$\text{CTE} < 5 \times 10^{-8}$ の素材を新規で開発した。これにより、高安定な望遠鏡を金属で作ることが可能となった。
擾乱耐性	共振周波数を測定済み。運用による影響は、R/Wの回転数帯域制御などで行う。
検出器	実績あるTeledyne社製H4RG-10がベースライン。
データ要求	軌道半周回のデータの質は衛星メーカーに要求。これを3年間蓄積してカタログを得る部分はプロジェクト側の責任として、データ要求を明確化した。

参考II-6 精度達成検証の現状

シミュレーションによる検証

- 検出器のノイズとしてダーク、読み出しノイズをピクセルごとの相関などを考えず、ランダムに与えた場合、また画像ひずみを多項式モデルで与えた場合、視野あたり十数個程度の星を十数回観測する場合で、**end to end**でデータを解析するパイプラインの作成が終了した。
- ノイズをより現実的にするにはどうしたらよいのか、**JASMINE**コンソーシアムの参加者の中から解析分野に興味を持ちそうな研究者に声をかけ、解析グループを立ち上げ、**2回**会合を実施した。研究者組織で議論をして、取り入れるべきノイズ要因を明確にするほか、**GPU**搭載のサーバー計算機を導入してより現実的な数の星、現実的な回数の観測を行うケースで、模擬データによる解析を実施し、精度を評価する予定である。

III. 議論の経緯とoutcomeの概要(続き)

3. システム要求仕様の実現可能性に関する 検討状況の確認

システム要求仕様の実現性

システム要求仕様を実現できる可能性はあるのか？



* 様々な観点から議論

○システムの技術的成立性

- ・要求のフローダウンと検証の説明(参考III-1)
- ・要素技術のブレークダウンの説明(参考III-2)

○技術開発プランと国立天文台先端技術センター(ATC)との協力体制

○コスト

○JASMINEの体制(補足p.113)

○スケジュール



Outcome(指摘事項、助言を含む)

*プロジェクト側の検討内容についてWG内で理解、共通認識ができた。ただし、引き続き検討を続けるとともに、国際協力の確立、体制や他組織との連携の拡充、追加コストの獲得など重要課題を解決するように進める必要性が認識された。

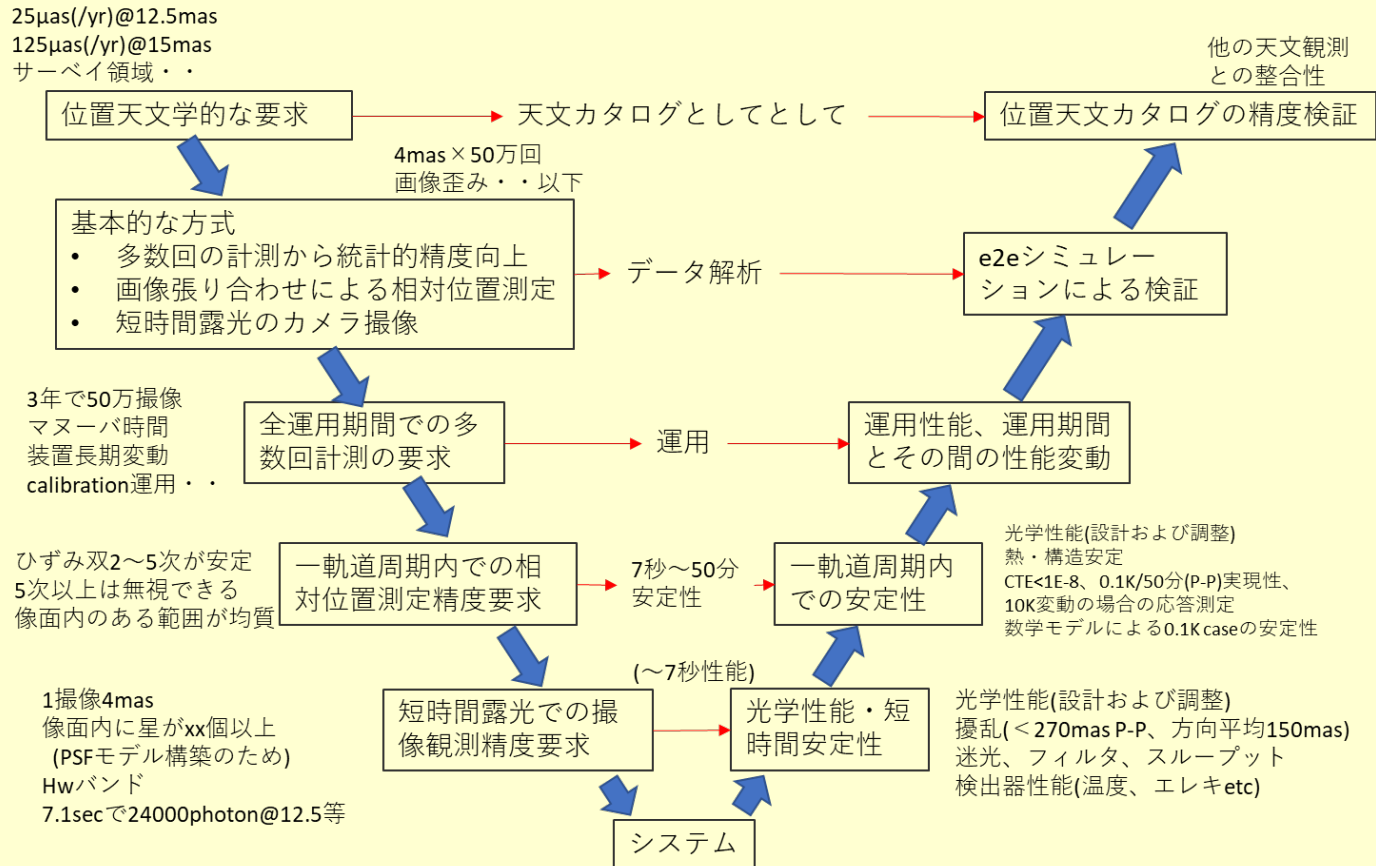
* 指摘事項、助言としては以下のような例があった。

* 要求ブレークダウンと実証の流れに関しては、V字図とすべきとの指摘。さらに、V字図の右側の上昇部分は更なら改訂方法の意見を頂いた。

* 誤差配分に対してマージンの評価方法に関する指摘を頂いた。

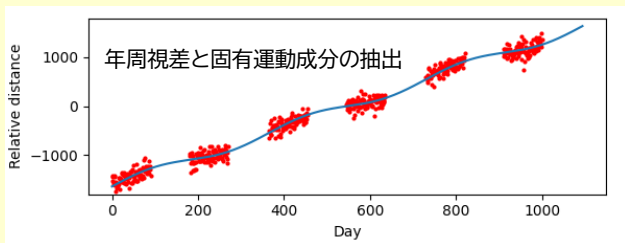
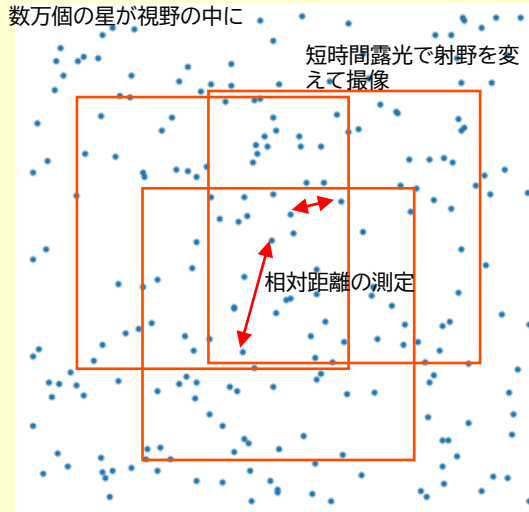
* ATCに期待する役割、協力をお願いする人材やそのタイムラインに関しては議論をいただき、今後ATCと調整することとなった。

参考III-1 要求フローダウンと検証（実現のための積み上げ）



なお、右側の上昇部分に関しては、記載された数値をどうやって検証していくのか、つまり、メーカーが製作してきたものをどうやって測定して検証するのか、そういうことも図を工夫して書き込む必要がある、等の改訂のご指摘を受けた。→今後、改訂予定。

参考III-2 要素技術ブレークダウン



(A)短時間撮像性能
撮像1視野(0.6度)の中に数万個の星 / 7秒露出20回撮像
要求: 7秒露出での良い星像 : 光学性能、低擾乱

- A1 赤外線検出器 米国既存技術 駆動回路 backup 日本担当
- A2 赤外バンドパスフィルタ 開発成功(2019)
- A3 高精度望遠鏡光学系 検証手法開発(2019-) 2020年継続課題
- A4 検出器冷却系 米国既存技術 Backup 日本担当
- A5 擾乱抑制 衛星メーカー既存技術

(B)一周回安定性
視野をずらし、重ねて観測領域を50分で覆う
要求: 50分での視野の歪み安定: 寸法安定、温度安定

- B1 超低熱膨張構造材料、光学材料 開発成功(-2018)
- B2 一軌道周回内の温度安定 原理実証済み(-2019)
- B3 温度変動による画像歪みの少ない光学系 2020年主要開発課題
- B4 地上試験での光学系検証方法確立 (2019-)

(C)衛星成立性
熱制御、姿勢制御、三年間の運用

(D)データ解析
星のペアの距離を測定。
年周視差と固有運動による移動を抽出。
要求: 逐次モデル化による最尤度推定

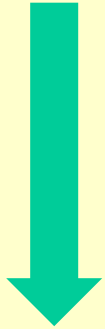
- C 多変量大量データの解析 2019年度、小規模データでの実装
- 2020年度、規模の拡大、精密化

III. 議論の経緯とoutcomeの概要(続き)

4. 海外協力体制の現状 (欧州と米国の状況と、その枠組み案)

海外協力体制(技術関連)

体制はどのようになっているか？



*技術関連の海外協力の現状に関する説明(参考IV-1)

*特に重要な米国チームへの検出器サブシステム開発の詳細内容を説明)

Outcome(指摘事項、助言を含む)

- * 海外協力体制の準備状況に関してついてWG内で理解、共通認識ができた。
- * 米国チームとの検出器サブシステム開発に関する協力はWGからも強く推奨。
- * 米国チームの予算獲得ルートには財団も視野に入れたら良いとの助言。

参考IV-1 国際協力(技術)

相手先	タスク	処置状況
U.S.チーム	検出器の調達、検出器ボックスの開発	MoOは不採択になったが、協議を再開し、別の予算獲得を目指す。
ESA	データ受信	ISAS 山田亨氏を介して、bilateralで協議に入っている。
ハイデルベルク大学およびDLR	Astrometryデータ解析	2年ほどDLR予算で共同研究を実施。次のtermの予算を申請し認められた。
バルセロナ大学	測光データ解析	数回のやりとりを実施。

今後よろしく御願ひします

Jasmine



補足資料I

(諮問事項:科学目標と達成基準関連)

補足I-1:小目標(主要科学目標(銀河中心考古学)を詳細化した目標)

* **銀河中心考古学** (以下の小目標(1)~(3)は**ミッション要求に直接つながるもの**)
(宇宙研の基準では、ミッション要求に直結する目標はなるべく少数
に絞ることとなっている) → **科学目標の1, 2から詳細化したものに相当する**

(小目標1)ミラ型変光星をトレーサーとした、中心核ディスクの存在の検証と
その軌道構造および形成時期を評価

→ **バー構造の形成時期の制限へ(中心核ディスクの形成時期の1Gy以内)**
→ **太陽系、惑星をもつ恒星の移動開始時期の導出**

(小目標2)中心核バルジでの重力ポテンシャル、特に、回転する棒状ポテンシャル
の存在の検証とその回転速度等の物理的特徴の解明

→ **ディスクから半径100pc程度に輸送されてきたガスをさらに、半径数pcに
どうやって輸送をするのか?その輸送機構の1つである内部バーの検証**
→ **巨大BHの質量の成長、中心領域での爆発現象活動性への研究に
進展**

(小目標3)星の位相分布関数を用いた、中心核ディスク周りの広がった空間の
力学構造とその起源の解明

→ **もし“平衡状態” → 複数の巨大BHの落下の可能性を示唆
そうでない場合 → 現在の構造が形成した時(天の川の誕生時)の
情報(古典的バルジ?)を得る。**

補足I-1(続き): その他の小目標(銀河中心考古学関連)



(小目標4)中心付近の(若くて大きな)星団の運動探求と星団起源の解析

* 固有運動をもとに過去にさかのぼることにより星団の

誕生場所を探る。

→中心部では最近、どこで、どのように星団が生まれるのか？
が見えてくる。

(小目標5) 中心核バルジ内の未知な星団の検知と形成史の解析

* 固有運動や作用積分量の情報をもとにした(共通の固有運動をもつ)

“隠された星団”の探査(年齢が数億年程度以内) + 星団の年齢情報

→星団の形成史の情報

→ディスクから中心核バルジへのガスの流入のhistoryが
分かる。

* 星団の残骸テールの作用積分での位相空間情報

→内部バーの是非や回転速度の物理情報を評価できるかもしれない

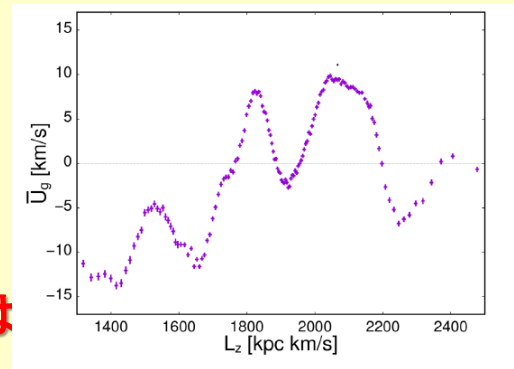
補足I-2: 銀震学



半径方向の平均速度

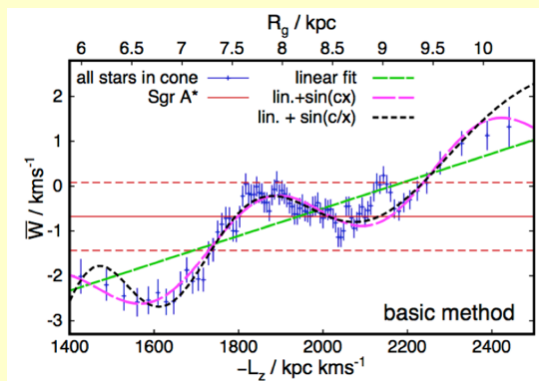
銀河面に垂直方向の振動と 銀河半径方向の振動

Friske
& Schönrich
(2019)



垂直方向の平均速度

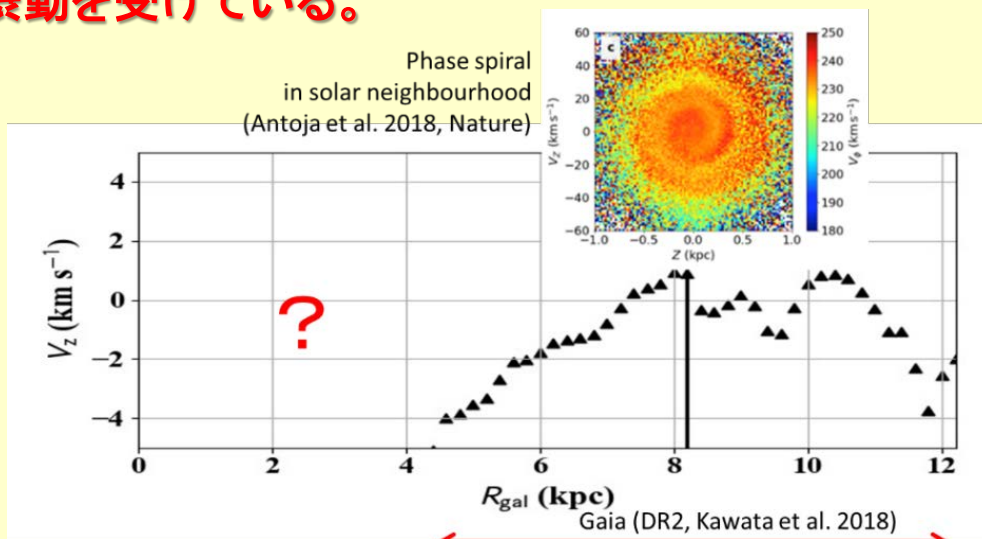
Gaia DR1 solar neighbourhood
 $R_g \leftarrow L_z$



Schönrich & Dehnen (2018)

**Gaia DR2 => 銀河系ディスクは
なめらかに回転しているのではなく、
摂動を受けている。**

*** Gaiaでは、内部銀河面は
観測困難** →



**JASMINEは、内部ディスクでの
振動の物理情報を提供**

JASMINE

銀河中心からの距離

Gaia DR2 using the current radius

Kawata et al. (2018)

補足I-3



国立天文台JASMINEプロジェクトの組織としての 設置目的(案)

JASMINEプロジェクトはJAXA宇宙科学研究所が推進する「小型JASMINEミッション」に参画・貢献し、世界初の赤外線による超高精度位置天文観測と時間軸天文学観測の実現を目指す。

The JASMINE project participates in and contributes to the Small JASMINE mission of ISAS/JAXA, aiming to realize the world's first near-infrared high-precision astrometry and time-series photometry.


補足I-3の続き . 国立天文台JASMINEプロジェクトの ミッション(案) * 但し、国立天文台の分担は、将来、JAXA宇宙研 で実施されるSDR(システム定義審査)で確定される。

1. JAXA宇宙科学研究所が推進する「小型JASMINEミッション」を実現させるために、科学検討、および観測装置とデータ解析ソフトウェアの開発に対して貢献する。

To contribute to scientific verification and development of the instruments and the data analysis software for the Small JASMINE mission of ISAS/JAXA.

2. JAXA宇宙科学研究所のリーダーシップの下での国際的な枠組みの中、天の川銀河の中心領域にある星の年周視差・固有運動・光度曲線等の物理情報のカタログを作成し、科学コミュニティーへと供する。

To provide the scientific community with a catalogue of physical information, including parallaxes, proper motions and light curves, for stars in the Galactic Center, through an international framework under the leadership of ISAS/JAXA.

補足I-4: 

**25 μ 秒角の年周視差精度が必要な
定量的根拠**

既存の観測をもとにした模擬データ(星の分布)を用いた検討

模擬データ:星の真の分布

- VVV, 2MASSカタログを用いた。
- JASMINEの観測領域において観測される天体で見積もられるバルジ星、ディスク星の割合を利用

($J-K < 2$ の時ディスク、 $J-K > 2$ の時バルジとした)

- 中心より手前のディスク星において、距離における各bin(0.2kpc)の観測個数はおおよそ等しい。

VVV, 2MASSの観測天体数において $N \propto 10^{0.4m}$ (m :見かけ等級)となる観測事実にくわえ、絶対等級と個数の関係がべき則であること、星間吸収の影響が小さい事を仮定すると導出できる。汎用されている銀河系モデルであるGalaxiaにおける見積もりともconsistent。

- 遠方ディスクにおいての詳細は不明。そこで仮定として手前のディスクと同様に各binの個数は等しいとした。ただし、遠方は手前と比較しバルジによるダストの影響が強く、実際の観測個数は少なくなる。バルジ領域で、Hバンドにおいて平均的に2-3magの減光があるが、仮に1magしか減光がないとしてbin毎の個数密度は($N \propto 10^{0.4m}$ 測を使うと1/2.5となるので)、奥のディスクは各binあたり手前のディスクの個数密度の1/2.5とした(コンタミの影響をみるが、影響が大きくなる、奥のディスクの星を多めにみた場合でもどの程度大丈夫かを調べるため)

- 以上から観測できる天体分布として、

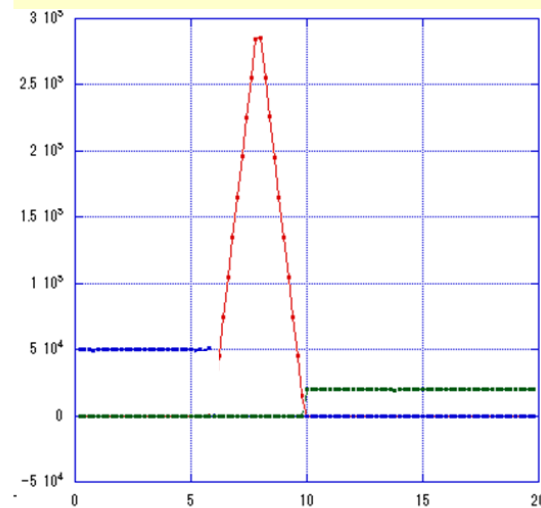
0-6kpc(手前のディスク), 6-10kpc(バルジ), 10-23kpc(奥のバルジ)

に星を1:2:($0.4 \times 13/6$)の割合で与える。6-10kpcはバルジの中心集中を

考慮し簡単のため山型分布とする。(ここの形状に結果はさほど依存しない)

星の“真”の距離分布

Bin幅(0.2kpc)あたり個数

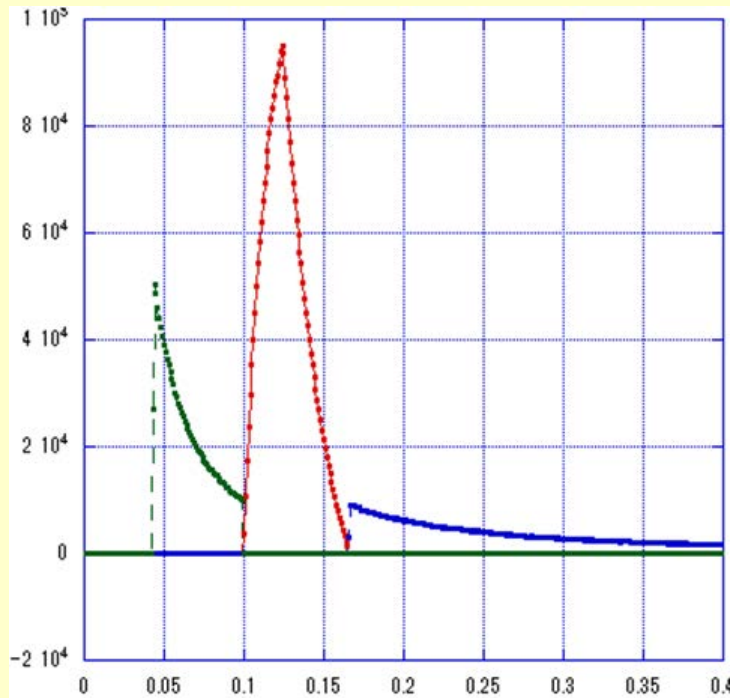


太陽からの距離d [kpc]

