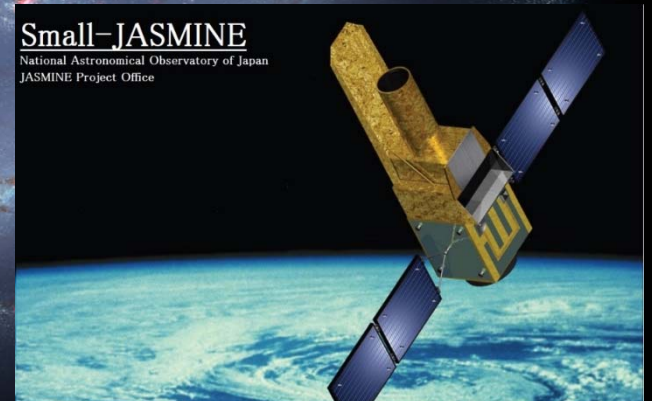
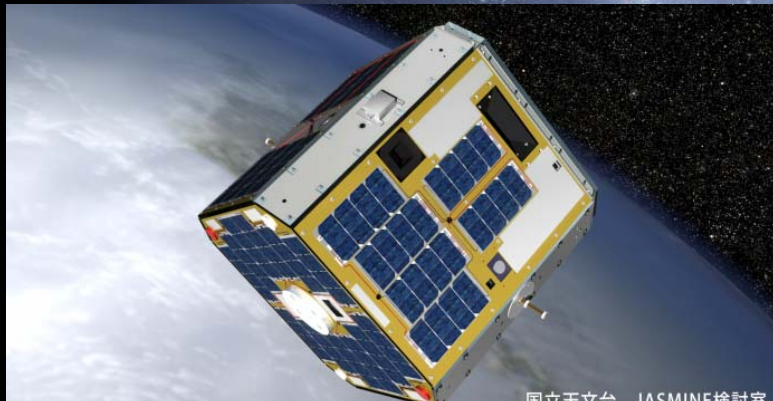
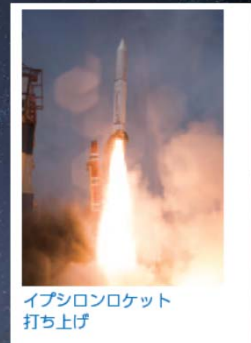


JASMINE計画の状況とVERAとの連携

郷田直輝（国立天文台JASMINE検討室）



1. ヒッパルコス衛星とその後の位置天文観測衛星計画



◎位置天文観測の大革命時代の幕開

Gaiaは革命的：

質（ 10μ 秒角クラスの位置決定精度）、量（約10億個の星）とも画期的

★カタログのリリース：最終カタログは2022年頃

それまでに中間リリースを4回：初回は、2016年9月14日に公開開始した！

Positions (α , δ) and G magnitudes for all stars with acceptable formal standard errors on positions.

Positions and individual uncertainties are computed using a generic prior and Bayes' rule.

For this release, it is assumed that at least 90% of the sky can be covered.

At the beginning of the routine phase, a special scanning mode repeatedly covering the ecliptic poles on every spin was executed for calibration purposes. Photometric data of RR Lyrae and Cepheid variable stars based on these high-cadence measurements will be released.

The five-parameter astrometric solution - positions, parallaxes, and proper motions - for stars in common between the Tycho-2 Catalogue and Gaia will be released. The catalogue is based on the *Tycho-Gaia Astrometric Solution*

*国立天文台天文データセンターにもミラーサイトが立ち上がる予定(10月中)

★Gaia-JASMINE Joint meeting@国立天文台(三鷹) 2016.12.6~9

Gaiaのリーダー (project scientist)をはじめ、Gaiaチームから8名程度参加予定

★IAUシンポジウム330@ニース(2016.4.24-28)

