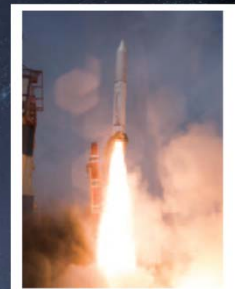


光赤天連シンポジウム 2017.7.25

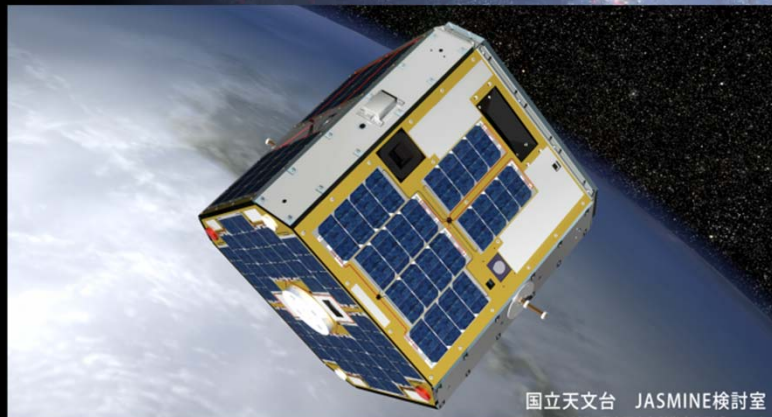
JASMINEの現状と

国際協力による計画の推進

郷田直輝（国立天文台JASMINE検討室）
JASMINEワーキンググループ



イプシロンロケット
打ち上げ



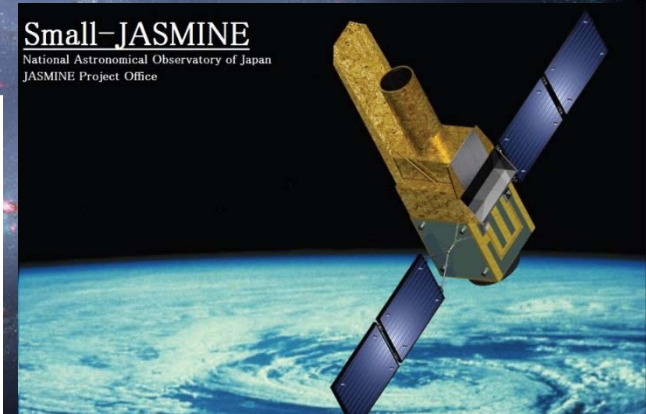
国立天文台 JASMINE検討室

天の川銀河中心領域（巨大ブラックホール）



Small-JASMINE

National Astronomical Observatory of Japan
JASMINE Project Office



◎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：ノミナル運用の最終カタログは2022年末頃

それまでに中間リリースを3回：初回（DR1）は、2016年9月14日に公開開始した！
2回目のデータ公開は、2018年4月、3回目は2020年の中頃から末の間の予定。