模擬データ(観測誤差無し)に対する 年周視差の個数分布

星の“真”の年周視差分布

Bin幅(0.001mas)あたり個数



年周視差 π [mas]

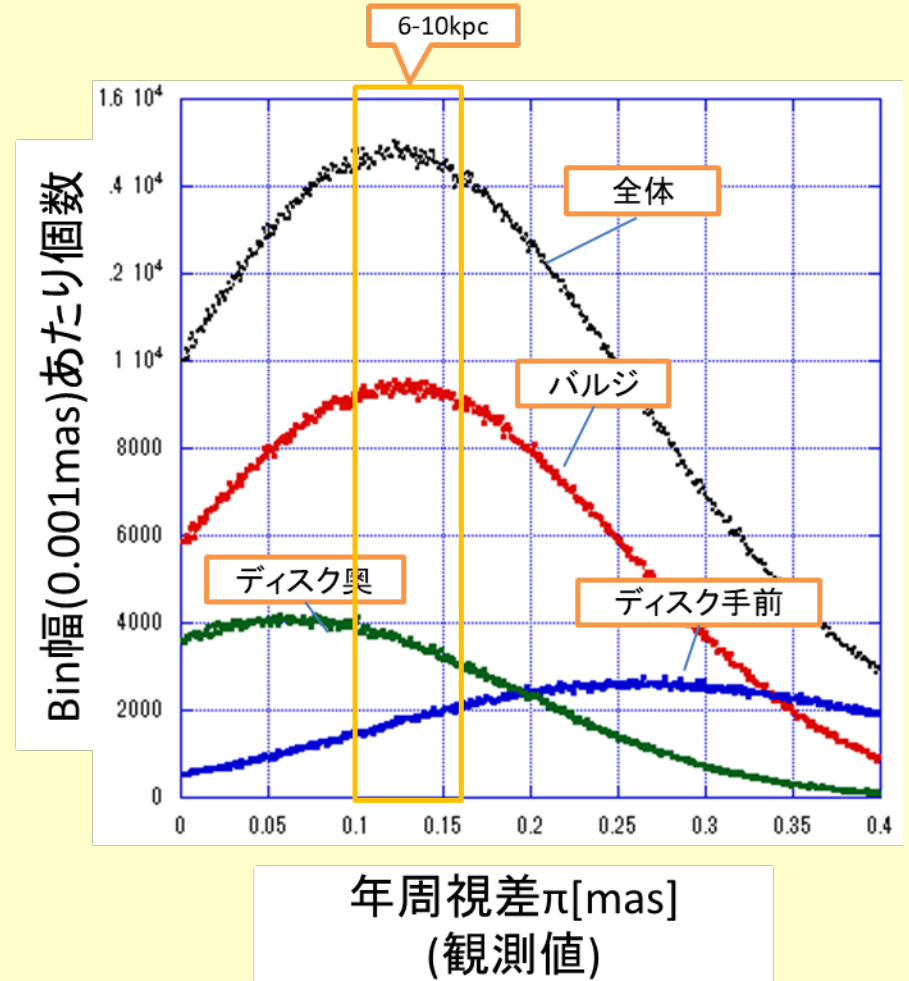
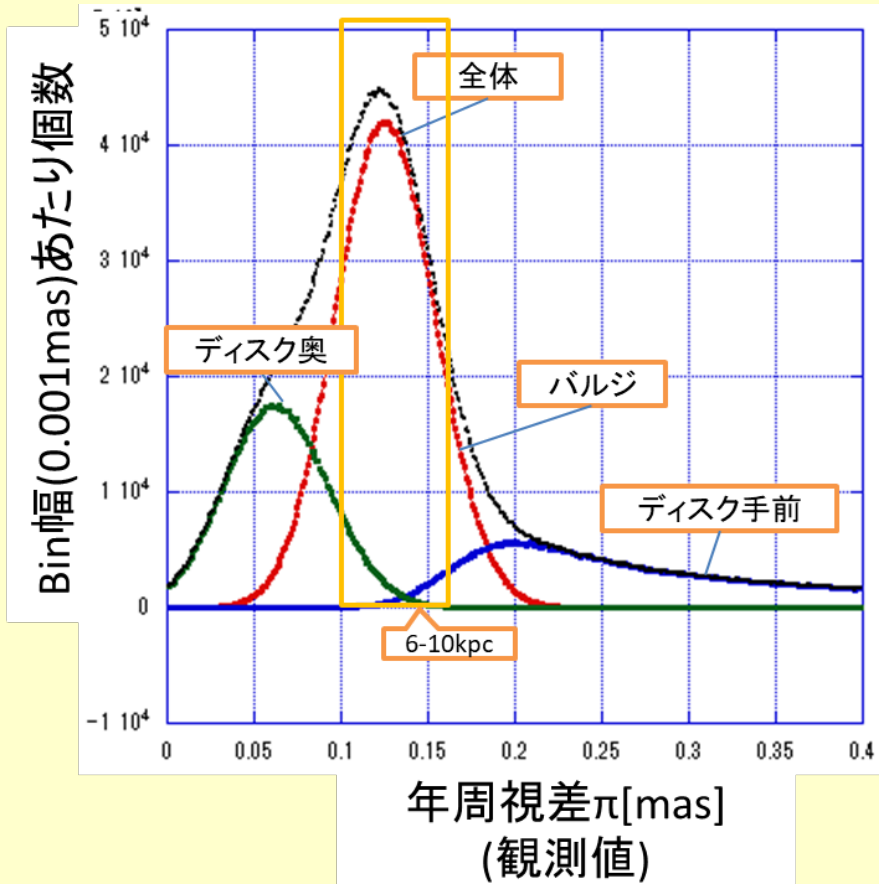
赤:バルジ星

青:手前のディスク星

緑:奥のディスク星

模擬データ(観測誤差有り)に対する年周視差の個数分布

左図: 年周視差誤差 = $25\mu\text{as}$ 、右図: 年周視差誤差 = $125\mu\text{as}$



バルジにあると間違えてしまう ディスク星の割合(コンタミの割合)

年周視差の測定値から求めた距離が、6kpc-10kpcにある星を”バルジにある星“とみなす。

しかし、周りのディスクにある星も観測誤差の影響でバルジにあると間違えてしまう。

観測精度	バルジにあるとみなすディスク星の割合
25 μ as	0.09
125 μ as	0.36



コンタミの割合が10%以下であることを要求すると
年周視差精度は25 μ 秒角以下の要求となる

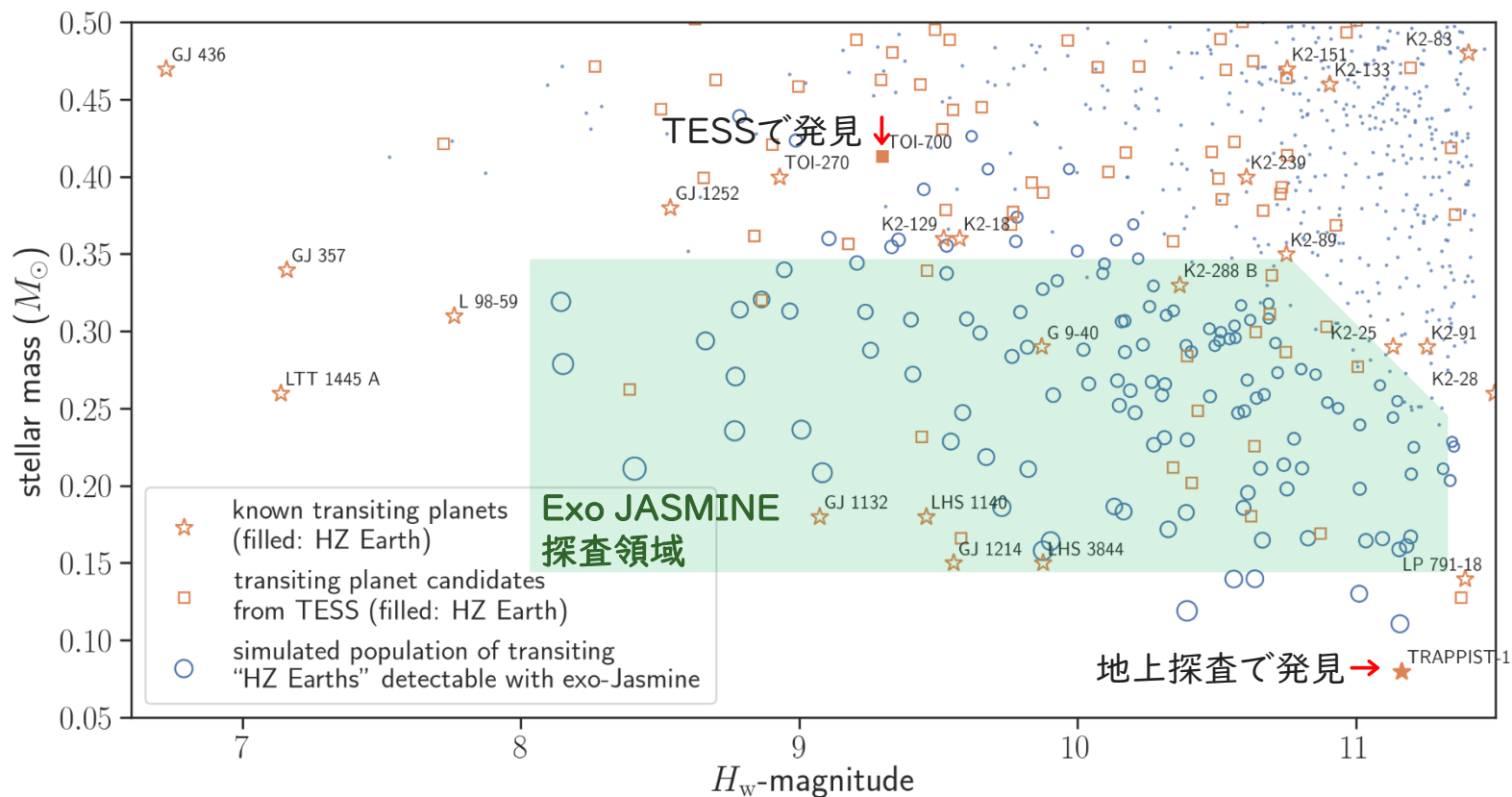
補足I-5:小目標(系外惑星関連)の詳細説明



系外惑星関連の小目標

- (1) 既知のトランジット惑星をもつ**10-20**個の明るい晩期型星を1週間-3週間程度継続して観測し、生命居住可能領域に存在するものを含む新たな地球型惑星をトランジット法で発見する。
- (2) 既知の惑星のトランジットタイミングを計測することで、惑星質量の推定や暦の更新を行い、フラグシップ機でのキャラクタリゼーションのための基礎情報を得る。
- (3) **Spitzer**が担っていたトランジット惑星やマイクロレンズ現象の宇宙からの即時フォローアップ観測を行い、**2020**年代後半の系外惑星探査ネットワークの一翼を担う。
- (4) **Gaia**の結果と組み合わせることで、遠方軌道の惑星をアストロメトリ法により発見する。

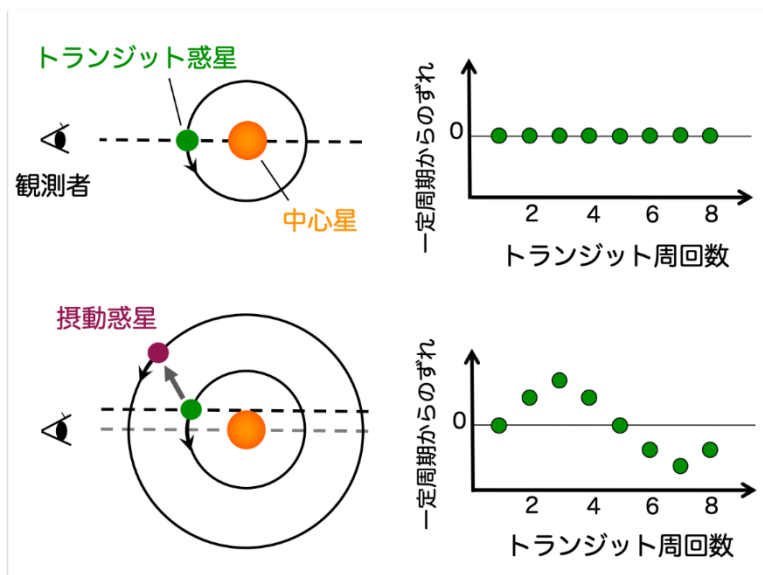
Exo Jasmineで発見可能なハビタブル地球惑星の数の予想



上図は、縦軸に恒星の質量、横軸にJASMINEでの恒星の明るさ(等級)をとり、近傍の恒星系に、ランダムにハビタブルゾーンにいる地球を置きトランジットが起きるものを取り出したプロットしたシミュレーションである。(系ごとの存在確率を1としている)。○のついているものはJASMINEで検出可能、大きいものほど有利である。これまでに発見されたTRAPPIST系(地上探査)、TOI-700(宇宙探査TESS)を矢印で示した。Exo JASMINEはこの間に位置する緑色の領域を、内側惑星の存在などの事前情報を用いながら10-20個を選抜し、1週間-3週間程度継続して観測し、生命居住可能領域に存在するものを含む新たな地球型惑星をトランジット法で発見をめざす。

Exo Jasmineは地上探査とTESSの間の0.15-0.35Msol領域を狙う

トランジットタイミング変動の継続観測による惑星の質量推定

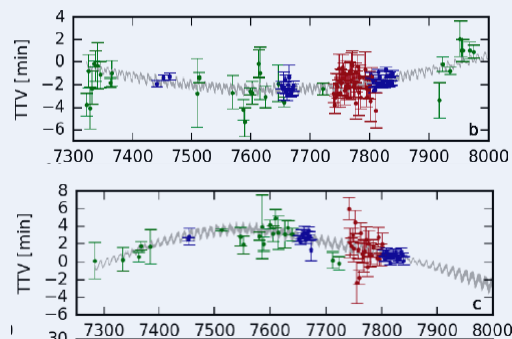


トランジットのタイミングに与える影響から惑星質量を推定できる。

複数惑星系では複数の方法による質量推定が肝要。

例：Trappist系の質量推定のtension

トランジットタイミング変動による推定



expected K :

b 3.05 m/s

c 2.96 m/s

d 0.64 m/s

e 1.45 m/s

f 1.53 m/s

g 1.71 m/s

h 0.43 m/s

視線速度(IRD)による推定

$K_b = 8.4 \pm 1.6$ m/s

Hirano+20

+トランジットの暦の精密決定はJWST時代の事前観測として重要



☆ Trappist系は地上での2惑星発見のあとSpitzerによる継続フォローアップ観測によりさらに5惑星が発見された

☆ Spitzerは引退。Exo JASMINEは宇宙からのフォローアップ観測ができる貴重な衛星となる

○ フォローアップ観測のターゲット

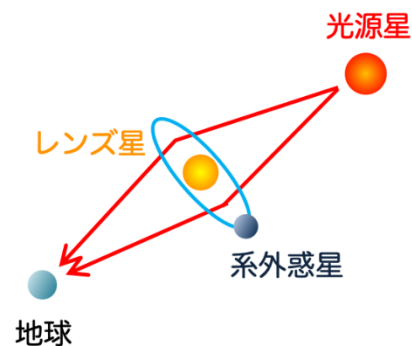
- 地上観測による特に晩期型まわりのトランジット惑星

Exo JASMINEによるサーベイターゲットよりさらに晩期星のまわりのトランジット探査は地上探査が有利である。見つかったトランジットは、Trappist系のように宇宙からの継続フォローアップにより、確実な証拠が得られるほか、さらなる惑星の発見や暦の精密決定などが可能となる。Spitzer衛星が担っていたこの役割をJASMINEで引き継ぐことができる。

- 系外惑星を持つ重力レンズイベント

惑星系の背後を別の恒星（光源星）が通過すると、重力レンズ効果により光源星が一時的に増光し、その増光パターンから惑星の存在を発見出来る。他の手法では難しい、雪線以遠（数AU）の地球型惑星の発見が可能である。地上サーベイで発見された惑星イベントをJASMINEで同時に観測することで、地上と衛星による”視差”効果および光源星の”位置変化”を観測でき、惑星系の距離や質量を高精度に測定可能となる。

重力マイクロレンズ法





1. 銀河力学による銀河中心考古学

中心核ディスクの形成時期、銀河系誕生時の力学構造、
中心での星団形成→ディスクから中心核ディスクへのガスの流入ヒストリ
(星形成史)

2. 中心巨大ブラックホールの成長過程

中心核バルジ領域での内部バーによるガス輸送、巨大BHの落下

3. 太陽系と惑星をもつ恒星の銀河系内移動

バー構造に伴う移動

4. 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

5. 中心方向以外の銀河面探査

銀河面にある恒星系の化学動力学

6. 中心領域でのブラックホール探査

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

補足I-6: サイエンスケース(続き)



7. 系外惑星の探査

キャラクターゼーショントランジット法による一般の地球型惑星探査、既知惑星のトランジットタイミングの精密測定による質量推定・トランジット暦の精密決定、位置天文学的惑星探査

8. 中心領域での共生星X線連星の探求

共生星X線連星の正体判別によるX線の銀河面リッジ放射の点源の種族制限

9. 星間吸収物質と磁場構造の3次元分布

10. 高エネルギー天体連星(X線連星系や γ 線連星系)のコンパクト天体の探求

軌道要素解析によるコンパクト天体の質量や公転面軌道などの決定

11. 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変化、星震学

12. 高速度星の起源とSgrA*周りのS-starsの起源

位高速度星の発見と軌跡を遡ることによる起源の探求。起源に基づいたS-starsの起源の研究

補足I-7 : JASMINEの意義・独自性

人類が求める最も基本的な科学目的 : **人類がなぜ宇宙にいるのか？**

宇宙誕生から人類誕生までの過程は？

人類が住む天の川銀河(銀河系) 探究とその意義

1. 我々が住む太陽系は、(星をつくるもとになるガスに含まれる元素の種類や量などの環境要因も含めて) 銀河系からの影響を複雑に受けてきた。銀河系内のどこで太陽や惑星が生まれたのか？またその後、どういう軌道を取り、周りの宇宙環境からどのような影響を受けてきたのか？

→ 太陽系の軌道が変わっていくのは銀河系の構造やその進化が深く関わる。

→ **自らが住む銀河系の構造と進化を“知る”ことが人類誕生の謎を解くためにも重要。**

2. 個々の星に分解でき、星の距離、運動速度等が詳細かつ精密に分かる唯一の銀河

→ 他の多くの銀河の形成・進化を知るための**良い“テンプレート”、“実験場”**

何が分かってきたか？ → Gaiaによる革命的な最近の成果

ESAが運用中の可視光位置天文観測衛星Gaiaが革命的な研究成果を上げてきている。

* 2018年4月に公開した2回目の中間リリースのデータカタログを利用した論文は**2700本以上** (論文生産率はハッブル衛星を越えたと言われている)

★ 銀河系の力学構造、恒星系の運動構造 → **予想せぬほど複雑!**ということが分かってきた

* 太陽系近傍やその周辺 → **多くの異なった系統運動を示す運動星団**が存在

* 太陽系周辺の銀河面 → 恒星の運動が振動している (銀河面の“さざ波”の発見!)