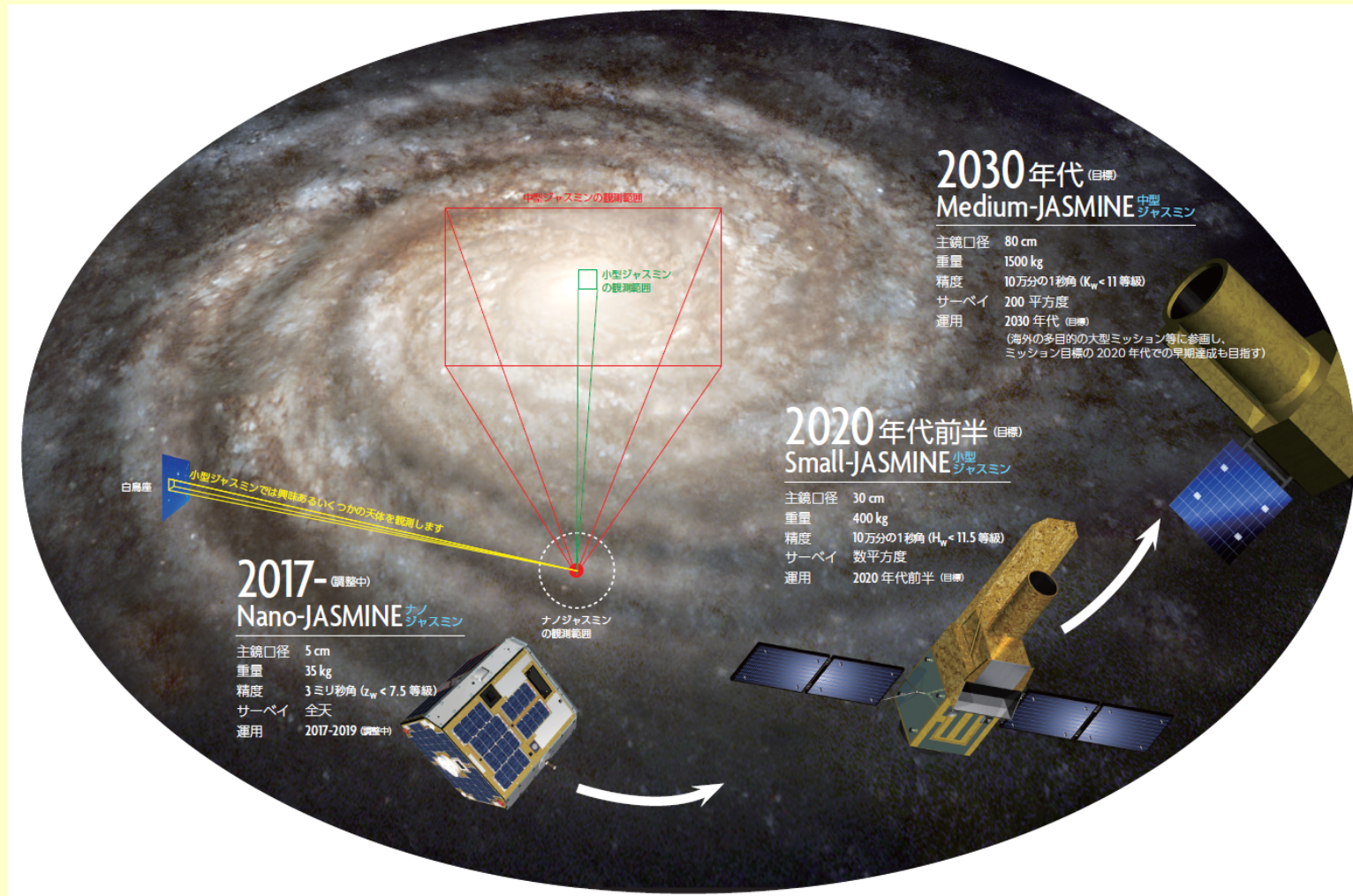
“Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky”

2. JASMINE (赤外線位置天文観測衛星) 計画シリーズ

Gaiaを補完するデータの必要性も高まっている

○明るい星 (6等星以下)
○Gaiaデータのvalidation } → Nano-JASMINE

○天の川中心付近の観測
○高頻度観測 (短周期現象) } → 小型JASMINE



3. Nano-JASMINE(NJ)の概要

★NJのミッション目標

zw-band(0.6~1.0ミクロン)での位置天文観測: 全天サーベイ
zw<9等級をダウンロード(約50万個の星)

位置測定精度: ~3mas(7.5等級より明るい星(20万個)に対して)

*ヒッパルコスカタログと結びつけると

固有運動精度は1桁程度向上(~0.1mas/year)

年周視差も精度向上(~0.75mas)