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*

★Gaia-JASMINE Joint meeting@国立天文台（三鷹）2016.12.6～8

Gaiaのリーダー（project scientist）をはじめ、Gaiaチームから8名参加。

★IAUシンポジウム330@ニース(2016.4.24-28)で開催された

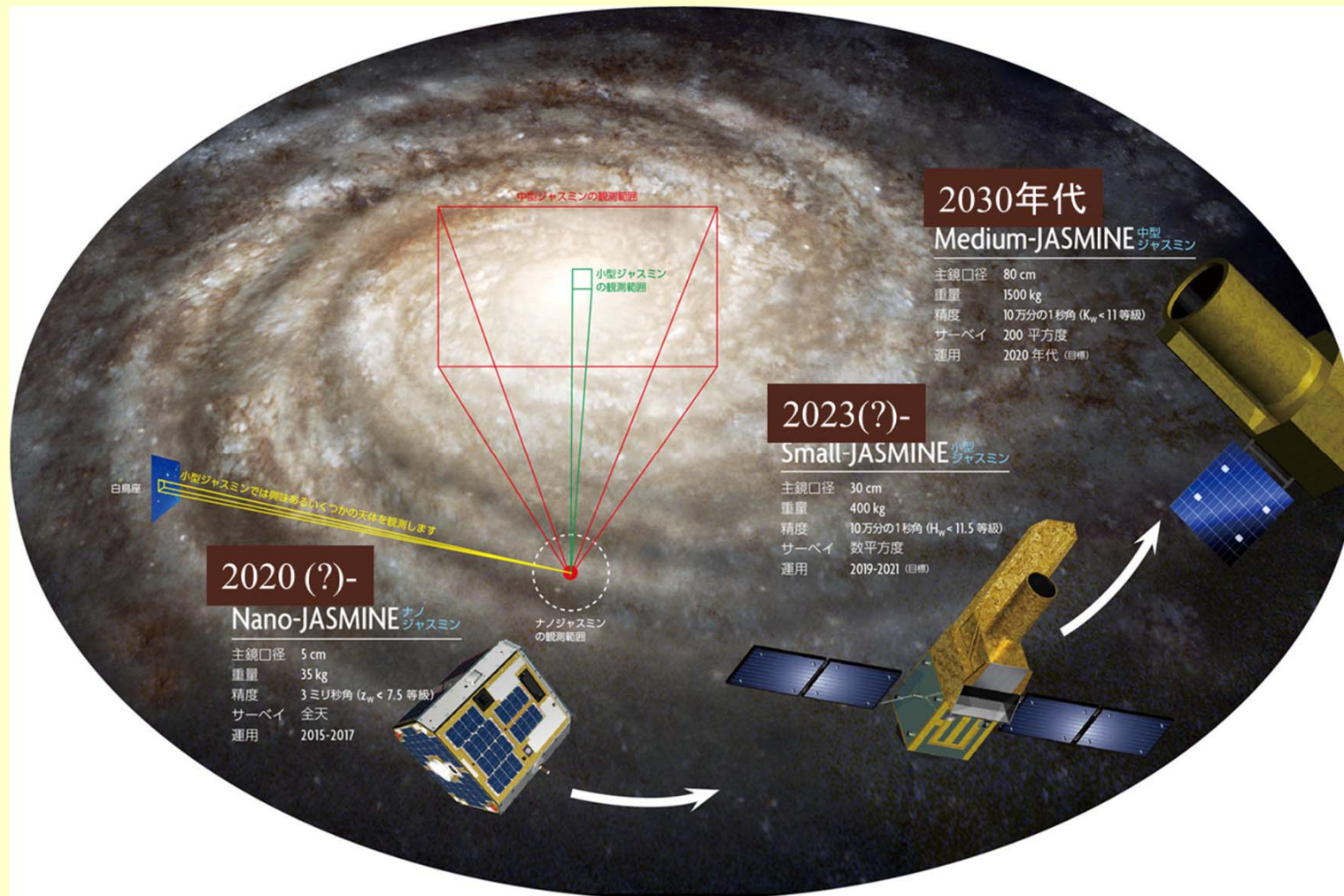
“Astrometry and Astrophysics in the Gaia sky”

1. 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

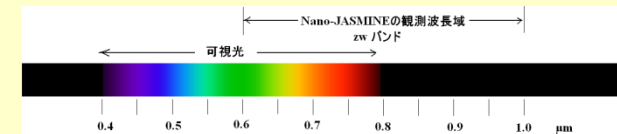
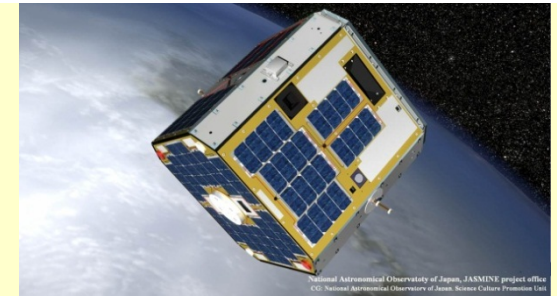