原因候補 : (1) 非軸対称構造(バー構造、渦状腕)、(2) 矮小銀河の衝突、合体



ESA

残っている課題は何か？

(1) 太陽系の移動や様々な力学的現象に影響する非軸対称構造(バー構造、渦状腕)の形成時期、物理的特徴？

* バー構造の形成時期は解く鍵は、中心核バルジにあると思われる**中心核ディスクの形成時期**

(数値シミュレーション→バー構造の形成時期とほぼ同時 (10億年以内))

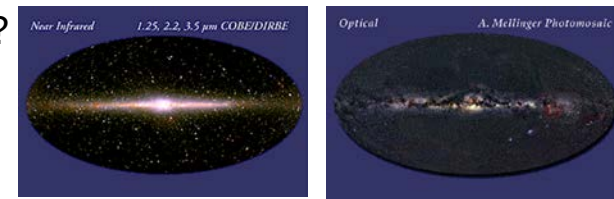
(2) 銀河面の振動は、Gaiaの観測では太陽系から中心に向かって1万年光年程度まで。可視光観測のGaiaでは観測困難な**中心領域での銀河面震動**はどうなっているか？ → 銀河面振動の起源、ダークマター分布につながる。

(3) 銀河系の最初の星形成から現在にいたる様々な年齢と元素量の星を包含し、年齢に応じた異なる運動分布をする
(歴史が凝縮している) **銀河中心領域**の恒星系の力学構造はどうなっているか？

(4) **中心にある巨大ブラックホール**の成長と銀河系の進化との関係は？



可視光観測であるGaiaでは塵やガスに覆われている中心領域は見えない！！



NASA

JASMINEの意義、独自性

可視光では観測が困難な中心核バルジの星の赤外線観測による高精度な距離と運動情報は**世界初**であり、人類の知的財産としての価値が高い。

JASMINEで期待される科学的成果

- 中心核バルジに今も存在する様々な年齢をもつ星の空間分布と系統的な運動分布により、中心核バルジの力学構造とその歴史を理解する (**銀河中心考古学**)。それをもとにバー構造等の銀河系主要構造の形成史の知見を得る。具体例としては、中心核バルジ内の中心核ディスクの形成時期を求め、バー構造の形成時期に強い制限を与える。また、銀河系が誕生した際の中心核バルジ領域の力学構造や、中心に存在する巨大ブラックホールの成長過程、ディスクからのガス流入に伴う星形成史等に関する知見を得る。
- バー構造の形成時期等が明らかになると太陽系や系外惑星系が誕生した場所や銀河系内を移動してきた軌跡を明らかにする研究が飛躍的に進展できる。

銀河系サーベイデータが2020年代に出揃い、 銀河系天文学が黄金期をむかえる！！



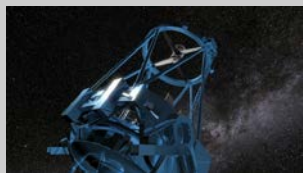
Gaia
(2013-23)



JASMINE

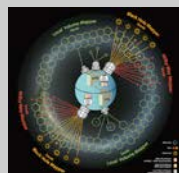
Gaia Final Full Data
Release
(2028?) Time-series data

Gaia (1,623 papers/year) Final data
release による論文大量発生の波に乗る。



Subaru/PFS SIPでの銀河中心フォローアップ
(SSP 2022-27)

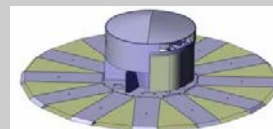
地上NIR-MOSによる銀河中心領域の
視線速度、金属量情報などが出そろっ
固有運動情報を黄金期のコミュニティー
に提供。



SDSS-V Milky Way Mapper
(2020-25)



VLT/MOONS (2020-), VISTA 4MOST (2022-)



GaiaNIR
(2045?-)

世界初の赤外位置天文学衛星として、
サイエンスを切り開くことで、GaiaNIR
を後押し

- * SIP: Subaru Intensive Program
- * SSP: Subaru Strategic Program
- * NIR-MOS: Near infrared-Multi-Object Spectrograph



人類が求める最も基本的な科学目的：**人類がなぜ宇宙にいるのか？**

系外惑星探査とその意義

我々は宇宙で孤独なのか？

- 太陽系外惑星の発見以来、科学的に解答可能な具体的問題として宇宙科学の最重要課題。
- 地球に似た惑星で、生命居住可能領域にある惑星の探査。
- 地球外生命探査の開始に結びつく。

Exo-JASMINEの意義、独自性

太陽より小さく低温の晩期M型星とよばれる恒星（太陽の20%程度の半径、温度は3千度程度）の周りの生命居住可能領域にある地球型惑星のトランジット観測に関しては、他の**スペースミッション**(TESS：可視光観測、主鏡口径10cm)**より有利**であり、地球型惑星が検出できる可能性が高い。理由は、低温星が可視光より近赤外線で見ると観測する方が明るいこと、およびTESSより望遠鏡主鏡の口径が大きいため高い集光能力を有すること。さらに、1つの天体に1ヶ月程度の連続観測することが可能であるため。

Exo-JASMINEで期待される成果

- 生命居住可能領域にある地球型惑星が見つかり実際に**生命探査が開始できる**。

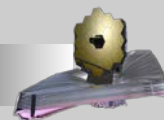


Exo-JASMINEと他のプロジェクトとの連携

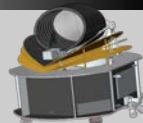


JASMINE発見天体の分光観測による大気検出

JWST 6.5m
(2021-?)



(目標寿命10年)

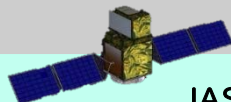


(4年)

ARIEL ~1m専用
(2028-)

JWST, ARIELの両方の分光による追観測ができる可能性がある。

地上探査発見天体の宇宙からのフォローアップ

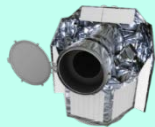


JASMINE

(3.5年)



Spitzer
(2003-2020)



CHEOPS (2019-)

Spaceからのトランジット・フォローアップ観測の空白を埋められる

参考:サイエンスケースのまとめ

JASMINE

プロジェクトサーベイ

特定天体観測

銀河力学 の課題 (バー構造関連)

(バー構造関連)

- ・バルジ形成
- ・運動星団の起源
- ・銀河面振動の起源
- ・ガス輸送
- ・Radial migration
- +銀河面振動

数値シミュレーション

太陽系の誕生現場と軌跡

中心考古学

銀震学

系外惑星 その他

矮小銀河

バー構造の重力場

- ・バーの形成時期
- ・バーの質量分布
- ・パターン速度とその時間変化

中心核ディスクの形成時期

内部ディスクでの振動情報

トランジット観測:

- ・M型星周りのハビタブルゾーンにある地球型惑星の探査
- ・位置天文的探査

- ・高エネルギー天体連星系
- ・BH探査
- ・恒星表面活動

形成史

- ・古典的バルジの痕跡?
- or サブ構造?
- or 隠れた星団?
- or 巨大BHの落下の痕跡? (緩和状態)

- ・内部バーの存在とパターン速度

- その他
- ・BH探査
- ・HVSの起源
- ・ダスト分布

ディスク面の重力場

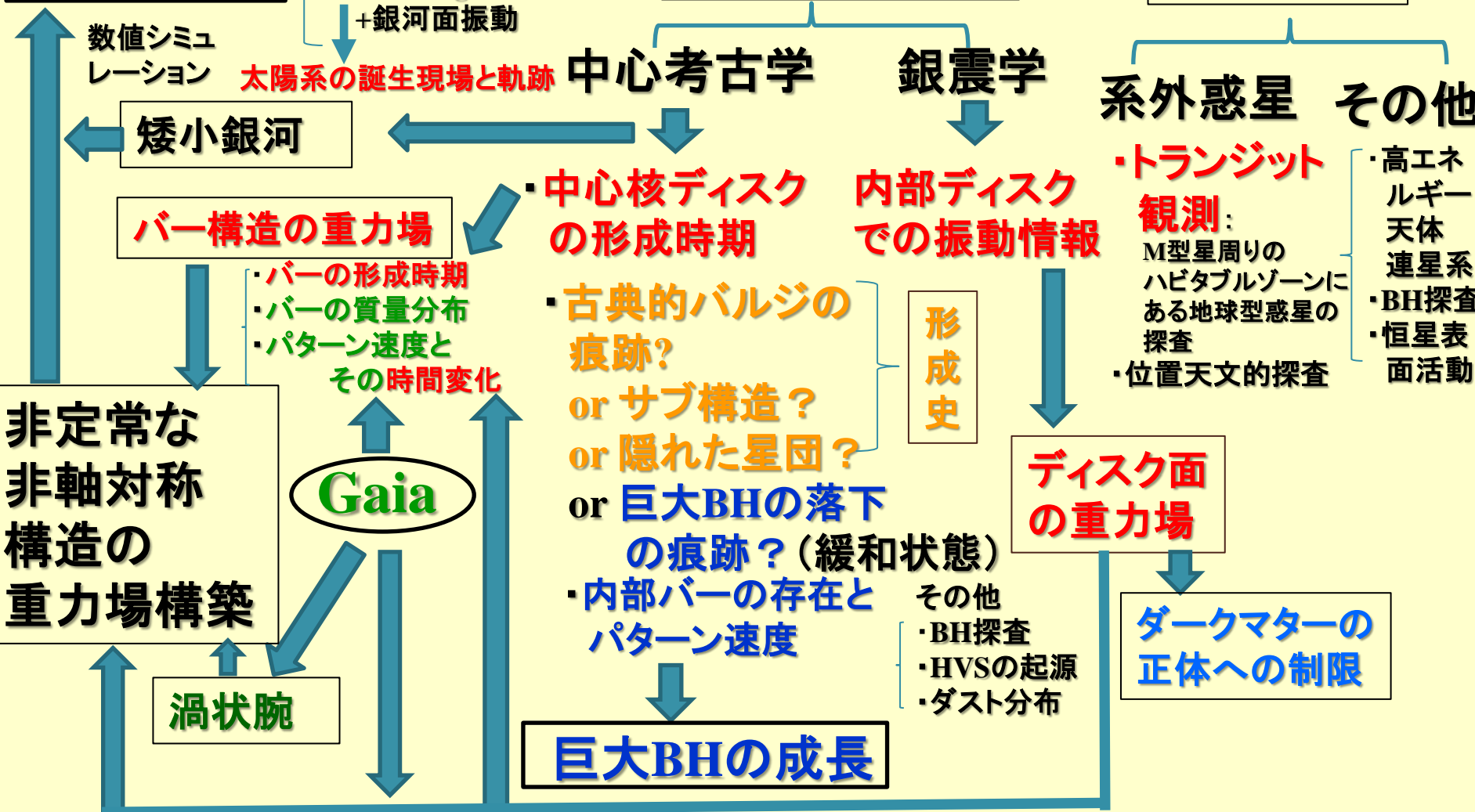
ダークマターの正体への制限

巨大BHの成長

Gaia

渦状腕

非定常な非軸対称構造の重力場構築



補足資料I-8

ミッション要求と達成(成功)基準



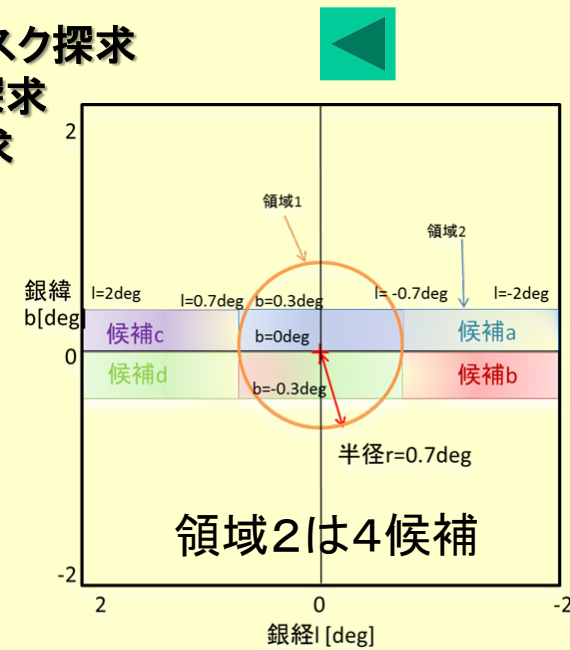
小目標(1), (2), (3)

- *ミラ型変光星による中心核ディスク探求
- *棒状構造重力ポテンシャルの探求
- *広がった空間での力学構造探求

観測戦略: ミッションが実施する研究(investigations)

(小目標毎のミッションデータ要求)

総合的なミッション要求



(MR-A) 観測領域を、領域1と領域2とする。

(MR-B) 領域2内の3000個以上のバルジの星の年周視差を誤差 $25\mu\text{as}$ 以下で、固有運動を誤差 $25\mu\text{as/y}$ 以下で測定する。

(MR-C) 領域1内の3000個以上のバルジの星の年周視差を誤差 $25\mu\text{as}$ 以下で、固有運動を誤差 $125\mu\text{as/y}$ 以下で測定する。

(MR-D) 観測領域2において、中心核ディスクにあるミラ型変光星の周期分布をもとに、ミラ型変光星の最も古い年齢を求めること。その際、周期が250日以内のミラ型変光星に対しては、固有運動の精度が $125\mu\text{秒角/年}$ 以下で測定できること。さらに、周期が250日以上ミラ型変光星に対しては、年周視差の精度が $25\mu\text{秒角}$ 以下、固有運動の精度が $125\mu\text{秒角/年}$ 以下で測定できること。また、以上の精度を満たすミラ型変光星の観測個数に関しては、観測個数の有限性に伴って年齢の判断を誤ってしまう確率は0.3%以内であること。

(MR-E) 領域1と2において測定された星に対して、星の天球面上での位置変動の時系列データおよびそこから導出された星の年周視差、固有運動等の必要な物理情報をカタログとして作成し、世界の研究者へ公開する。

まとめ
たもの

達成基準(成功基準)



○フルサクセスレベル

ミッション要求を満たし、計画通りのデータカタログが公開できたこと。

○Threshold レベル

次の条件を満たすデータが観測で得られ、カタログを作成し公開できる場合を thresholdレベルとする。

(MS-A) 観測領域に関しては、ミッション要求にある条件(MR-A)を満たすこと。

(MS-B) 固有運動の精度が 125μ 秒角/年 以内で測定出来ている星が、領域1と2内で各々3,000個以上あること。

(MS-C) 観測領域2において、中心核ディスクにあるミラ型変光星の周期分布をもとに、ミラ型変光星の最も古い年齢を求めること。その際、固有運動の精度が 125μ 秒角/年 以下で測定できること。また、観測個数の有限性に伴って年齢の判断を誤ってしまう確率は0.3%以内であること。

*** Hw~15等級まで 125μ 秒角/年の固有運動精度を絶対に達成**

➡ 運用として、全画面を25回の撮像につき1回は地上へダウンロードする。

(データ解析上のリスクの軽減。さらに、サイエンス成果の拡がりにつながる可能性もある)

補足資料I-9: 国際協力



1. APOGEE-2

*バルジ星の視線速度と元素組成観測:
APOGEE-2プロジェクト



**サイエンス連携に関して、JASMINEとAPOGEE-2,
SDSS-IVとでMOUを締結。**

★ APOGEE Gazing at the Inner Galaxy

PI: S. Majewski (UVa)
米国チームメンバー

High-resolution H-band spectroscopic survey

The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment

* APOGEE 1

2.5m telescope at the Apache Point Observatory

Spring 2011 – Spring 2014

100,000 to magnitude H=12.5

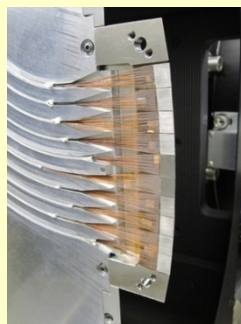
バルジ星は7000個ほどを観測

R~22, 500, S/N > 100

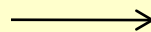
波長域 1.51-1.70 μm

velocity error < 0.5 km/s

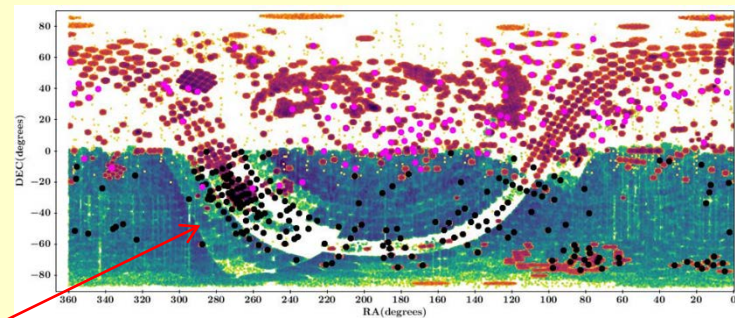
15元素を0.1 dexの精度で測定



APOGEE fibers



2.5m
telescope



バルジ

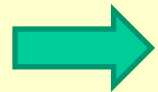
さらに...APOGEE-2(2014-2020)とともにVVV(VISTA Variables in the Via Lactea: ZYJHKsでのバルジとディスクの測光サーベイ観測)とも連携を開始。バルジ研究の強力なsynergyを目指す。

2. Milky Way Mapper & Moons

将来の分光観測との連携を行う動きを開始

★ Milky Way Mapper

- *可視から赤外にかけて4,000,000天体のspectroscopicサーベイを行う(2020年-2025年)
- *Baryon Oscillation Spectroscopic Surveyという銀河のサーベイの設備およびAPOGEEの観測施設を利用し、全天を網羅的にサーベイ観測する。
- *APOGEE2が全天の10%程度のカバーであるのに対し、Milky Way Mapperは全天をカバーする。JASMINEで観測される天体でAPOGEE2で観測されない領域における天体の視線速度が比較的明るい星に対して期待できる。



河田氏が、MWMのPIの Juna Kollmeier と議論。

Small-JASMINE follow-up working groupのようなものを作って、input catalogue を作成し、target観測をMWMへ提案する方針。

★ Moons

- * VLT(Very Large Telescope)を用いて0.65-1.8ミクロンの波長を用いての分光観測。
- * ファイバー分光にて視線速度や化学組成をバルジを含む数百万天体に対して観測する。
- * 2020年の観測開始を目指す。
- * APOGEE2やMilky Way Mapperで観測されない暗い天体に対する視線速度が得られる事が期待できる。

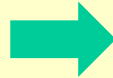
MOONSについても連携を検討していく予定。

さらに、測光観測とも連携を行う

3. GALACTICNUCLEOUS

- * 銀河系中心領域に対する多色測光観測。
Jバンドで22等級、Hバンドで21等級、
Kバンドで20等級までの暗い星まで観測
- * 空間分解能は0.2秒角。
- * 測光精度は0.05等級以下
- * 観測領域は限られているが、
JASMINEの観測領域と
一部オーバーラップ

→ JASMINEが観測する星
(confusionに効く背景星まで)のタイプが
同定可能

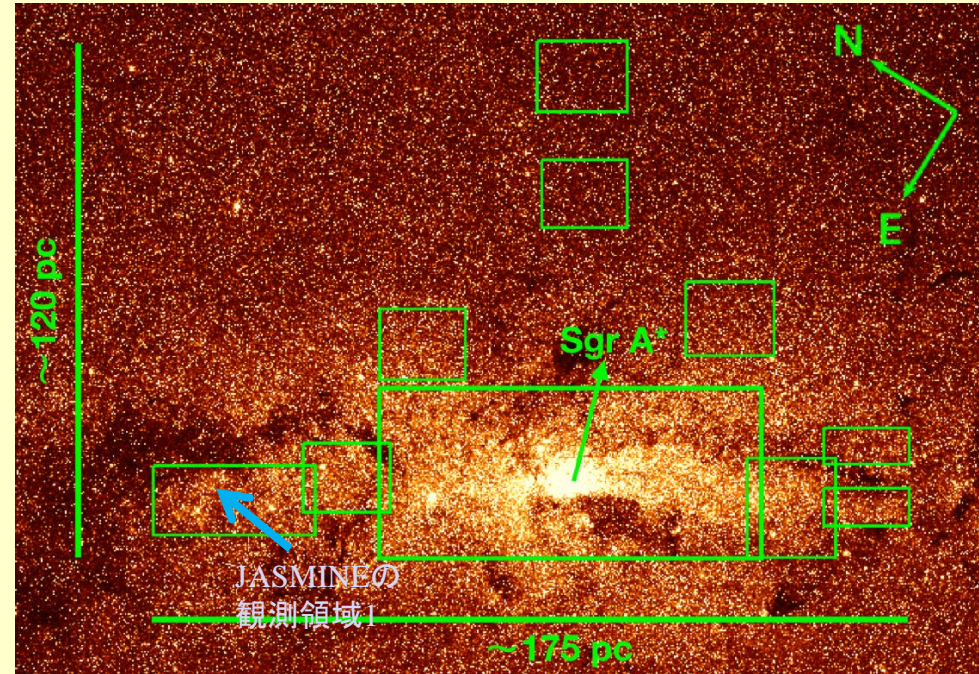


固有運動も一部領域で導出
精度は、 $\sim 400\mu$ 秒角/年 ($< H=18$)

科学目標の拡大！
データ解析におけるキャリブレーション

PIのRaner Shoedelさんからの
メール抜粋(2019.10.22)

GALACTICNUCLEOUSの観測領域(緑色の四角)



I think that the JASMINE project is of great interest and will deliver unique data to understand the Milky Way. I believe that JASMINE and our work would be mutually highly complementary because of the extremely high precision of JASMINE and the much lower precision, but far more sensitive, astrometry from our work.

4. WFIRSTとの連携(赤外線位置天文観測)

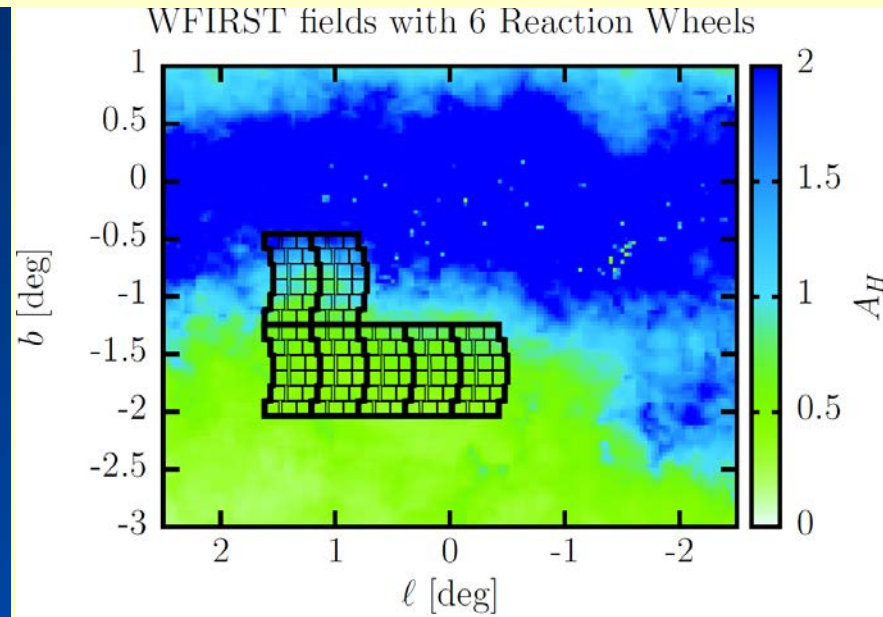
*WFIRSTのmicrolensing fieldにおける(高精度が可能ならば)位置天文観測と相補的、連携

WFIRSTによるMicrolensingサーベイとの協力

Microlensing Fields

Properties.