長周期(6年~40年程度)連星の判別と軌道要素決定

○Gaiaでは解析が困難な明るい星(G<6)の位置天文情報を提供可能。

Gaiaの補完となるため、Gaiaデータ解析チーム、ESAからの期待も大きい。

公式なサポートレターも得ている。

○ユーザーの利便性を考え、将来に、Nano-JASMINEの観測データとGaiaの観測データを一緒に公開

○データ解析準備は、Gaiaのデータ解析チームと共同で開発

★NJの仕様概要 衛星FMは、2010年10月に完成済み

主鏡口径: 5cm、焦点距離: 1.67m

衛星サイズ: 50×50×50cm

衛星重量: 約35kg

衛星軌道と高度: 太陽同期軌道、約800km

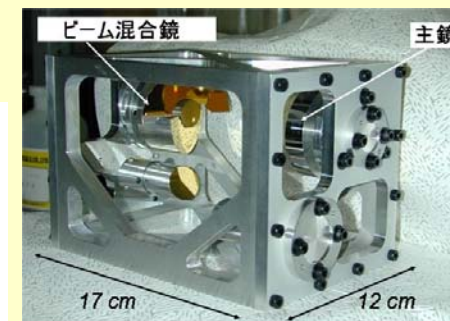
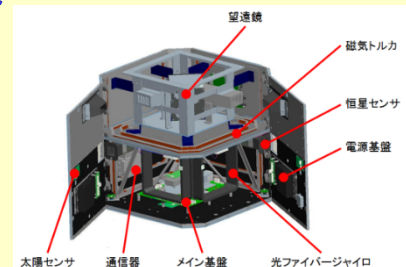
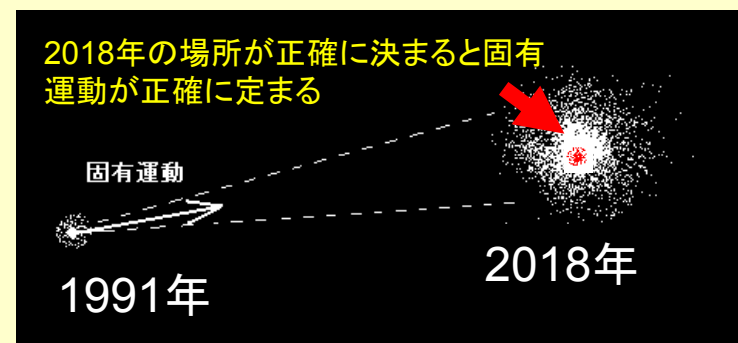
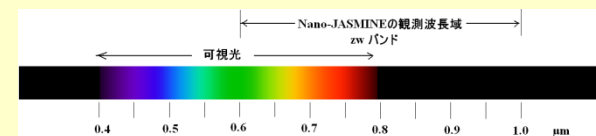
運用年数: 2年~3年

*打上予定の状況

従来、ACS社との契約: ウクライナのロケット+ブラジルの射場

=>ウクライナ政治情勢、ブラジル政府の経済問題により会社が倒産準備。

Gaiaチームの支援によりESAによる打ち上げを調整中: 運用終了後25年以内に大気圏突入する機構の設計⁵、開発等



4. 小型JASMINE計画

4-1. 小型JASMINEの概要

- * **Hwバンド**(1.1~1.7 μm)の波長域における撮像観測を**高頻度**(約100分に1回)で行い、その観測で得た**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。

★Gaiaでは測定困難なパートを補完する観測が強く期待されている。

⇒ **天の川銀河(銀河系)の中心領域**

- *可視光観測のGaiaでは、高精度で多数の星を観測することは困難



- * JAXA宇宙研の公募型小型計画宇宙科学ミッション(イプシロン搭載宇宙科学ミッション)による実現を目指している



イプシロンロケット
打ち上げ



4-2. 科学目的

* 小型JASMINEサイエンスWGによる検討

1. 小型JASMINEが、他のミッションに比べて威力を発揮できる 銀河系中心核バルジ付近での天体物理学

重要課題の1つ:

≪バリオンの宇宙の多様性

主目的(大目的): 宇宙に巨大ブラックホールはなぜ存在するのか?

銀河系は、巨大ブラックホールの形成を調べるために他の銀河では適応できない

研究手法(恒星の精密かつ詳細な運動学的情報を使う)を用いることが出来て非常に良い”実験場”となる。

(1) 銀河形成標準理論の検証につながる銀河系での巨大ブラックホールの合体形成の観測的検証

中間質量ブラックホールが中心領域に落ち込み、中心領域の星へのブラックホールによる力学的摩擦の効果が効いているか効いていないかを星の位相分布関数を用いて、統計的に高信頼度(フルサクセスレベルで99.7%以上)で判断

(2) 巨大ブラックホールへのガス供給機構解明につながる銀河系中心核バルジの重力場の解析

銀河系中心核バルジの棒状構造モデル(重力場モデル)における棒状パターンの回転角速度といったパラメータへの制限を与える。特に、中心核バルジに、半径5kpc程度の棒状構造とは異なる、より小さな内部棒状構造が存在しているかどうかを、運動学的に、つまり棒状構造のパターンの回転角速度の違いを用いて統計的に高信頼度(フルサクセスレベルで99.7%以上)で判断できることを目標

* 科学目的(1)、(2)とその目標+成功基準 → ミッション要求、システム要求に直結する科学目的

○サーベイ領域:

プロジェクトサーベイ: 銀河系中心方向の領域 : 春と秋に観測

* 領域1 => 半径0.7度程度の円の領域

* 領域2 => 銀経-2度~0.5度、銀緯0.2度~0.5度の範囲の領域

○観測精度(目標):

銀河系中心方向: 年周視差: 20 μ as程度以下

固有運動: 要求は150 μ as/年以下 (~50 μ as/年以下を達成見込み)

(Hwバンド(1.1~1.7 μ m)で12.5等級より明るい星に対して達成)

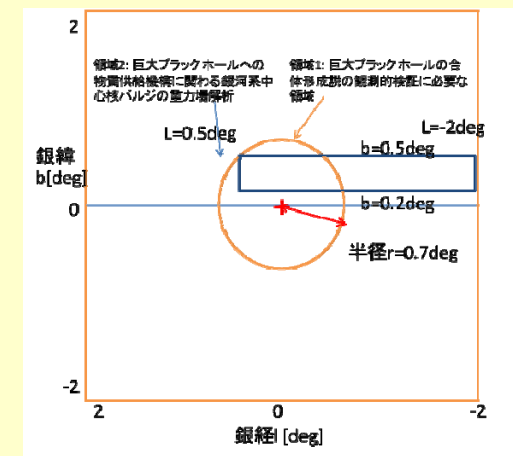
* Hw<13magの星のデータをダウンロード

* 領域1 => 要求は3500個程度以上の星(見込みは4900個程度)、

* 領域2 => 要求は2000個以上の星(見込みは5400個程度以上)

(測光精度は相対精度で0.007mag程度の見込み)

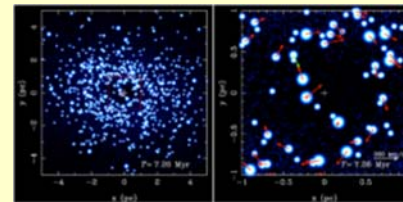
○観測データは、天体の天球面上での位置および測光の時系列データ、およびそれを解析した、天体毎の年周視差、固有運動なども提供。



★その他の具体的な科学目的の例 * 小型JASMINEサイエンスWGによる検討

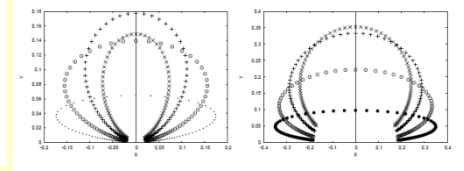
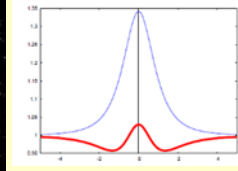
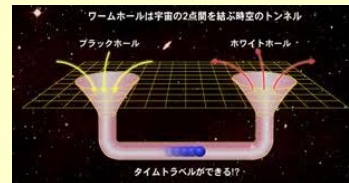
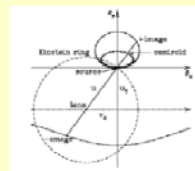
I. 小型JASMINEが、他のミッションに比べて威力を発揮できる銀河系中心付近での天体物理学

- (1) 中心付近の星団の運動 → 星団の起源
- (2) バルジ内の共生星X線連星やX線点源の解明
- (3) 星間吸収物質の3次元分布
- (4) 中心付近の変光星の物理的解明
- (5) 重力レンズ効果 → 重力レンズ天体(太陽系外惑星系も含む)の物理的解明



ワームホールの発見?!