- ~3 sq. deg (10 fields).
- ~432 days (6 seasons of 72 days each).
- ~15 minute cadence, 52s in W149.
- ~12 hour cadence, 290s for Z087.
- ~85% of the area will have ~40,000 measurements per star ($N^{-1/2} = 1/200$).
- ~60 million stars down to $H_{AB} < 21.6$.
- 2 million seconds of integration time.
- ~2.5 billion photons detected for a $H_{AB} = 19.6$ star



By S.Gaudi

Similar observation to that of Small-JASMINE

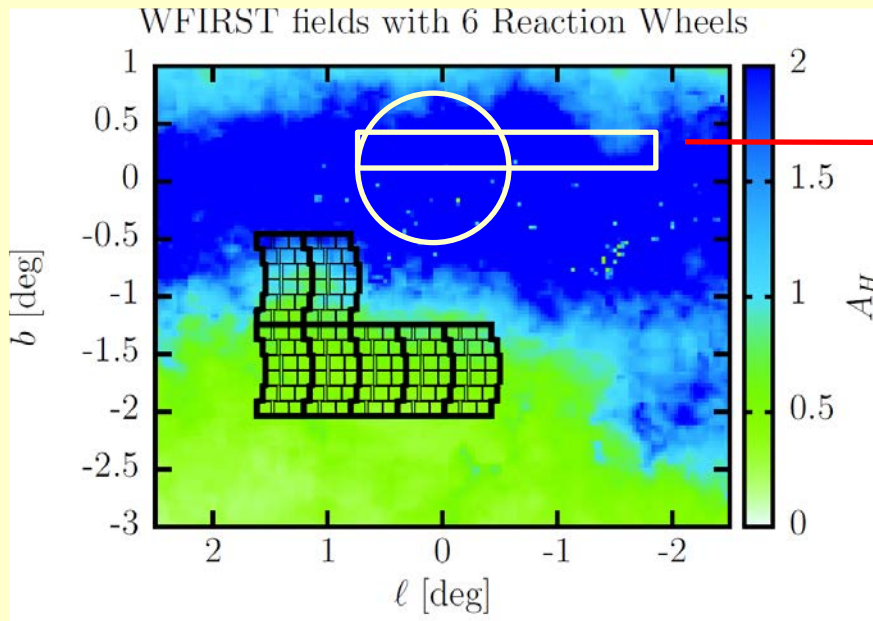
Synergy with WFIRST

If 10 μ as –level precisions of astrometric parameters can be realized by WFIRST, then we will have strong synergy of **scientific collaboration between WFIRST and Small-JASMINE**

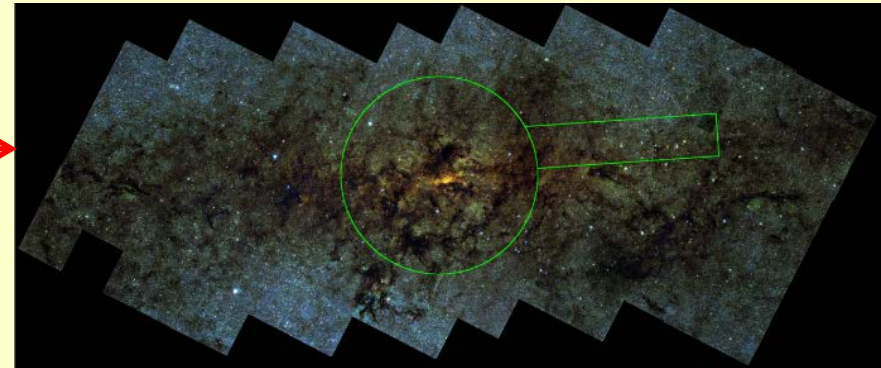
Survey regions of both missions are complementary to each other

*GOにより、両ミッションの観測領域をoverlapする観測領域を設定し、それに対しての位置天文観測を行う=>Good calibration&サイエンスの拡大

Microlensing Fields of WFIRST



Survey region of Small-JASMINE



5. 将来の国際的位置天文観測衛星への橋渡し

(A)Theia

可視光単一望遠鏡：フランス国立宇宙研究センター
(CNES)へ申請予定。

**Theiaとはサイエンスとデータ解析等に関する協力で
MOUを締結した。**

(B) GaiaNIR

(近赤外線衛星、打上目標 2040年代:ESAへ申請予定)

Post-Gaia候補

PI: David Hobbs @ Lund observatory, Sweden

赤外線で全天サーベイを目指す

Motivation for GaiaNIR

- Gaia is that it only operates at optical wavelengths, but the GC and spiral arms are obscured by interstellar extinction.
- We need to switch to the NIR but this is not possible with CCDs
 - To scan the entire sky we need rotation
 - ⇒ use of Time Delayed Integration (TDI).
 - ⇒ new NIR detectors.

★GaiaNIRの現状

○仕様候補

- * Gaiaと同様に全天サーベイが候補
- * 波長:0.4~1.8ミクロン
- * 精度:10 μ 秒角
- * 主鏡:1.6m \times 0.5mを1枚、
or 1.6m \times 0.25mまたは、1.6m \times 0.5mを2枚
- * 検出器:TDIが可能な NIR 検出器の開発を検討中

○検討状況

- * ESAのVoyage 2050にWhite Paperを提出

astro-ph: <https://arxiv.org/abs/1907.12535>

Members of the core proposing team

David Hobbs	Lund Observatory, Lund University, Box 43, SE-22100, Lund, Sweden
Anthony Brown	Leiden Observatory, Leiden University, Niels Bohrweg 2, 2333 CA Leiden, The Netherlands
Erik Høg	Niels Bohr Institute, Juliane Maries Vej 30, 2100 Copenhagen Ø, Denmark
Carme Jordi	Institut de Ciències del Cosmos, ICCUB-IEEC, Spain
Daisuke Kawata	Mullard Space Science Laboratory, University College London, Holmbury St. Mary, Dorking RH5 6NT, UK
Paolo Tanga	Observatoire de la Côte d'Azur, 06304 Nice Cedex 4, France
Sergei Klioner	Lohrmann Observatory, Technical University Dresden, Germany
Alessandro Sozzetti	INAF-Osservatorio Astrofisico di Torino, Via Osservatorio 20, 10025 Pino Torinese, Italy
Lukasz Wyrzykowski	Warsaw University Observatory, Al. Ujazdowskie 4, 00-478 Warszawa, Poland
Nic Walton	Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge, CB3 0HA, UK
Antonella Vallenari	Osservatorio Astronomico di Padova, INAF, Vicolo dell'Osservatorio 5, I-35122 Padova, Italy
Valeri Makarov	U.S. Naval Observatory, 3450 Massachusetts Avenue NW, Washington, DC 20392, USA
Jan Rybizki	Max Planck Institute for Astronomy, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg, Germany
Fran Jimenez-Esteban	Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), Camino Bajo del Castillo s/n, 28692 Villanueva de la Cañada, Spain
José A. Caballero	Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), Camino Bajo del Castillo s/n, 28692 Villanueva de la Cañada, Spain
Paul J. McMillan	Lund Observatory, Lund University, Box 43, SE-22100, Lund, Sweden
Nathan Secrest	U.S. Naval Observatory, 3450 Massachusetts Avenue NW, Washington, DC 20392, USA
Roger Mor	Institut de Ciències del Cosmos, ICCUB-IEEC, Spain
Jeffrey John Andrews	Niels Bohr Institute, Juliane Maries Vej 30, 2100 Copenhagen Ø, Denmark
Tomaz Zwitter	University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Ljubljana, Slovenia
Cristina Chiappini	Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam, Germany
Johan Fynbo	Niels Bohr Institute, Juliane Maries Vej 30, 2100 Copenhagen Ø, Denmark
Yuan-Sen Ting	Institute for Advanced Study, Princeton, NJ 08540, USA
Daniel Hestroffer	IMCCE - Observatoire de Paris, F-75014 PARIS, France
Lennart Lindegren	Lund Observatory, Lund University, Box 43, SE-22100, Lund, Sweden
Barbara McArthur	McDonald Observatory, University of Texas at Austin, Austin, TX 78712-1205, USA
Naoteru Gouda	National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1, Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan
Anna Moore	The Australian National University, Canberra, ACT 2611, Australia
Oscar A. Gonzalez	STFC UK Astronomy Technology Centre, The Royal Observatory Edinburgh, EH9 3HJ, UK
Mattia Vaccari	University of the Western Cape, Robert Sobukwe Road, 7535 Bellville, Cape Town, South Africa

* GaiaNIRの計画提案メンバーとして協力。

日本人は、河田氏(MSSL, UCL, UK)と郷田(&山田(京大))

○日本からの貢献を期待されている。

○同じ近赤外線のスぺースアストロメトリである
JASMINEがGaiaNIRの先駆けとなりうる。

○(中型)JASMINEの機能はGaiaNIRに含まれる。



○日本は、JASMINE以後として、その経験や成果
(科学的成果、赤外線位置天文のデータ解析手法や
装置技術など)を活かし、国際協力としてGaiaNIRへ
何らかの形で協力して進めるのが今後の方針に
なりうる。

*宇宙研へはLOI、光赤天連へはプロジェクトコンセプト提案書を提出済み。
ESAのシンポジウムによって宇宙研側から紹介された。

補足資料II

(諮問事項: 科学目標を達成するためのシステム性能
要求およびシステム仕様の妥当性)

ミッション要求→最上位データ要求

前提A) 公募小型3号機

MR-A: 観測領域

MR-F: カタログを作る

MR-B: $\sigma_{\pi} \leq 25 \mu\text{as}$, $\sigma_{\mu} \leq 25 \mu\text{as/yr}$
3000個@領域2

MR-C: $\sigma_{\pi} \leq 25 \mu\text{as}$,
3000個@領域1

MR-D: $\sigma_{\pi} \leq 25 \mu\text{as}$,
MIRA 400個@領域1+2

$\sigma_{\mu} \leq 125 \mu\text{as/yr}$

MR-E: $\sigma_{\mu} \leq 125 \mu\text{as}$,
周期250日以内のMIRA 100個@領域2

前提B) 春・秋3か月、
“N回”

2-2: “1回”の精度は $20 \mu\text{as} \times \sqrt{N}$

2-3: “1回”の精度は $100 \mu\text{as} \times \sqrt{N}$

2-1: 1.5年以上の観測

2-4: Gaiaで π 、 μ 既知の星を同時観測

データ
最上位要求



軌道上で得られる
データ要求

前提A) 公募小型3号機

前提B) 春・秋3か月、“N回”

2-1: 1.5年以上の観測

2-4: Gaiaで π 、 μ 既知の星を同時観測

2-2: “1回”の精度は $20\mu\text{as} \times \sqrt{N}$

2-3: “1回”の精度は $100\mu\text{as} \times \sqrt{N}$

前提C) フレーム連結を行う

3-1: 一回撮像精度 σ_1

+

3-1: 一回撮像精度 σ_2

σ_1 と σ_2 は、撮像回数、星の密度、
フレームの重ね合わせ比率の関数

3-2: 大フレーム座標 \rightarrow 測定座標変換系統誤差 $1\mu\text{as}$ 以下

3-3, 4: 衛星速度・位置(光行差補正を $1\mu\text{as}$ 以下で行う)

前提条件の入ったデータ要求

前提A) 公募小型3号機

前提B) 春・秋3か月、“N回”

前提C) フレーム連結を行う

前提D) 機械式冷凍機を搭載しない

前提E) 検出器の新規開発はしない

前提F) PSFを推定し、PSF形状とデータをfitし、星像中心を決め、星間距離を求める

注: 実際には、ダウンリンク回線から星の数が決まり、等級が決まっている。

4-1: H4RG-10, 1.75 μ mカットオフ

4-2: 短波長limit 1.1 μ m

4-6: $\lambda/D \sim (1.5 \sim 2.5)$ pixel

4-3: 領域2の場所を決める

4-4: 12.5等までを25 μ s、15等までを125 μ s/yr

4-5: MIRAは候補天体すべてをダウンリンク

4-7: 9.5等まではサチらない

4-8: 口径>25cm

前提G) 地球周回低軌道、大フレーム一回を半周で作成

トレードオフ検討

さまざまなトレードオフ項目についてトレードオフを行った結果。トレードオフした項目は以下である。

トレードオフ項目	トレードオフした内容
軌道	太陽地球L2、静止、低軌道、太陽同期
観測バンド	Zバンド、Hバンド、HとKの間、Kバンド
サーベイ方式	ステップステア、Scan型衛星、干渉計
望遠鏡温度	常温 vs 低温
内面処理	黒色塗料、炭素繊維植毛、炭素練りこみナイロン植毛
構造素材	スーパースーパインバ、インバ、複合素材

構造設計への要求

誤差バジェットからブレークダウンした構造設計要求

誤差バジェット

波面精度

波面収差 < 109 mas / 7.1 sec
フレーム連結誤差 < 62 μ as

光学精度要求

星像位置安定性
(キャリブレーション後) < 0.1nm (5.7 μ as)/50min

光学設計

↓ 要求精度の100倍程度動いても、キャリ部レーション可能

熱構造安定性要求

星像の安定性(焦点面) < 10 nm / 50min

構造系設計

鏡面精度の安定性 < 4nm (in-plane) / 50min
検出器面の安定性 < 2nm (in-plane) / 50min
焦点距離の安定性 < 10 μ m / 50min
(像面変形を所定に抑えるために必要な、コンポーネントの安定度)
アライメントドリフト < 27mas / 7.1sec
組立公差 < 10 μ m
擾乱 < 340 mas / 7.1sec
(1撮像の精度を保証するための、コンポーネントの安定度)

熱安定性要求

望遠鏡の熱制御（温度安定化・検出器冷却）

(A)望遠鏡の温度安定化:変動要因=外部熱入力から遮蔽し「遠火でじんわり保温」

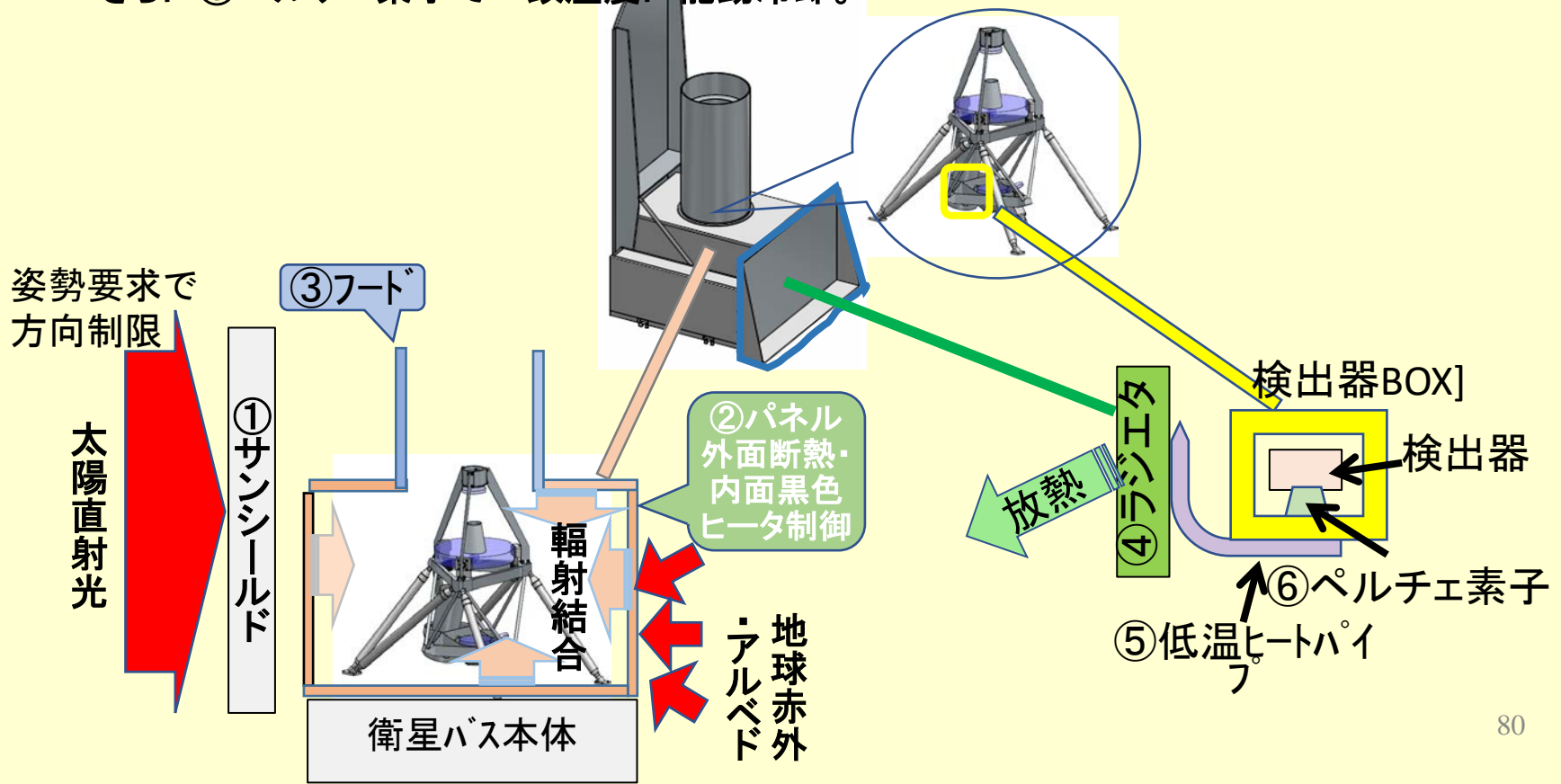
①太陽直射は方向を制約(姿勢要求)し、サンシールドで遮蔽

②他の方向変動入力は全方向をパネルで覆い、外面を断熱。ヒータで温度変動を吸収。

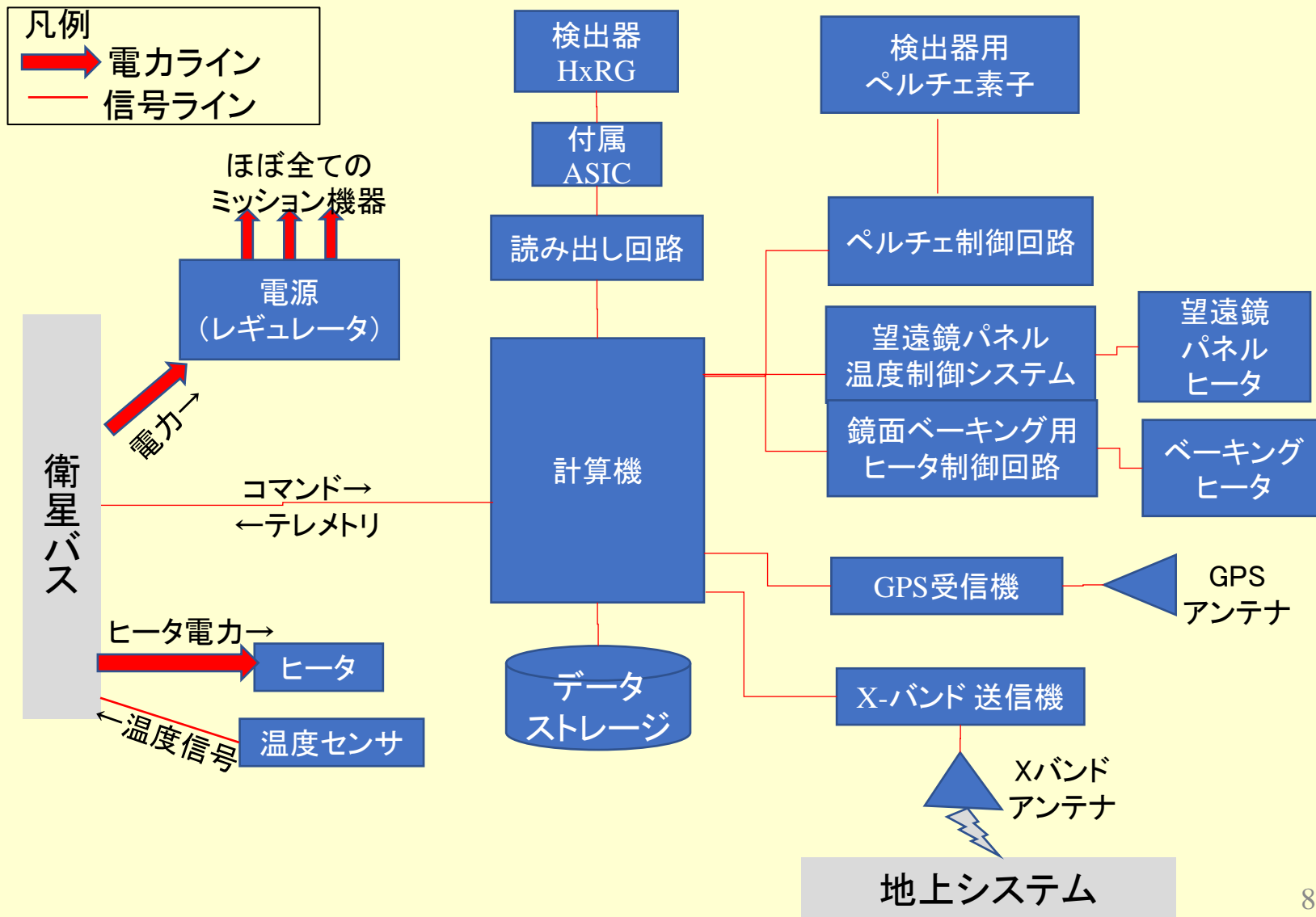
③カバー不能の開口は、フードで視野制約。(フード下部をヒータ制御)

(B)検出器の局所冷却:望遠鏡から断熱し、④ラジエタ(放射冷却器)へ⑤ヒートパイプで結合。

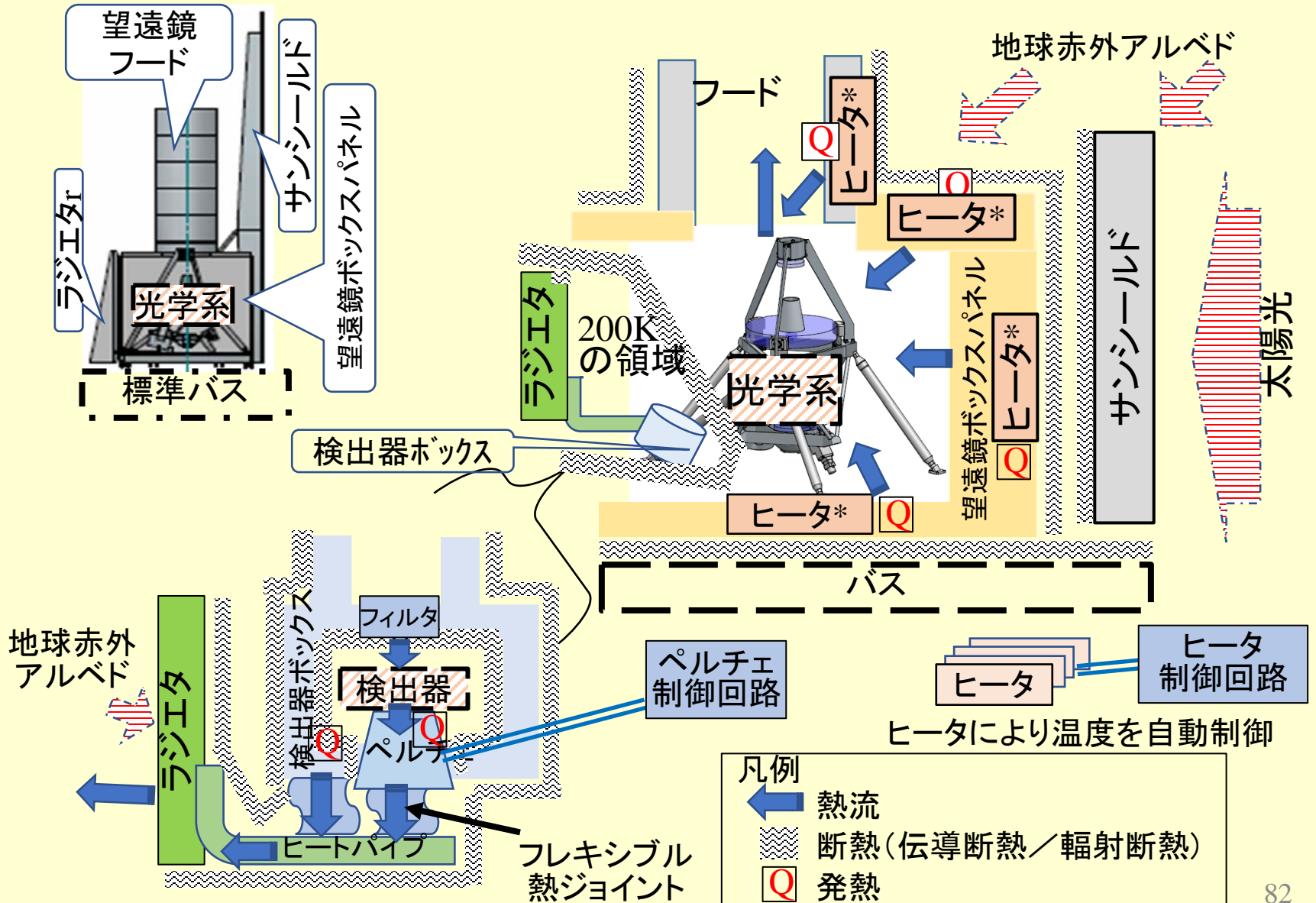
さらに⑥ペルチェ素子で一致温度に能動冷却。



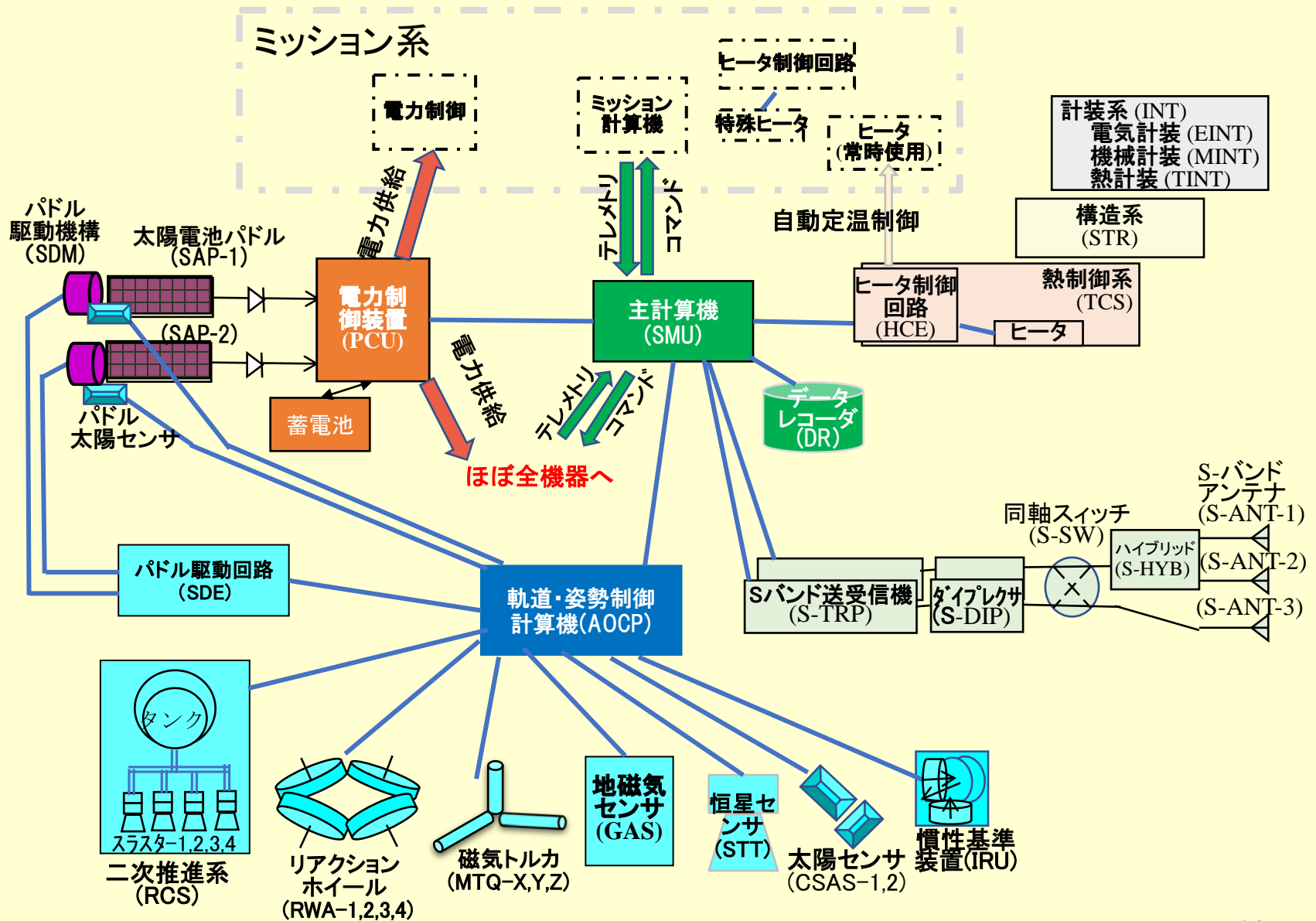
機能ブロック図 (電気系)



機能ブロック図 (熱制御)

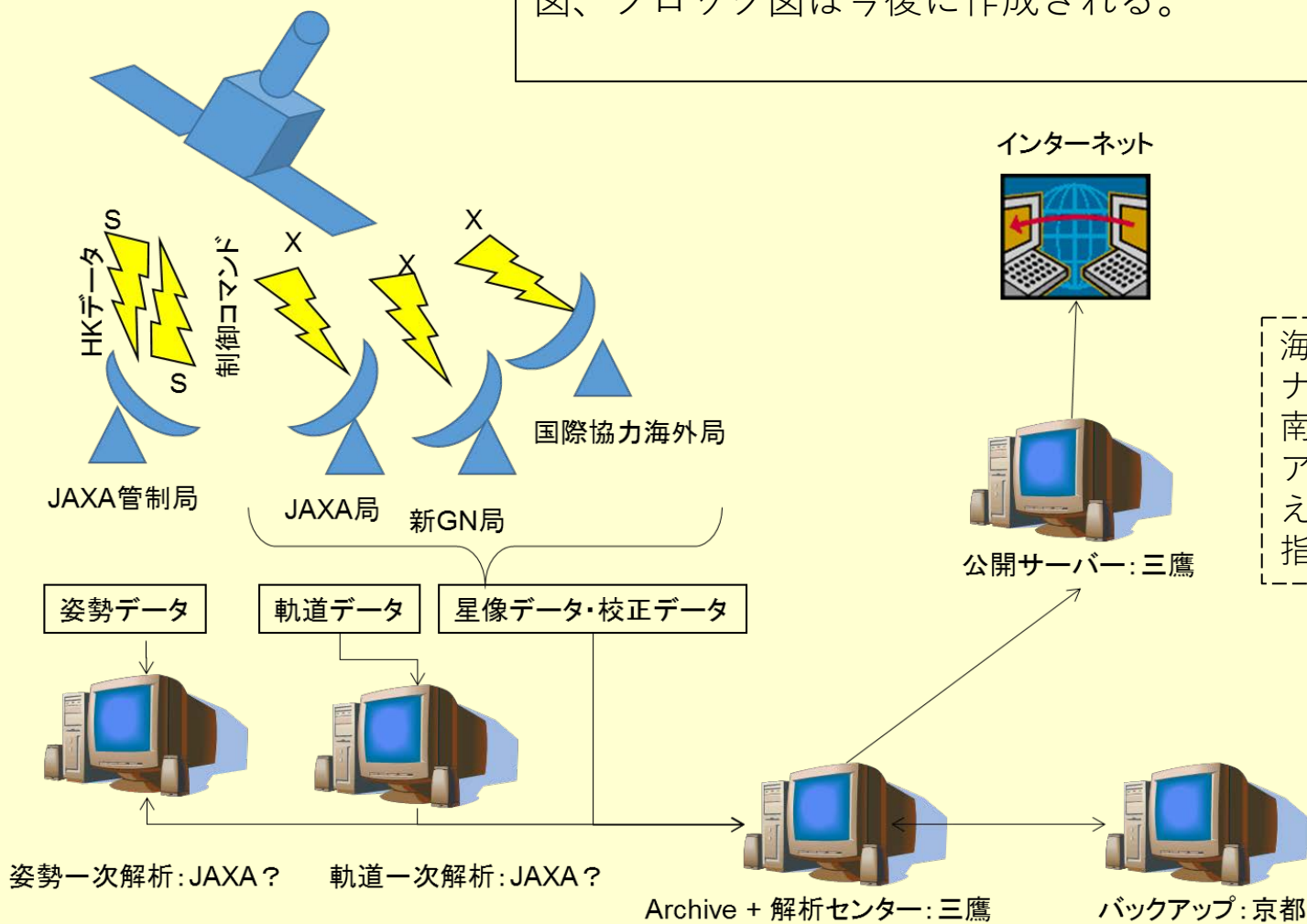


機能ブロック図 (衛星バスシステム)



総合システム

運用系の概念は定まっております、詳細コンフィギュレーション図、ブロック図は今後作成される。



海外局は、ESAキルナ局を想定。加えて南米、オーストラリア、南アフリカを考えてはどうかという指摘があった。

補足資料III

(諮問事項:システム要求仕様の実現可能性に関する
検討状況)

誤差配分表（精度の達成）

	12.5等年周視差	1撮像の影響(μs)			最終精度への影響(μs)		
	N	worst	nominal	best	worst	nominal	best
回折	3.6E+09	342000	342000	342000	5.67	5.67	5.67
擾乱	3.6E+09	276000	152000	152000	4.58	2.52	2.52
波面収差	3.6E+09	144000	114000	78000	2.39	1.89	1.29
読み出しノ	1.5E+05	3710	2330	2090	9.64	6.06	5.43
暗電流	1.5E+05	2800	2150	2150	7.28	5.59	5.59
迷光	1.5E+05	1940	1840	1580	5.04	4.78	4.11
アルゴリズム	1.5E+05	1800	1000	1000	4.68	2.60	2.60
フレーム連	7.4E+03	242	152	152	2.81	1.77	1.77
物理量固定	1	3.7	1.2	1.2	3.7	1.2	1.2
衛星位置	1	1.00E-03	5.00E-05	5.00E-05	0.001	0.00005	0.00005
衛星速度	1	1	0.05	0.05	1	0.05	0.05
背景星	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
			位置精度換算		16.58	12.02	11.37
年周視差 σ	1.15		年周視差精度		19.07	13.82	13.08
目標精度	25		マージン		16.17	20.83	21.31

マージンはRSSでは無く引き算にすべきという指摘があった。その場合、それぞれ5.93、11.18、11.92となる。

誤差バジエットの計算を行って、**テーブル**にしている。

独評指摘: 再現性のないノイズは問題ないか? 原理的に対応していることは理解しているが、本当に大丈夫か?

検証

	地上実験でできること	軌道上でなければできないこと
星像中心精度	数百分の1pixel程度の星像中心検出能力の有無は、 地上実験 で確認。	何万回も撮像してさらにその百分の1程度の精度を達成することの確認は、星を頼りに軌道上で行う。
光学的ノイズ、電気ノイズ、感度ムラetc.	1/100pixel オーダーでの影響度は 地上での測定 で評価、確認。	//
光子数(集光力)	地上で測定	
PSF幅	地上で測定	
構造変形	温度変化や振動などの外乱を実際より大きくして モデルの正しさを実験で示す ことと、要求内の外乱で 要求程度以下の変形におさまることを数学モデルで示す 。	モデルが正しいとした場合の応答は、数学モデルとしては示すことができ、プロジェクトとしてはこれを許容する。軌道上での成立性は、実際のデータから判断。
熱応答	//	//

誤差要因とその対処方法の整理

	ミッション探求フェーズ	ミッション定義段階		概念設計
検出器	TAA締結	国際協力体制の確立	既存技術	
フィルタ	設計・テスト小片試作	実物大試験片評価	実現済	
光学特性・調整	設計 解析で確認	検証方法開発 検証方法の合意	継続開発	
迷光	解析による検討	詳細解析、内面処理確定	実現済	メーカーへの 技術移転・ BBMによる 検証
検出器熱制御成 立性	ペルチェ低温特性 解析で成立性確認 検出器Box設計	部分モデルで成立性検証 検出器Box試作	既存技術	
擾乱抑制	実績からの推定	推定値の確認	既存技術	
光学システム熱 構造安定性	低膨張材の開発		実現済	
	BBMでの構造検証 温度安定性の確認	光学測定方法の開発 光学総合性能の試験方法 の合意	継続開発	
衛星システム	概念成立性確認	開発仕様書の作成	継続開発	
解析による誤差 の推定と除去	概念の成立性確認 地上実験 小規模simulation HSTデータで検証	ソフトウェア実装 End to end simulation スケラビリティ確認 ノイズモデル	継続開発	実装 ・テスト
	～2018.9	2018.10～2020.12		FY2021～

WBS

WBSは作成されている。第二階層までを下に示す。
 なお、現在メーカーからも別途WBSが出されており、これらをマージする必要があるが、これは次フェーズに行く。

10	プロジェクト管理・アドミニストレーション
11	プロジェクト管理
12	アドミニストレーション
13	ファイナンス
14	マネジメント文書
15	審査会
20	サイエンス
21	科学目標
22	ミッション要求
23	科学応用
24	文書
25	審査会
30	システム
31	プロジェクト管理
32	要求分析
33	システム設計解析
34	文書
35	文書管理
36	インタフェース管理
37	作動寿命管理
38	設計基準
39	部品選定基準
3a	成果文書
3b	審査会

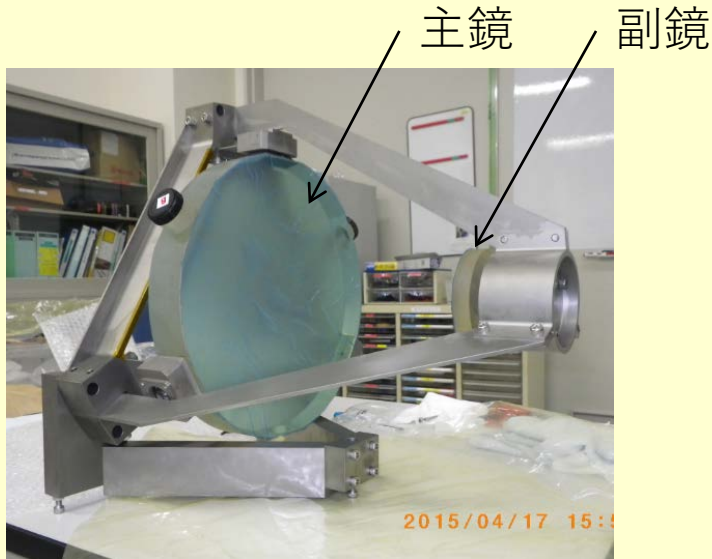
40	衛星ミッション部
41	プロジェクト管理
42	部分試作モデル
43	衛星ミッション部BBM
44	衛星ミッション部EM
45	衛星ミッション部FM
50	衛星バス部
51	衛星バス部EFM
52	衛星バス調達
60	AVIC
61	BBM
62	EM
63	FM
64	地上局との整合
65	運用
66	射場作業
67	衛星状態確認
68	補充電作業
69	ロケット/F取り付け
6a	ロケット搭載作業
6b	兵站
70	ロケット(FM)
71	ロケット
72	ロケット調達

80	地上局
81	通信局全体設計
82	JAXA地上局 海外受信局調達
90	運用
91	管制システム
92	運用コンセプト
93	運用システム
94	観測データ処理
95	文書
a0	コンピューティング
a1	衛星パラメータデータベース
a2	テレメトリ処理ソフトウェア
a3	位置天文解析ソフトウェア
a4	インフラ・ハードウェア
a5	文書
b0	地上支援装置
b1	光学系試験設備
b2	電気系地上支援装置(EGSE)
b3	機械系地上支援装置(MGSE)
c0	安全・信頼性管理
c1	安全・信頼性管理
c2	品質管理
d0	観測データ運用
d1	観測データ配信システム
d2	観測データ配信センター(ハード)
d3	観測データ運用管理

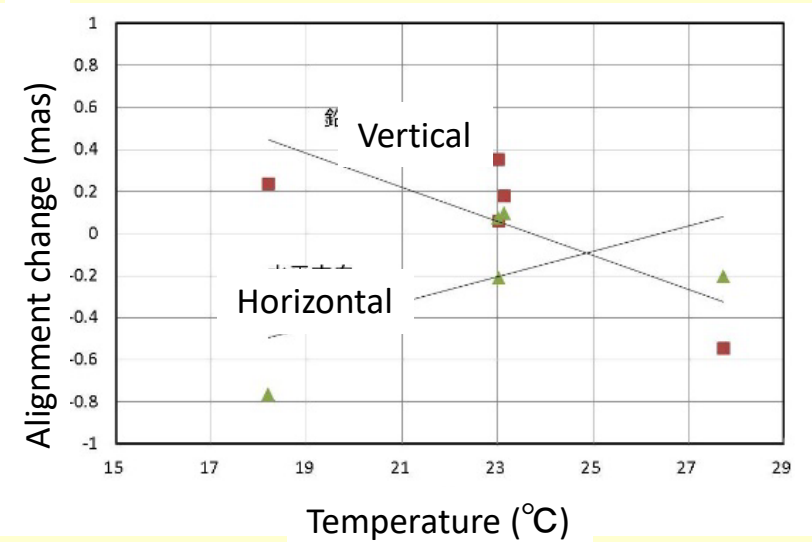
長納期品

- 長納期品としては、検出器、フィルタ、硝材+ミラーを識別している。
- 硝材はすでに前フェーズで購入済みであり、大きな設計変更が無ければメーカーに対して支給する準備ができています。
- 検出器については、今フェーズではTAAを締結し、国際協力をスタートすべく、パートナー機関候補と調整を行った。
- フィルタは今フェーズから試作を開始し、光学性能の達成を確認した。
- 長納期品の納期を考慮したスケジュールを置いている。