(6)



II. 銀河系内天体で、短時間変動現象を伴い近赤外線で明るく物理的に興味がある、いくつかの特定天体: 高エネルギー天体連星系、恒星が低質量な系外惑星系、活動恒星などに対象を特化し、これらの天体の物理的解明。

特定天体方向: 夏と冬の一部に観測(観測方向に制限有り)

* 共同利用の一環として、公募により、観測天体やその優先度を決定予定。

観測精度(目標): 対象天体の科学目的に応じて $10\mu\text{as}$ 以上の相対位置精度、測光精度は相対精度で 0.01mag 以下

- X線連星系(Cyg X-1など)の軌道要素決定 → 降着円盤やジェットの基礎的な物理に迫る
- ガンマ線連星系の軌道要素解析 → 高密度星の正体判別、放射モデルへの強い制限
- 系外惑星探査(位置天文法による検出): 特に主星が低質量星の場合。

褐色矮星まわりの惑星発見。

- 既知の系外惑星の軌道要素決定 → 惑星の質量決定、惑星形成モデルの制限など。
- 恒星表面上での活動(黒点等)

→ 活動恒星の物理的解明

- 星形成領域の3次元分布

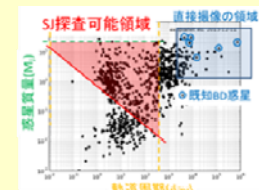
有力候補天体: Cyg X-1: ($l=71^\circ$, $b=+3^\circ$)

周期5.6日(Gaiaでは観測不可能)

伴星: $m_v \sim 9\text{mag}$ (小型JASMINEで検出可能)、位置変化は、 $40 \sim 50\mu\text{秒角}$

→ 小型JASMINEで測定可能。測光精度は相対精度で 0.01mag 以下

* γCas : WD or NS => 1σ degree of confidence, HESS J0632: NS or BH (2σ)



主星が低質量星($M_s < 0.1 M_{\text{sun}}$, $V-H > 7\text{mag}$)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

4-3. 位置天文測定精度の達成方法

★システムに、10 μ 秒角クラスの(安定)精度を要求する必要はない。

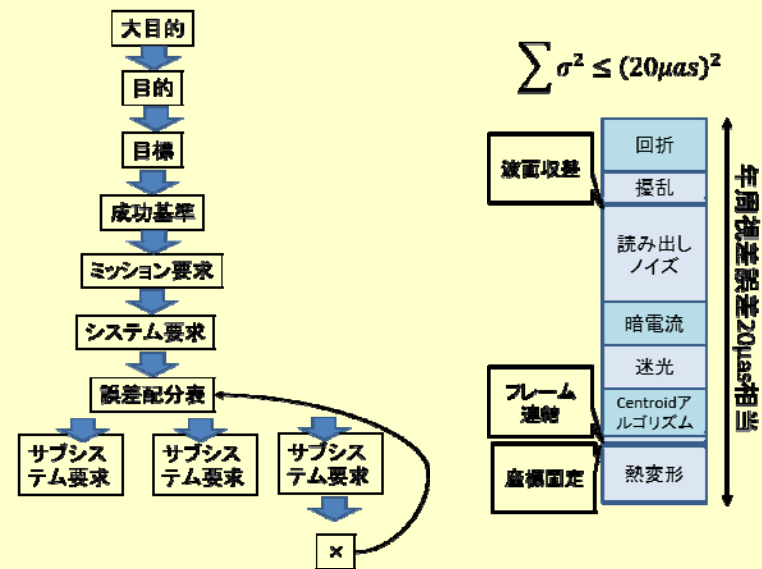
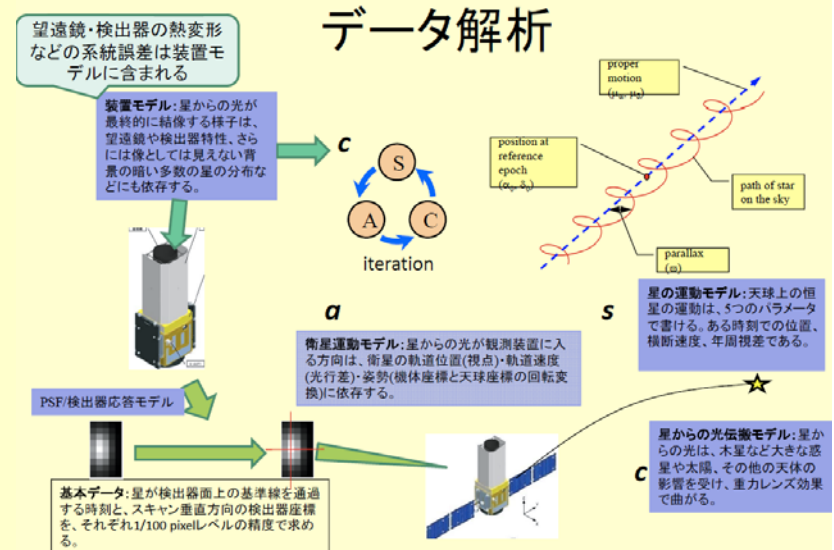
要求精度を達成する方法: “系統誤差”も同時に解く