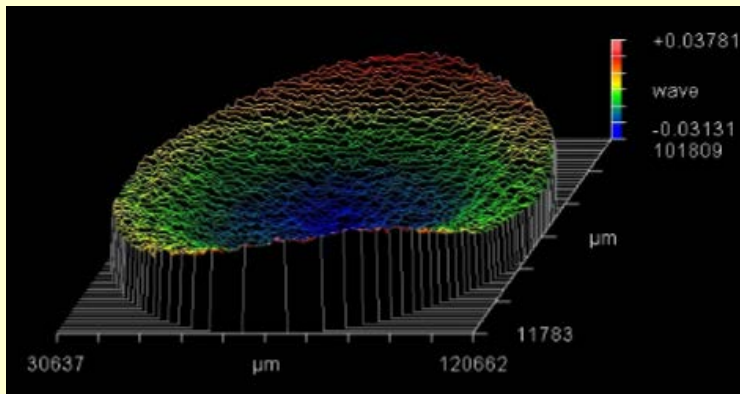
各論:構造系の開発状況：望遠鏡構造の温度安定性



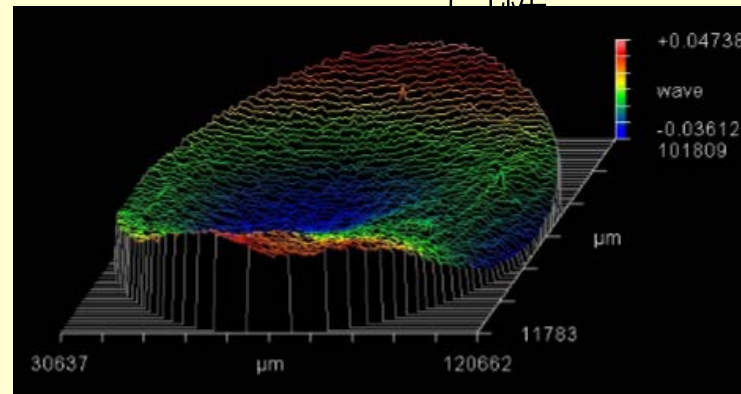
部分モデル



主鏡・副鏡アライメントの温度安定性



Load : none



Load : 60N, Edge

Distortion: center 0, edge < 2nmRMS

主鏡鏡面精度の安定性

- ▶ 荷重による安定性 < 2nmRMS/1G
- ▶ 温度による安定性 < 10nmRMS/15K

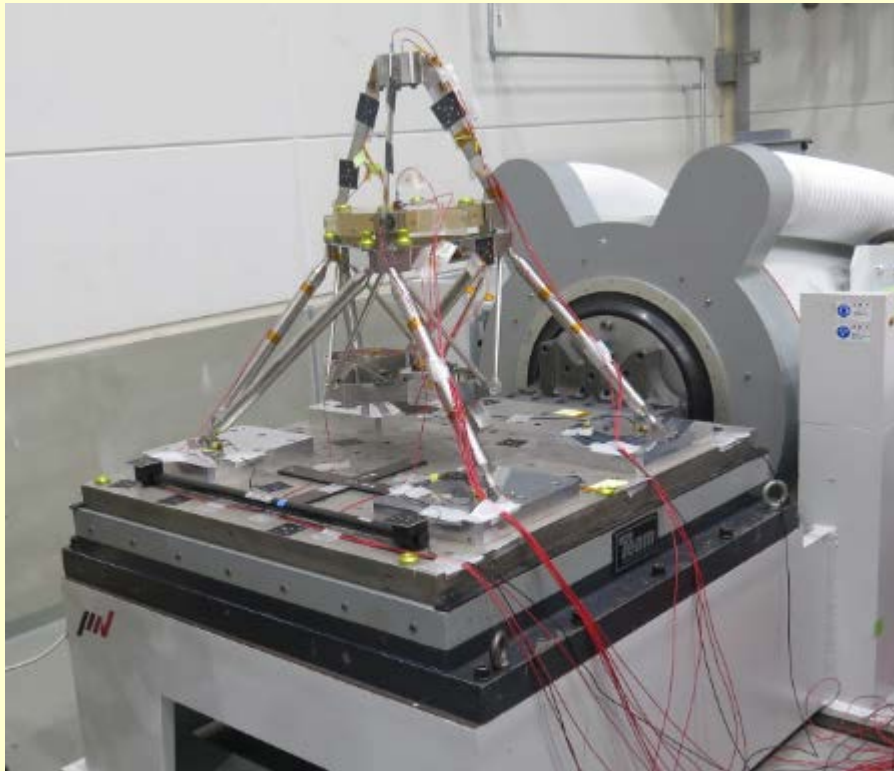
構造系の開発状況：望遠鏡構造設計

望遠鏡構造BBMの振動試験

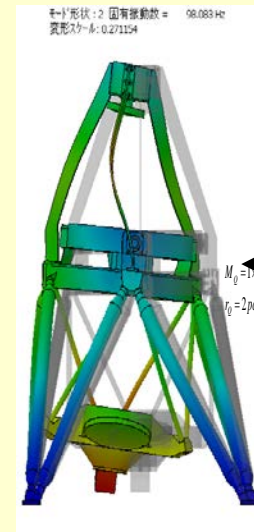
方向	要求	解析結果
Z	10 Hz	259 Hz
X	30 Hz	139 Hz
Y	30 Hz	98 Hz

振動試験結果

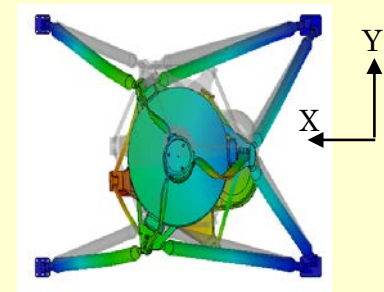
>200 Hz
133 Hz
91 Hz



BBMの振動試験状況

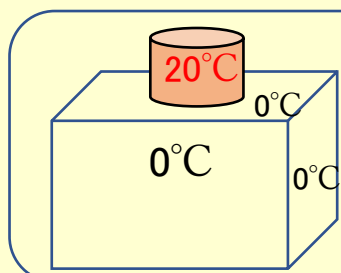


振動モード



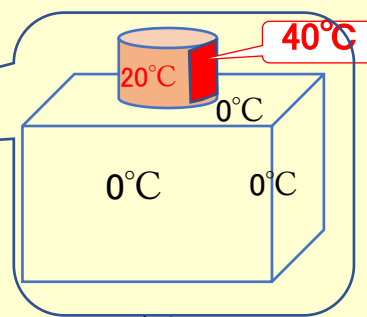
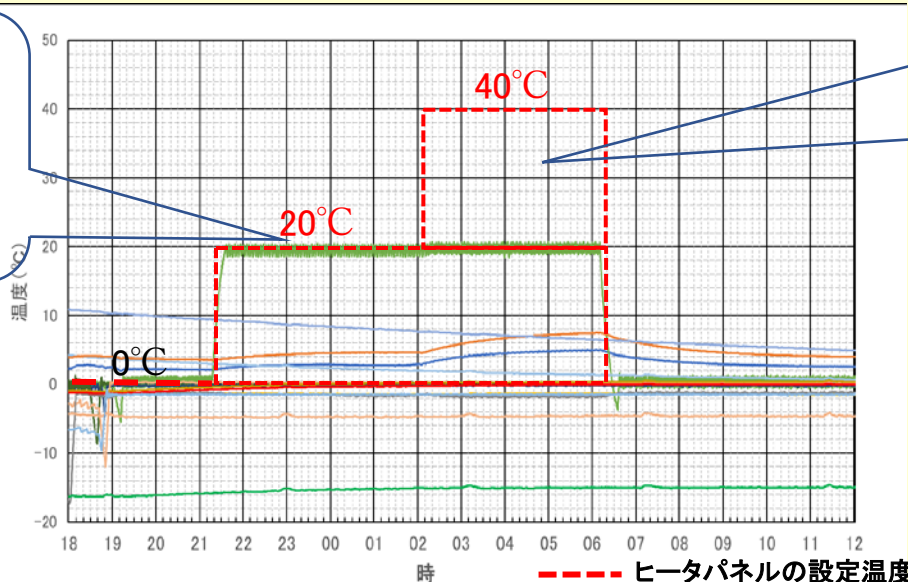
- 一次固有値が、90Hz以上と高く、二次以上の固有値も解析結果とよく一致
- RWAの擾乱危険域 (<60Hz) より十分に高く、IRUの危険域にも固有値は1個しか存在しない
- 擾乱が、バスとのインターフェース部におけるバスからの振動伝達が上限となると期待できる
- サインバーストにより、強度も満足することを確認

望遠鏡 熱モデル試験結果 代表例 (フード根本温度変化への感度)

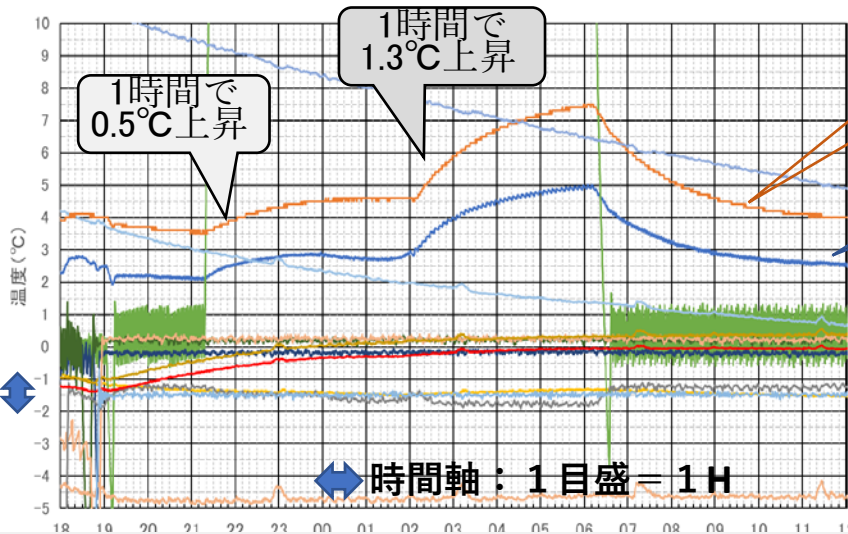


フード根本
全体20°C昇温

温度軸拡大



更に側面1/4
のみ20°C昇温



温度軸：
1目盛 = 1°C

時間軸：1目盛 = 1H

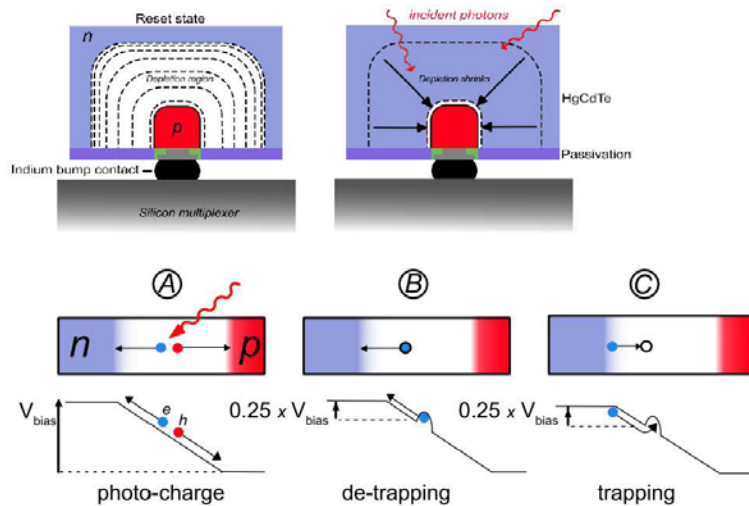
フード根本20°Cの温度変化に対し、フード直近の副鏡の最大感度は1.3°C/H以下。
→感度6.5% →フード1°C変化への感度は0.1°C以下の見込み

検出器

- Teledyne H4RG-10 CMOS detector
- HgCdTe 感光層が、Siの読み出し層の上に貼られている
 - Siの読み出し回路(ROIC)の上に、HgCdTe結晶が、Inコネクタで貼られている
 - HgCdTeの結晶を成長させる際に用いる基板が、宇宙線イベントで赤外線を発光する。像がこれらのフラッシュで汚れないよう、基板を除去することが必要である。その技術は確立している。検証済みのものを購入する。
 - 他の効果については別の箇所で記述
- CMOS プロセス
 - 全てのピクセルは、光ダイオードとCMOS トランジスタスイッチで出来ている。
- Cut-off 波長は $1.7\mu\text{m}$ 、ピクセルサイズは $10\mu\text{m}$ の、Teledyneの既製品とする。
- 赤経ベースラインでは、 $4\text{K} \times 4\text{K}$ の位置天文用検出器1つと、 $1\text{K} \times 1\text{K}$ の測光用検出器2つを搭載する。測光検出器は、色効果を補正するためのデータを取得する妙に搭載する。新MDR後に、測光検出器の要・不要判断を行う。

• Persistenceとは

空乏層中の欠陥に電子がトラップされ、リセット後にデトラップすることにより生じる偽の電圧

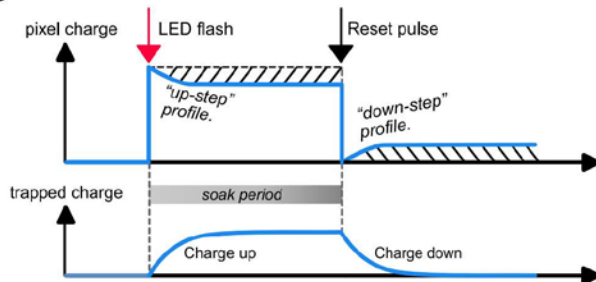


• 欠陥中の電子の増減モデル

$$dQ/dt = (\rho E(t) - Q(t)) / \tau$$

$Q(t)$: 欠陥中のチャージ、 $E(t)$: 素子のチャージ

ある時、急に $E(t)=0$ (ダーク) にすると exponential decay し、それが電圧となって観測される



実際には異なるタイムスケール τ の欠陥が混在している. Tullock+2019によると $\tau=1, 10, 100, 1000, 10000\text{sec}$ のタイムスケールの persistence の線形結合でいたいデータとあう。

かつ、それぞれの ρ (trapされる割合) は 10^{-3} オーダー (値は書いてない)

連続入射のモデルを作成してみた比較してみた

連続光露出時間Tにたまるtrapped charge

連続光露出の場合の各タイムスケールのtrapping ODE

$$Q'(t) = \frac{\rho}{\tau} E(t) - \frac{Q(t)}{\tau}$$

$$\approx \frac{\rho}{\tau} et - \frac{Q(t)}{\tau},$$

$$E_i^{(0)} = eT$$

$$\Delta Q_{i,j} = \rho_j e \tau_j f(T/\tau_j) = \rho_j \frac{f(T/\tau_j)}{T/\tau_j} E_i^{(0)}$$

$$Q_{i,j} = \Delta Q_{i,j} + Q_{i-1,j} e^{-T/\tau_j},$$

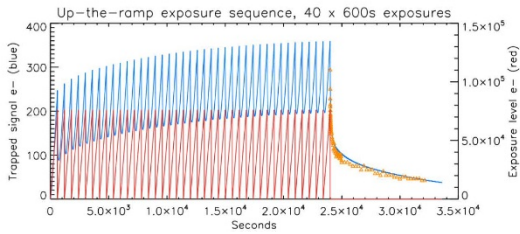
$$f(x) = x + (-1 + e^{-x}).$$

読み出し時に記録される値

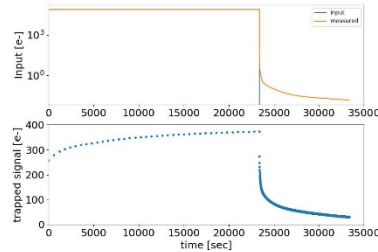
$$Q_i = \sum_j Q_{i,j}$$

$$\Delta Q_i = \sum_j \Delta Q_{i,j}$$

$$E_i = E_i^{(0)} - \Delta Q_i + \sum_j Q_{i-1,j} (1 - e^{-t/\tau_j})$$



だいたいあっている。ρ = 1e-3, 1e-3, 1e-3, 2e-3, 2e-3 くらい



小まとめ

定性的には $\rho < 1e-2$ (1%) ならば、interpixelのほうがdominateする

- 暗い天体の時に邪魔になるのは、明るい天体の残光が暗い天体の輝度のレベルになるから。
- 明るい天体を見続ける場合は(それより明るい天体のpersistenceがない限り)、オーダー ρ 以下の寄与しかない

ただし、 ρ の値は検出器の個性(や運用温度)に依存して異なる

• IRD 検出器

- old: persistenceが大きい (Hバンドに使用), engineering grade

- new: persistenceが小さい (Y,J バンドに使用)

運用温度80 K

• JASMINE 検出器 H4RG

- H2RGよりかなり改善されているらしい

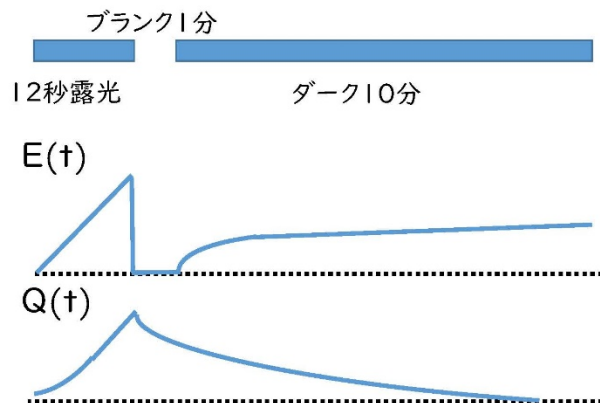
IRD old > IRD new (= H4RG ?)

IRD 検出器 persistence 測定実験 (80 K)

リモートでできるコム光源を使用。露出の後、ダークを取得

※現状10minの露出を利用してモデルから短時間での効果を推定

※それでも良いほうの検出器 (new) のほうはpersistenceを検出できず=上限



結果:

IRD old

$\rho \sim 10\%$

IRD new

$\rho < 0.1\%$

これはTulloch+19とコンシステント

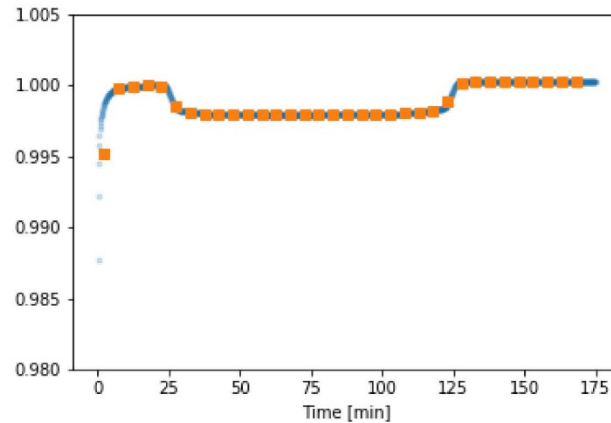
放射線影響は、原研などで測定すべきであると指摘があった。その部分も含めて、米国と協力する plan.

IRD engineering grade程度の悪いものだと問題になってくる
温度依存性については未解明

Virtual Jasmine

$\rho \sim 10\%$

他のノイズは入っていない



まとめ

- 現在のH2RGでは $\rho = 0.1\%$ オーダーの電子トラップ/デトラップがあり、これは様々な時間に等分配されている。
- $\rho = 0.1\%$ オーダーでは、 0.1% レベルの測光に対しては影響がない
- 一方、初期の検出器では $\rho = 10\%$ オーダーのものもあり、影響がでてくる。これは導入時に確認することが必要である。

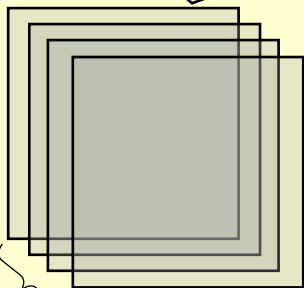
各論: 光学系

- 設計光学系の光学素子製造可能性は、メーカーに確認済み
- 光学系の性能、アライメントに対する特性変化は、光学シミュレーションで検証
- 迷光レベルは光学シミュレーションで検証
- 光学系の検証のための**CGH**干渉計開発は、加速資金(**JAXA**)で採択、今年度実施。

観測手法・データ解析の概要

単位フレーム(7.1秒間撮像した視野サイズの画像) :

(A) 星像中心位置の推定



約3年間の運用期間

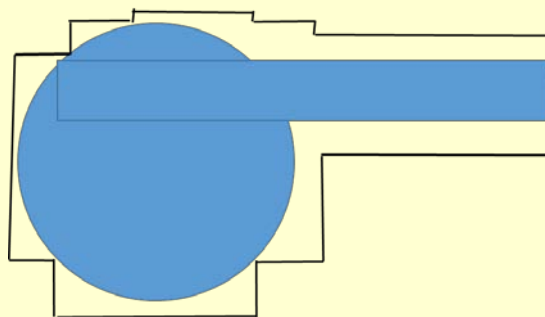
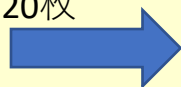
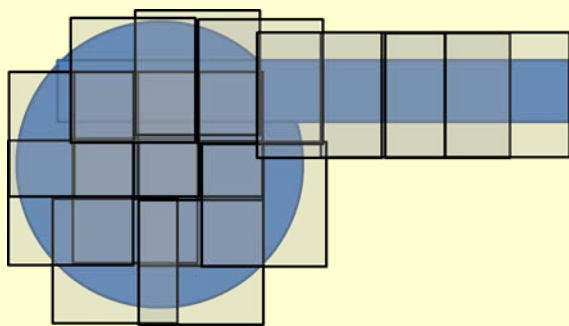
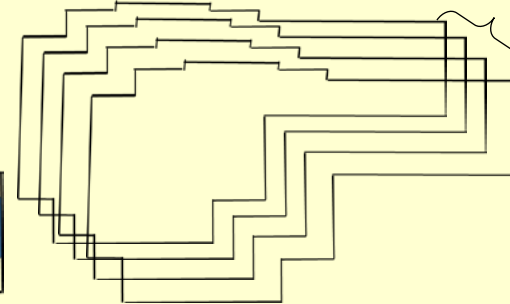
(1年のうち、春と秋の約半年観測)

(B):16枚の小フレーム⇒大フレーム
(地球半周回の約50分間)

画像歪み補正

大フレーム約8000枚

(ほぼ同一視野の) 単位フレーム約20枚
=小フレーム

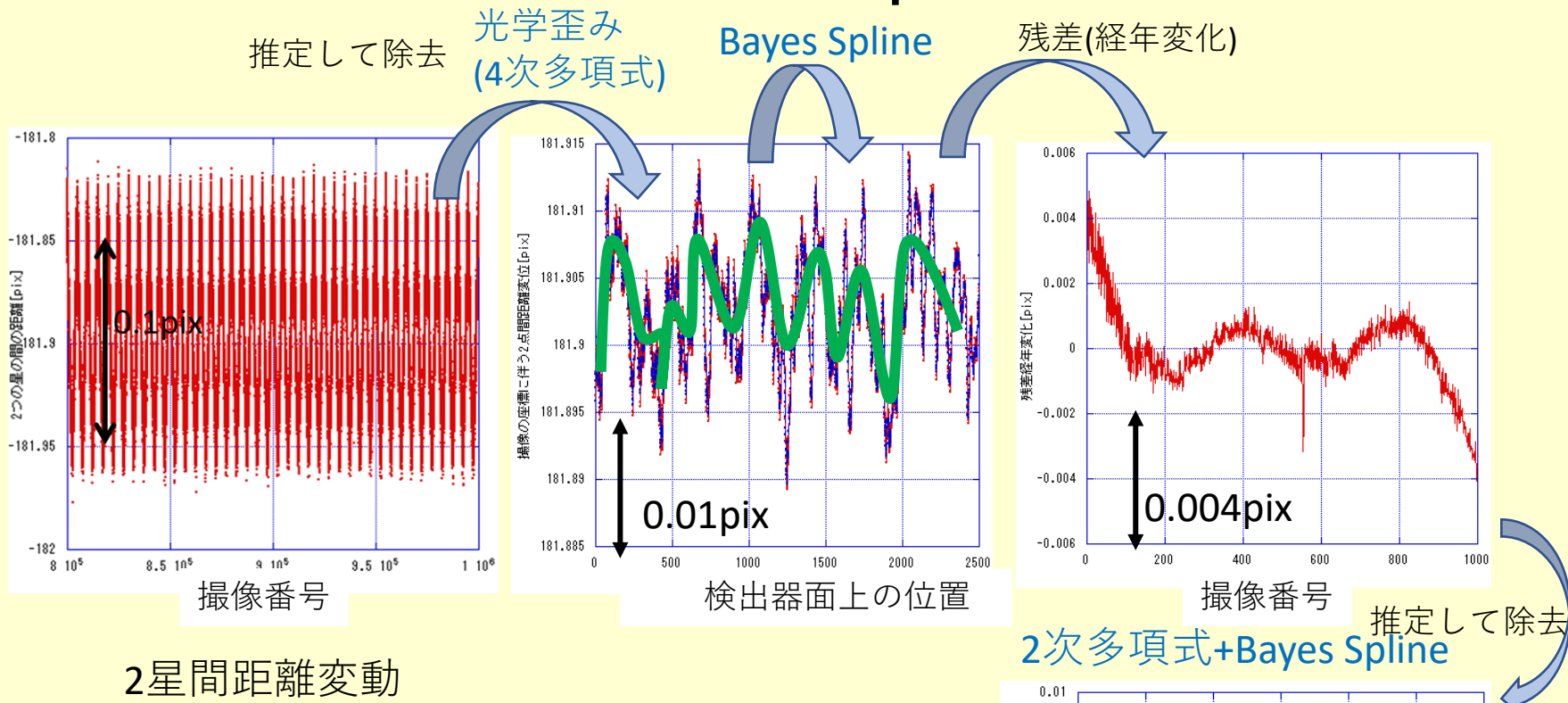


小フレーム(視野サイズ)

大フレーム
(銀河系中心方向の観測領域全域)

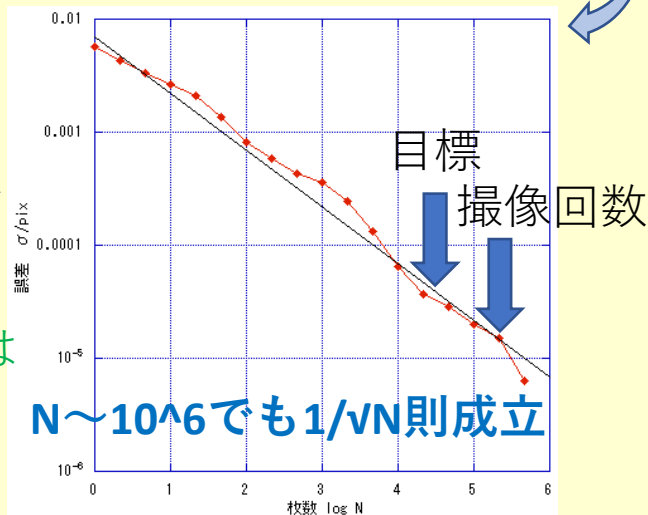
(C):
系統誤差補正
年周視差・固有運動導出

地上実験の実証結果 (step BとCの両方)

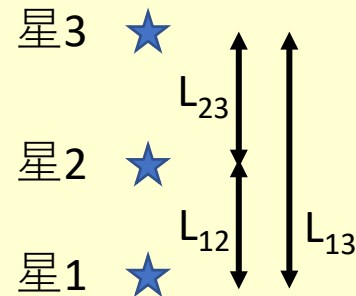
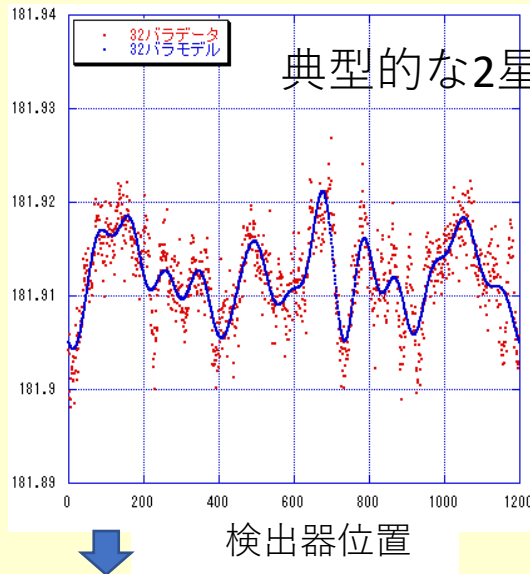


100万回の多数回撮像で、系統誤差をモデル化で補正しつつ、星の相対位置の誤差が2桁半程度減少(JASMINEに相当)

*フラット補正を除き、事前に誤差の測定や校正などは何も行ってない。



推定した系統誤差が画像歪みを含んでいることの実証

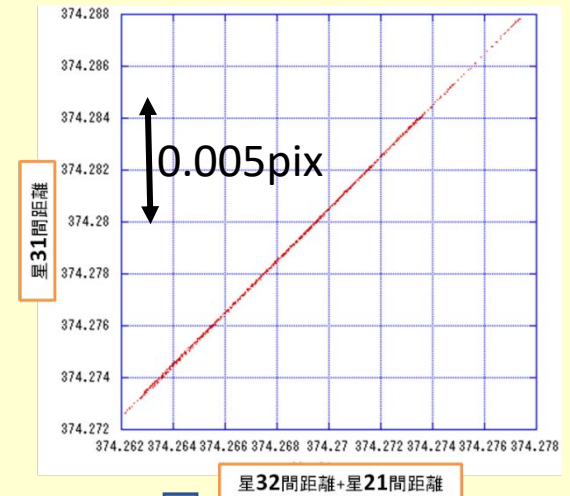
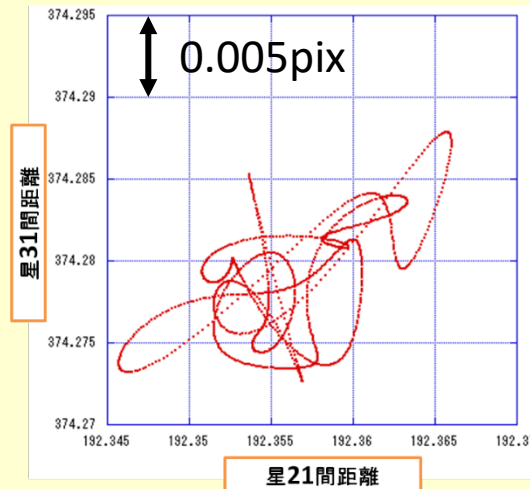


往復させながら、
 L_{12} 、 L_{23} 、 L_{13} を推定

L_{12} と L_{13} の変動は、無相関

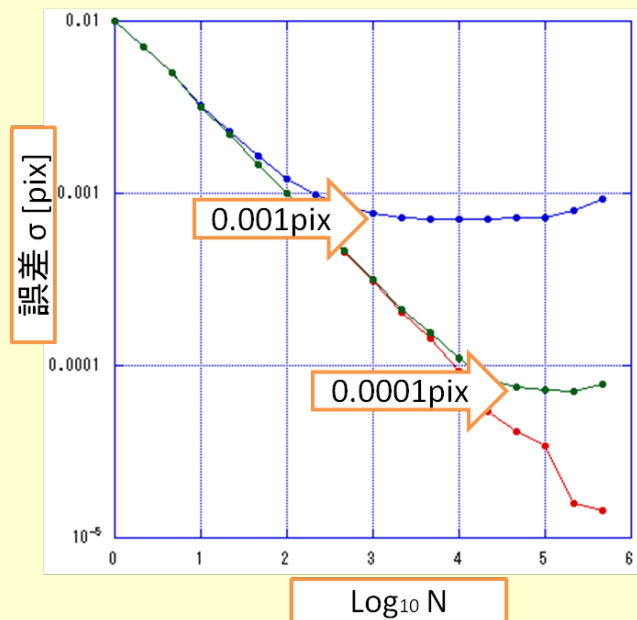
* $L_{12} + L_{23}$ と L_{13} の変動は、
強い相関

* L_{12} 、 L_{23} 、 L_{13} の変動は、
各々独立に0.01pixel程度

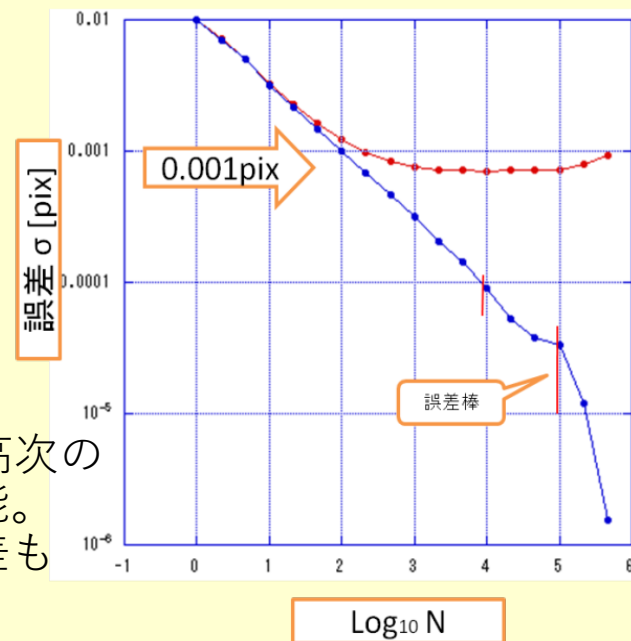


画像歪みが補正できていること¹⁰に相当

系統誤差の検知(step C): 実験を模擬した数値シミュレーションによる実証



微小な系統誤差が含まれている場合
(当初の星に位置精度では存在を認識出来ない場合)
⇒ 誤差が減少していき、あるところで、
 $1/\sqrt{N}$ 則が成立しなくなる
⇒ **系統誤差の存在を検知**



モデル化：○多項式、
○フーリエ級数
→ * 低次から試行して、順次、高次の
補正をしていくことが可能。
* ステップ関数型の系統誤差も
対応可能
○ベイズ型スプライン回帰法
+ 赤池ベイズ情報量基準

モデルを改良して補正可能

数値シミュレーション(2次元) によるStep Bの実証

- 地上実験の補完となる数値シミュレーション
 - 現実の2次元面上での解析
 - 歪みを様々な自由度で解析できる
 - フレーム連結の実証

- HSTデータへ適応可能

画像歪推定

プレートモデルの係数は、すべての小フレームで共通



装置の熱変動安定性 (JASMINEで想定)

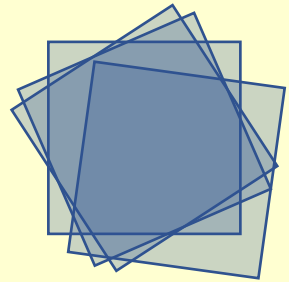
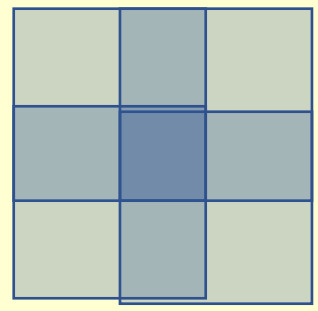
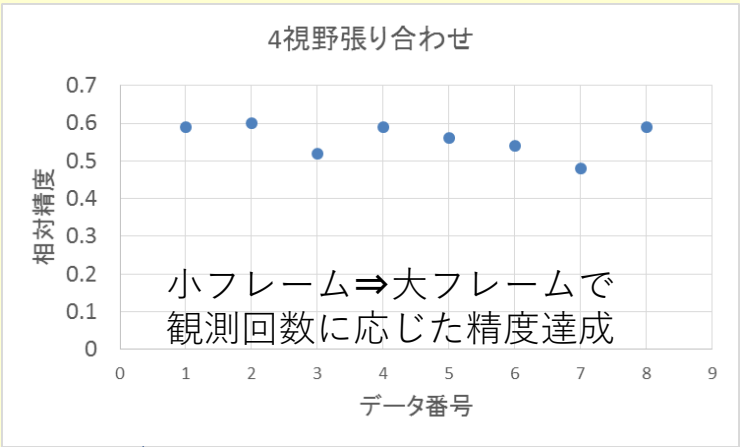
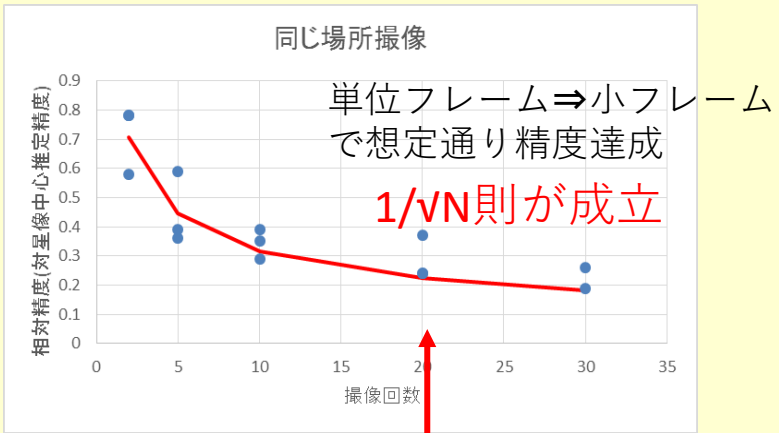
光学歪みのモデル化：プレートモデル(双多項式)

$$x(t) = \xi_0(t) + a_{10}(t)\xi + a_{01}(t)\eta + a_{20}(t)\xi^2 + a_{11}(t)\xi\eta + a_{02}(t)\eta^2 + \dots$$

$$y(t) = \eta_0(t) + b_{10}(t)\xi + b_{01}(t)\eta + b_{20}(t)\xi^2 + b_{11}(t)\xi\eta + b_{02}(t)\eta^2 + \dots$$

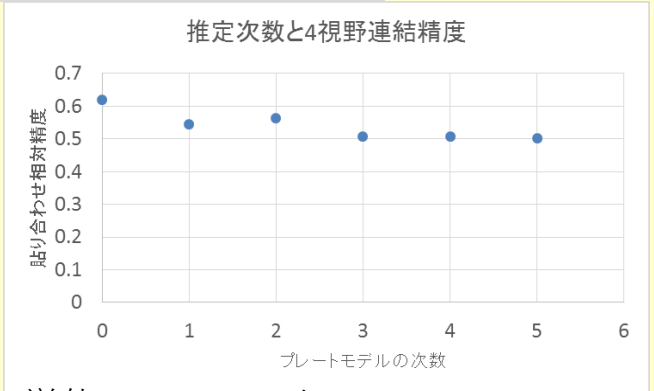
最大4視野の連結

星の数：10個～30個



JASMINE

星の数などの
 インプットした
 パラメータ値が
 異なっても
 (データ番号の
 違い) ほぼ同じ
 精度



単位フレーム⇒小フレーム
 で次数に依らずプレートモデルの推定可能

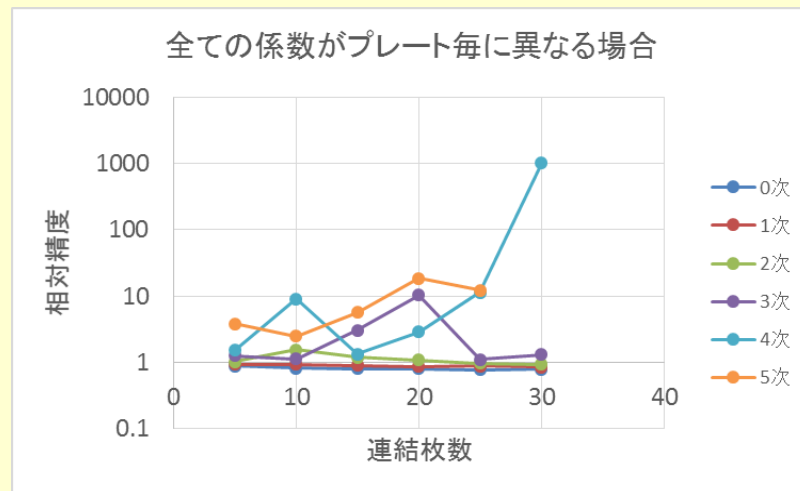
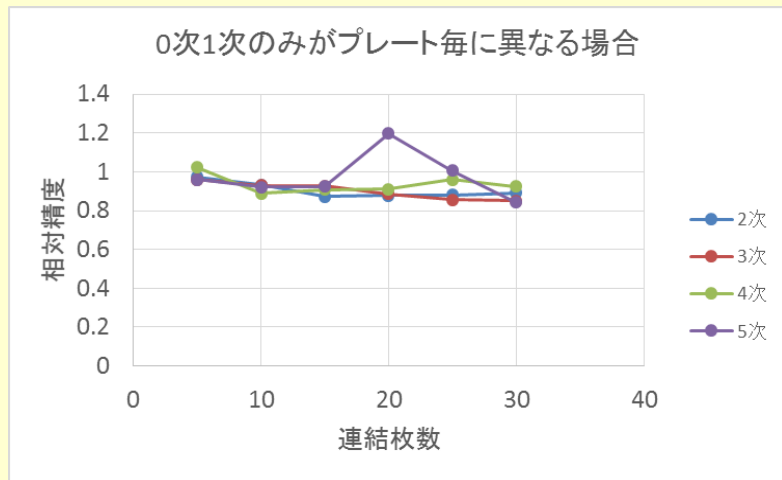
歪みに時間変動がある場合

1次元で多数枚のプレートを連結したケースの数値シミュレーション

$$x = a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2 + a_3\xi^3 + \dots$$

2次以上の項の係数が変動しない場合
(JASMINEに相当)

望遠鏡に熱・構造の変動がある場合
⇒すべての項の係数が変動



連結枚数や次数にあまり依存せず、
連結精度はよい。

4次以上の項の係数が時間変動する
プレートモデルでは連結誤差大

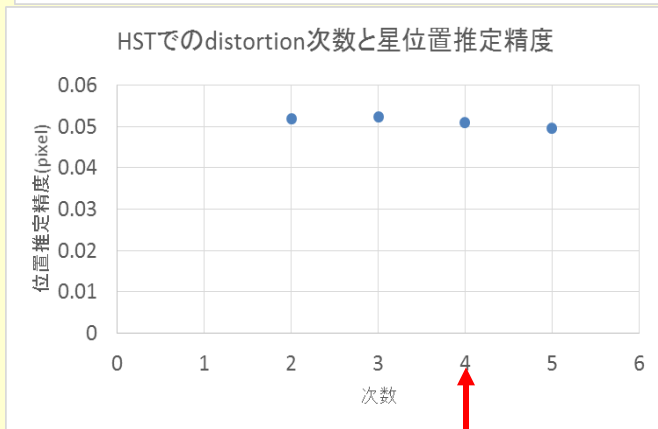
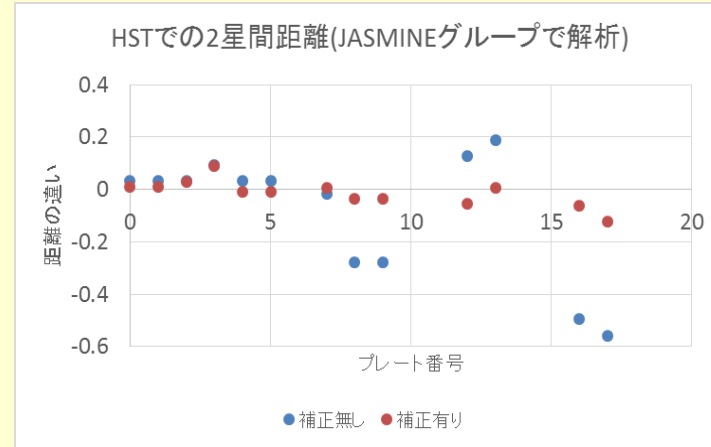
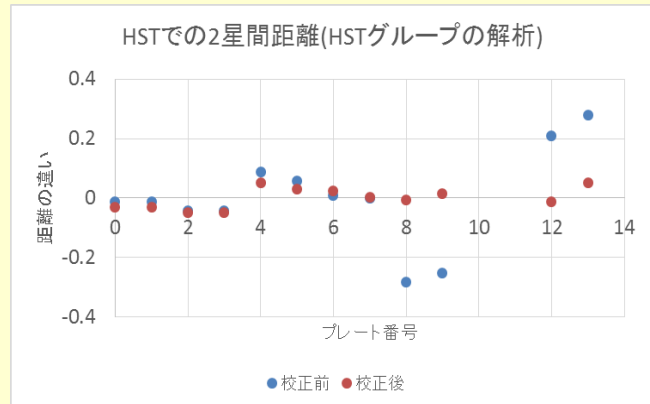
パラメータ数の増大、連結の自由度が増加
=>連結精度の悪化