- * 短時間では(多くの)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。
 - * 長時間変動は単独星の動きのモデル化(らせん運動)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。
 - * モデル残差がホワイトノイズ化。多数回観測で誤差の減少
- => 適切な誤差配分とモデル化、データ解析により、 \sqrt{N} 則で達成

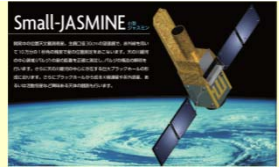
★しかし、何でも解けるわけではない。

モデルの単純化が必要

- ↓ *多項式ならばなるべく低次の項まででモデル化可能
- システムに工夫が必要
- => サブシステム要求 (熱構造安定、指向安定性など)
- 特に、要求の成立如何で誤差配分が敏感に変動するものは、**重要なキー技術**

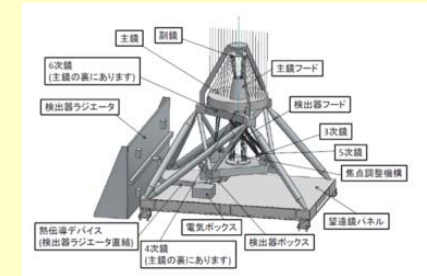
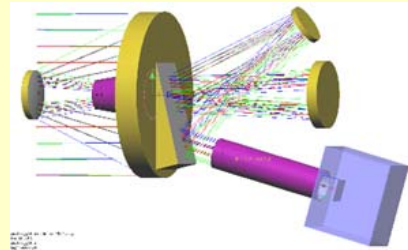


4-4. 小型JASMINEのミッション概要



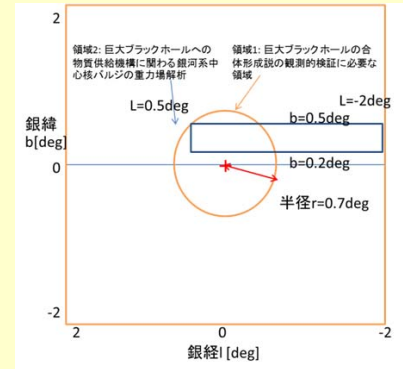
○小型JASMINEの仕様

- 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: Hw-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: 約400kg (RCS込み)



○サーベイ領域:

- I. プロジェクトサーベイ: **銀河系中心方向の領域** : 春と秋に観測
 - *領域1 => 半径0.7度程度の円の領域
 - *領域2 => 銀経-2度 ~ 0.5度、銀緯0.2度 ~ 0.5度の範囲の領域
- II. 公募サーベイ: 特定の対象天体



○観測精度(目標):

- I. 銀河系中心方向: **年周視差 20μas程度以内、固有運動 50μas/年程度以内**

(Hwバンド(1.1 ~ 1.7 μm)で12.5等級より明るい星に対して達成)

* Hw < ~ 13magの星のデータをダウンロード

*領域1 => 5000個の星(12.5等級まで)、*領域2 => 5500個程度の星(12.5等級まで)