熱構造安定性を要求

HSTデータによるStep Bの実証：HSTデータの画像歪み推定

HSTのデータアーカイブ => MIKULSKI ARCHIVE for SPACE TELESCOPEよりデータ取得

- * GO-9028: 40回47Tucを観測 => そのうち、13個のデータのみ下記の解析で使用可能。
- * フラット補正後の生データを取得。撮像された星同士の距離が近いもの => 同じ星と同定
- * 同じ星同士の距離が、異なったフレーム上でも不変になるように条件を課して、歪み推定



星位置誤差は想定通り（補正前より5倍程度の精度向上）で、HSTの結果とも一致。
標準偏差が0.24pixから0.05pixに改善。

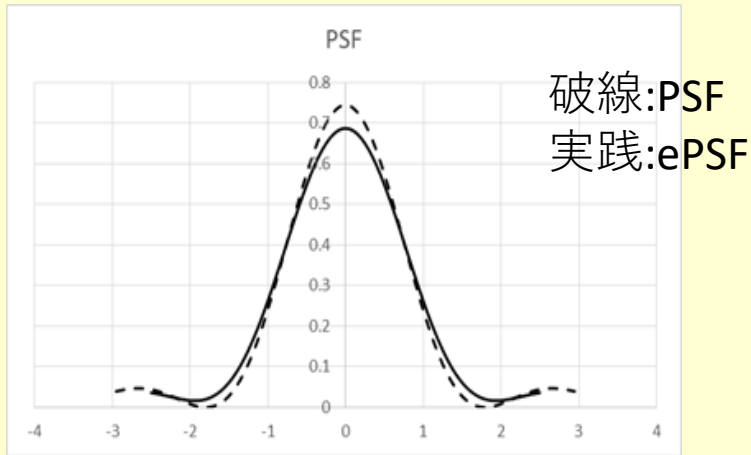
* 精度は、仮定したプレートモデルの次数に依らない。
多項式近似では、これ以上、精度は向上しなかった。

HST team

星像中心位置の推定

effective PSF(ePSF)

HSTチームが用いた手法：ePSFの利用
ePSF(effective PSF)の定義



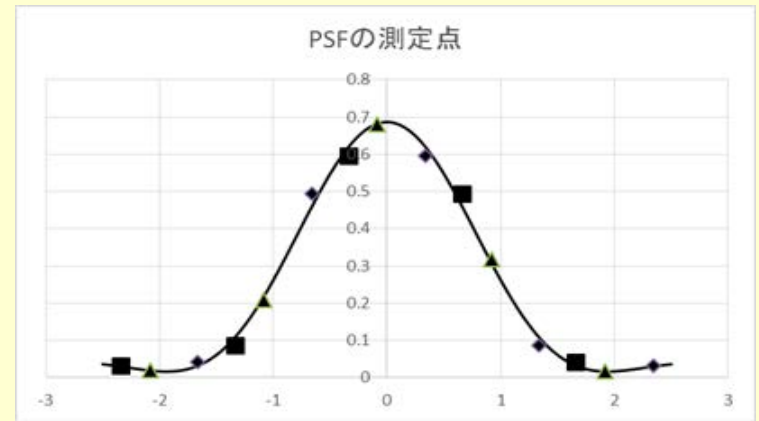
$$a_i(\lambda) = (p \otimes \psi)(x, y, \lambda)$$

$$ePSF(x, y) = \int (p \otimes \psi)(x, y, \lambda) d\lambda$$

ψ : 光学装置で決まるPSF

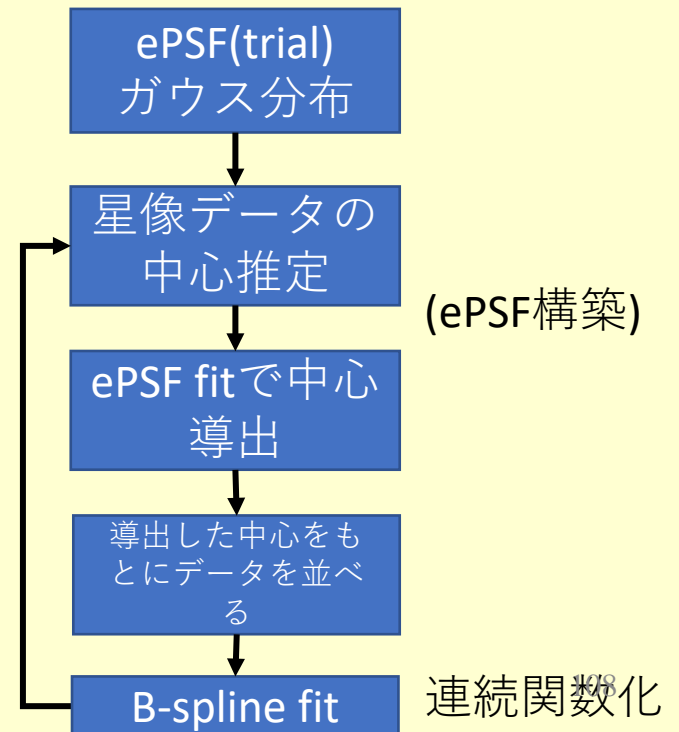
p : pixel response function

* ピクセル内の感度むらや
photon diffusionなどを反映



ePSFの構築手順：

中心位置が異なる様々な星像の各ピクセルでのphoton数～ePSFの各点での近似値



JASMINEでの星像中心推定精度の目標

○Pixel phase error :

サブピクセル内での実際の星の中心位置とePSFでfitして得られた中心位置との差

○目標精度

Pixel phase errorが $1/300$ pix 程度以内

* 理由

星が撮像ごとにピクセル内のどの位置に写るかは、無相関。そのため pixel phase errorは同一星の多数回撮像により減少すると期待

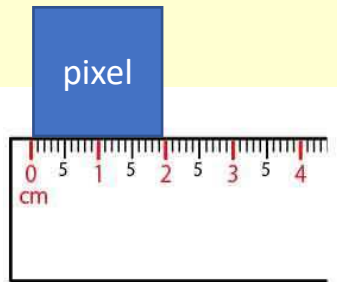
=> もし、仮に系統誤差が残っているとしたら、step Cで補正可能。

(補足) 星の色など星の個性に依存する部分、視野内の位置によるPSF形状の違い等

=> ある程度同じタイプの星のカテゴリ毎でePSFを構築

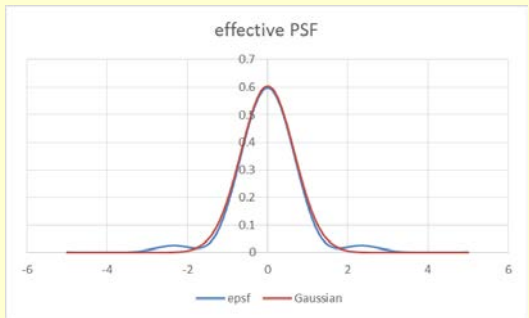
数値シミュレーションによる解析結果

ePSF法でのpixel phase errorの目標達成確認

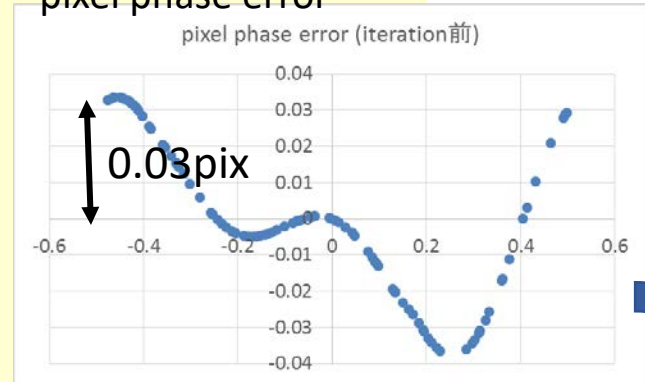


ガウス分布（初期値）とドーナツ開口PSF（真の解）

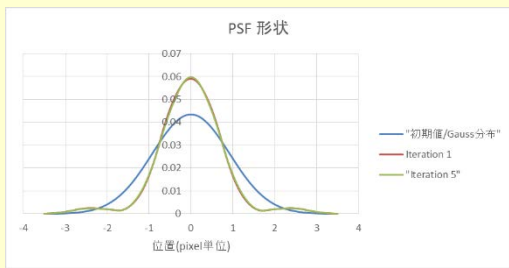
ガウス分布型PSFでの pixel phase error



誤差は、ポアソン
ノイズ、pixel内
感度ムラを仮定

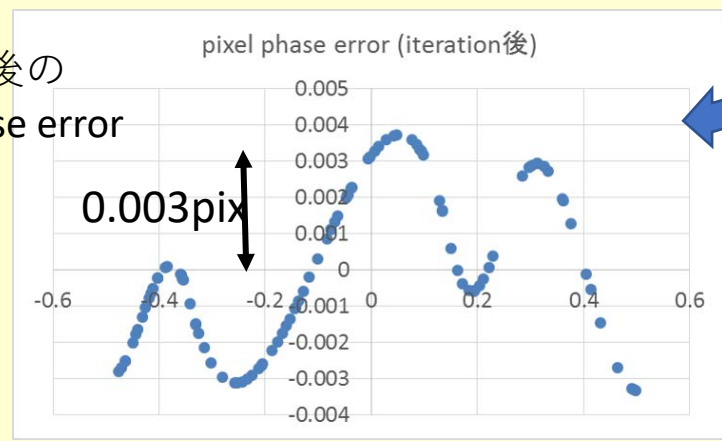


ePSF形状の更新



iteration後の pixel phase error

↓
1/300以下
(1次元)

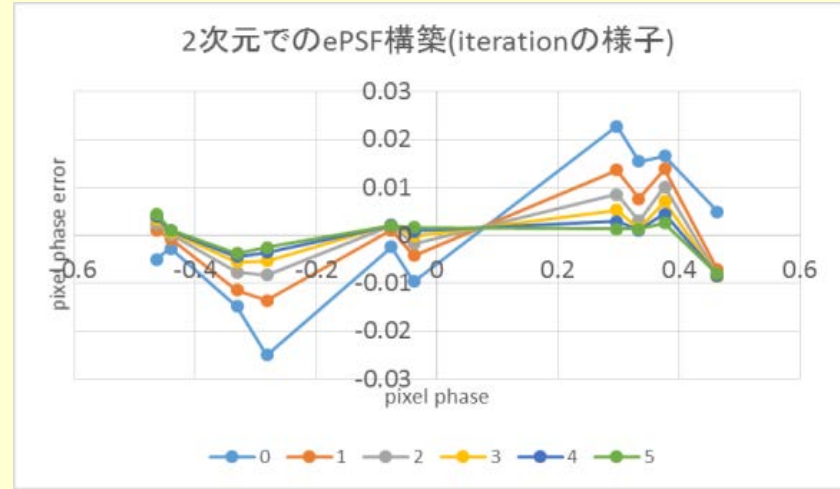
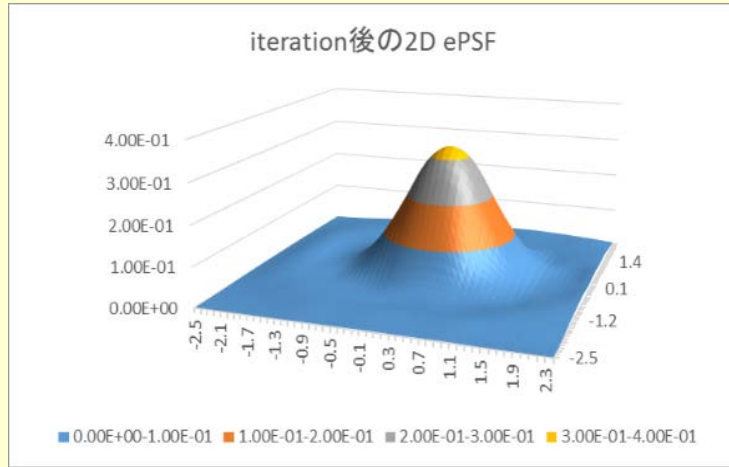


iteration

ドーナツ開口PSFに、ピクセル内感度ムラを考慮

Pixel phase error は2Dでも 1/300ピクセル達成

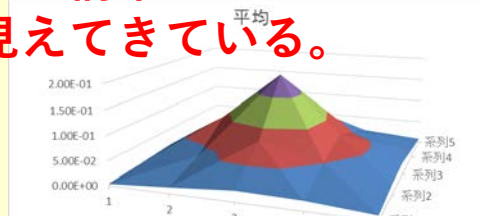
○2次元でのePSF構築と pixel phase error の評価



2次元でのePSF構築



観測データのままでは全然見えていなかった回折リングが、星像中心を合わせつつ、星像データを重ねてePSFを構築することによってリングがクリアに見えてきている。



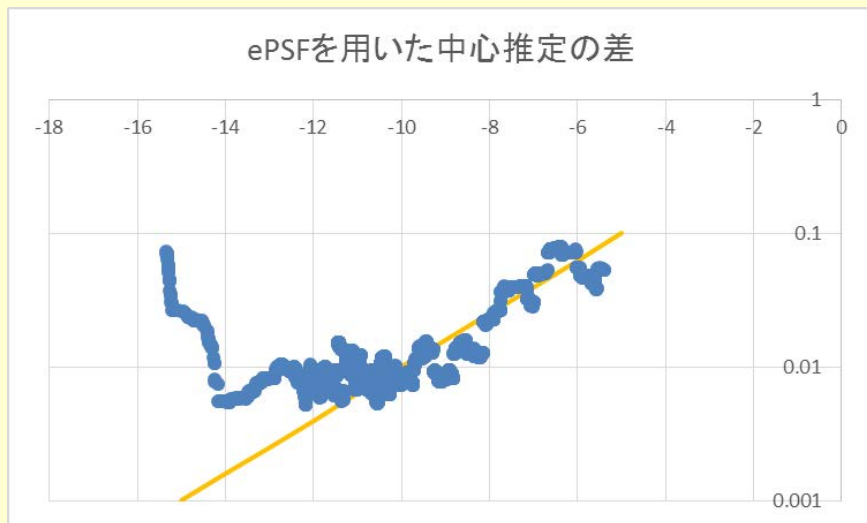
単純に星像を平均した分布

2次元ePSF構築における、iterationによる pixel phase errorの改善。
凡例の番号はiterationの回数を表す。

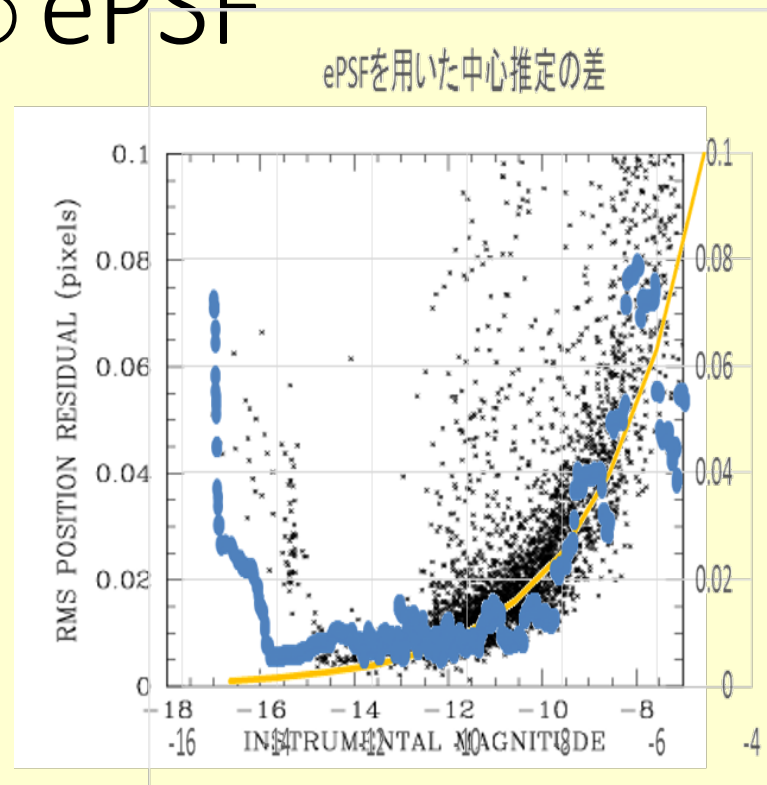


**Pixel phase errorは、
目標の1/300以下を達成している**

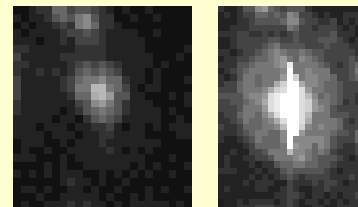
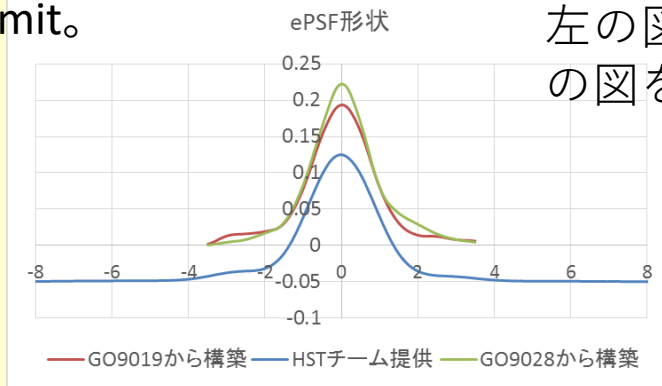
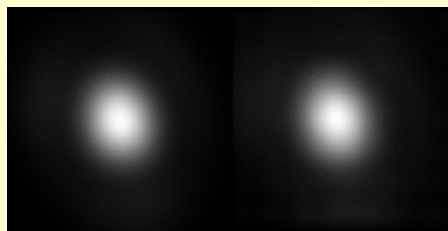
HSTデータによるePSF



中心推定の差(HSTチーム提供のePSFとJASMINEでHSTデータから作成のePSF)
 橙線は光子ノイズlimit。



左の図(linear 表示)とHSTチームの論文の図を重ねたもの。

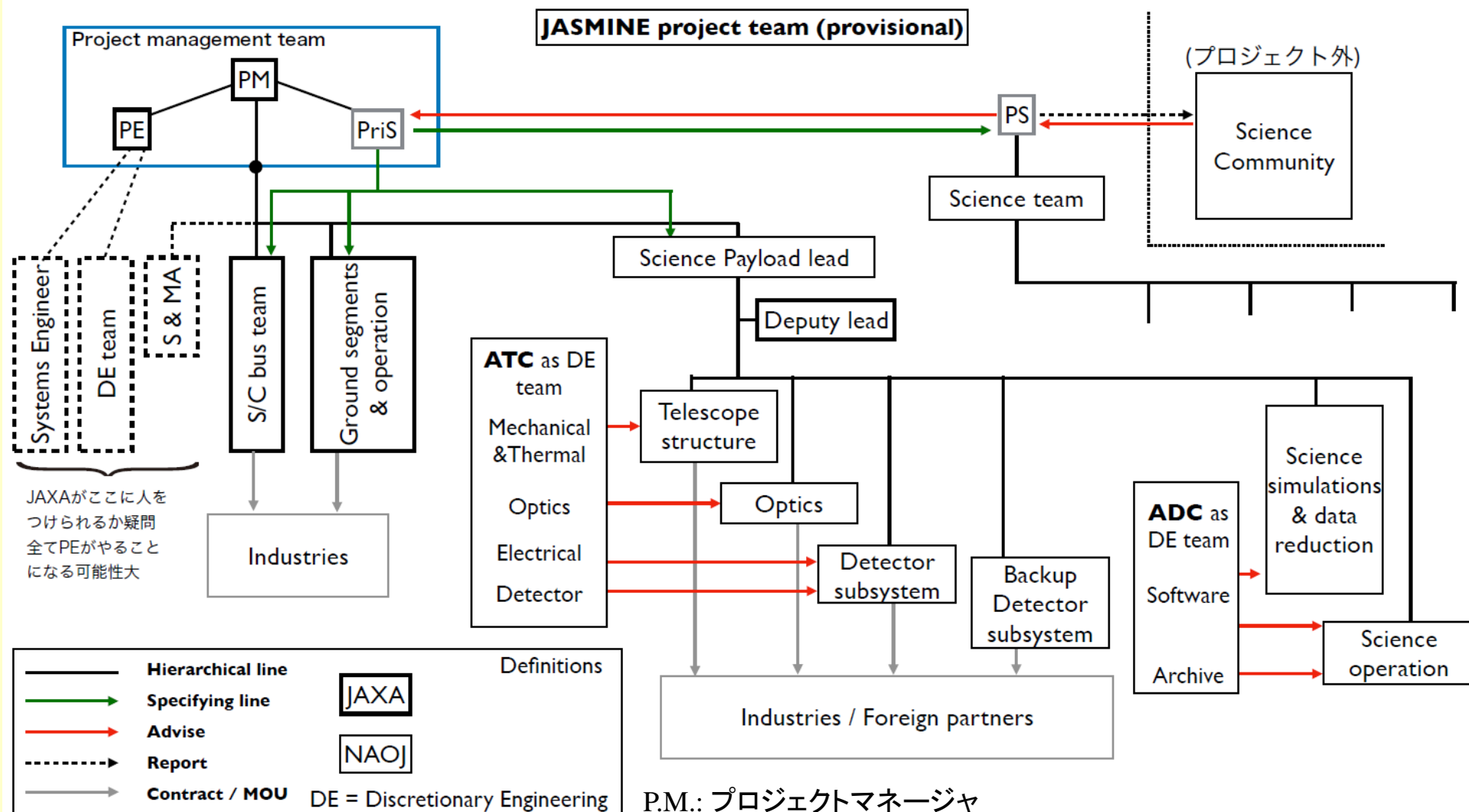


-9等

-12等

ePSF形状(左HST、中JASMINE、右比較)

JASMINEの体制



P.M.: プロジェクトマネージャ
 P.E.: プロジェクトエンジニア
 Pri.S.: プライマリサイエンティスト(旧P.I.相当)
 P.S.: プロジェクトサイエンティスト
 DE team: Disciplinary Engineering team(専門技術者)