- II. 特定領域サーベイ: **特定天体方向(候補天体例: Cyg X-1)**

*精度は、各々の対象天体に対する科学目的による

○測光精度は相対精度で0.01mag以下

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

○時系列データは、約50分間の連続撮像、その後約50分間の非観測時間、そして再度約50分間の連続撮像データ。観測の総時間までそれが繰り返される。

○観測期間: 3年間程度

○軌道: 太陽同期軌道(高度約550km以上)(tentative)

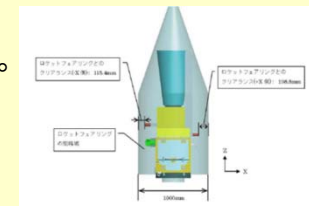
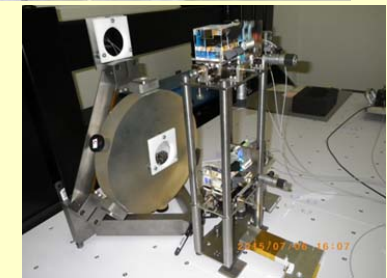
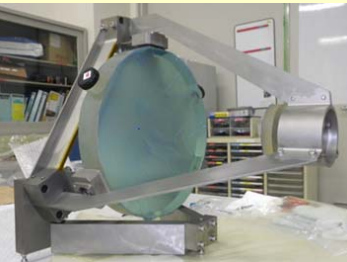
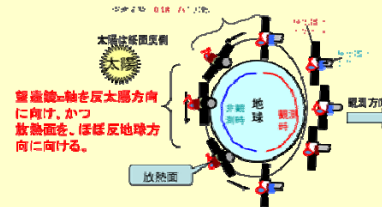
○データ解析手法: 同一天体の高頻度観測

=> 同一フレームが多数枚。

* 星の相対位置は短時間では変化しない、長時間では単独星は

天球面上でらせん運動をする。=> 自然の校正装置により、系統誤差の推測。残差はランダム化=> 多数フレームにより、誤差が減少。

* 年周期の装置変動や永年変動=> GaiaやUCAC4の観測データを校正に使用



4-5. キーとなる技術要素の技術実証実験

宇宙研の競争的資金である戦略的開発経費に毎年度採択され、試験、実験が進んでいる。

(1) 観測装置の熱変動実証

全スーパースーパーインバー製望遠鏡の構造設計の成立性を実証することを目的として、部材試験および部分モデルによる熱膨張特性の実測を行った。アライメント変動、鏡面精度変動について計測し、アライメント変動は1ミリ秒角/10K程度、鏡面精度は検出限界の20nm/10K以下であることを確認した。主鏡支持部が鏡面精度に与える影響については、回転による重力影響および10Kの温度変動については検出限界以下であり、保持部の設計が有効であることを検証した。ただし、アライメント変動については計測系の変動と分離ができていないなど不十分な点もあり、一桁高い精度の計測系を構築し、継続して検証を続ける。

(2) 熱環境

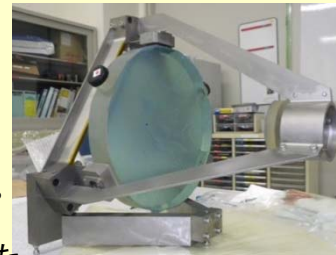
検出器は放射冷却とペルチェを組み合わせ、検出器の熱電流が許容範囲以下となる80K以下にまで冷却し、0.7K以下の温度安定性を実現させることを目標としている。このような熱環境を実現させるため、また常温から低温への温度変化によって生じる熱収縮率の違いが検出器アライメントに影響を与えないように、H26年度はMLIを巻いたアルミとガラエポを4重に折り返した構造を持つ検出器ボックスを設計した。また本構造の成立の鍵となるMLIの巻き方の検討と、それにより達成される実効輻射率の測定を行った。実効輻射率としておよそ0.2-0.3という値が得られ、熱構造解析により目標とする熱環境が成立する見通しが得られた。

(3) 光学系調整

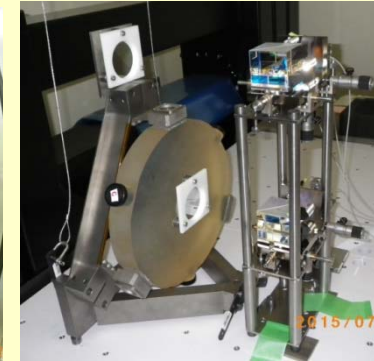
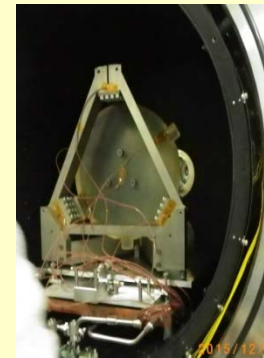
光学系のアライメント設計を企業に委託し、調整方法の見込みがついた。今後、アライメント調整の実証実験を行う。

* システムの詳細評価:

ミッション部のインテグレータ候補の衛星メーカーと、バス部メーカーとにより、開発計画、コスト評価などが進んでいる。



熱歪検証モデル: 特殊鋼メーカー2社に依頼し、極低熱膨張のスーパーインバーの開発を行った。スーパーインバー(Fe-Ni-Co)の組成を含有量を0.1%単位で調整し、**熱膨張率が $0 \pm 5 \times 10^{-8}/K$ のスーパーインバーを得た。**この材料を用い部分モデルを製作した。



右: 熱ひずみ検証モデルと三軸干渉計の設置状況
左: 真空槽中の熱ひずみモデルの設置状況



実証実験の模擬検出器ボックス。

◎4-6. 国際的位置付けと日本で行う意義

(1) 世界的なユニーク性と海外からの推薦、参加表明

- *Gaiaを補完する、近赤外線、かつ高頻度での高精度位置天文観測。
Gaiaチームからも期待されている
Gaiaのデータ解析チーム(ハイデルベルグ大学とドレスデン大学)から
小型JASMINEへの参加意思表明の正式レターを受け取っている。
- *その世界的ユニーク性から、IAU Commission A1のpresidentから正式な推薦
- *Nano-JASMINEにより、衛星開発の経験を積んできている。
- *国内では、地上電波観測のVERAがあり、VERAとの協調が可能

(2) 将来の国際的な計画への橋渡し

- *WFIRSTやPost-Gaiaでの赤外線位置天文観測への貢献が可能。

(3) 中心核バルジ、巨大BH研究での国際的位置付け

- *バルジ星の視線祖速度と元素組成観測: APOGEE-2計画(プロジェクト)
サイエンス連携に関して、小型JASMINEとAPOGEE-2, SDSS-IVとで
MOUを締結。

4-7. 宇宙研公募型小型計画宇宙科学ミッションでの 審査状況

○公募締め切り:2016年1月28日

○2月～3月:MDR相当の審議

*ヒアリング審査4回(7時間半程度)

○6月:評価結果の通知

*与えられた課題2件を検討し、再度の評価(Δ MDR)を受けること。
理学委員会としては、課題が解決された場合は、
小型2号機に推薦する(優先順位1)

*課題1:JASMINEチームと宇宙研が連携し、必要十分な体制構築を行う
課題2:位置決定精度の実証、特に多数枚撮像、貼り合わせ手法により
精度達成が見込めることについて、実データを使用して示すこと。

➔課題1, 2とも宇宙研のサポートを得て、検討が進行中。

さらに、課題2に関しては、Gaiaのデータ解析チーム@ハイデルベルグ大学や
八木雅文氏(NAOJ)等の協力も得ながら、検討を進めている。

5. VERAとの連携

★アストロメトリのサイエンスコミュニティの拡大

○VERAとともに、Gaia時代を迎えて、アストロメトリのデータを用いた研究者コミュニティを日本でも拡大しなければならない。

○JASMINE側も努力:

- * Nano-JASMINEサイエンスワーキンググループ、小型JASMINEサイエンスワーキンググループの活動の継続と発展。
- * VERAとも是非、協力して！！

Nano-JASMINE: VERAとタイアップした星形成領域の構造、星の形成史など
小型JASMINE: 銀河系の中心核バルジ方向(春と秋)

→この領域でのメーザーガスの高精度運動測定も重要！

共通に測定できる天体のpick up

○Gaiaのデータ解析チームとサイエンスチーム等との交流による、
国際的なコミュニティの拡大も目指す。

*Gaiaの中間リリースデータの“品質”の理解も重要



★Gaia-JASMINE Joint meeting@国立天文台(三鷹) 2016.12.6~9

Gaiaのリーダー (project scientist)をはじめ、Gaiaチームから8名程度参加予定

* VERAに関するセッションを設ける予定

今後よろしく御願ひします

Jasmine