2. Nano-JASMINE(NJ)の概要

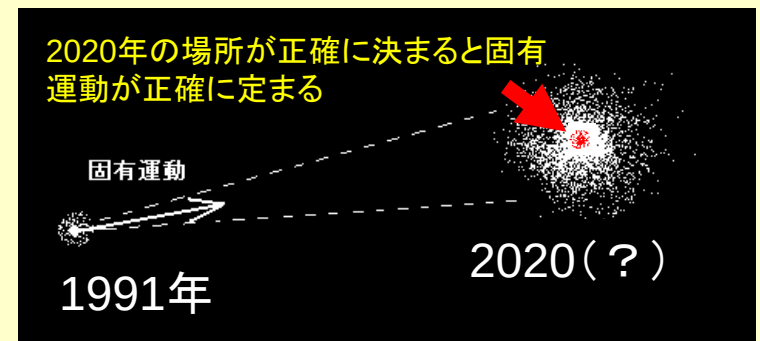
2-1 NJのミッション目標

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。

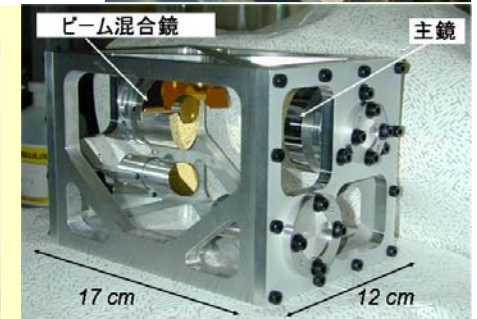
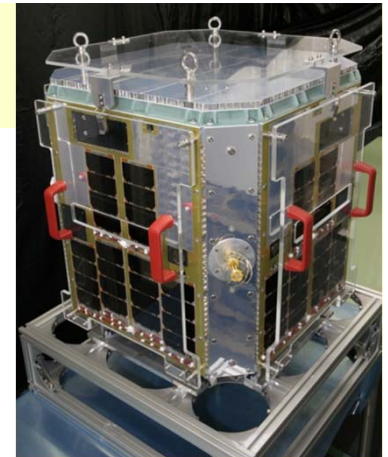
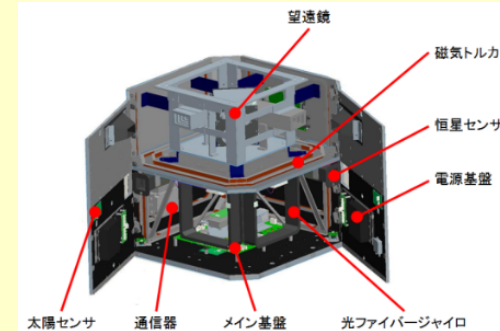
○ユーザーの利便性を考え、将来に、Nano-JASMINEの観測データとGaiaの観測データを一緒に公開

○データ解析準備は、Gaiaのデータ解析チームと共同で開発

2-2 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

-
- ・維持・管理を継続中
 - ・地上局の整備、試験も継続中



2-3 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 : 当初は、2011年8月に打ち上げ予定

(予算不足による射場の建設遅れで、3度も打ち上げ延期)

=>そしてウクライナ政治情勢の不安定化(2014年2月)、ブラジル政府の経済問題によりACS社が倒産準備。

=>(1)Gaiaチームの支援によりESAによる打ち上げを調整中:

* 当初は、2017年末～2018年初めにピギーバックで打ち上げ予定であったが、ESAの事情で変更となり、現在、打ち上げ機会の再度の検討となっている。

(2)イギリスの小型ロケット会社による打ち上げにむけて交渉、調整を開始。

好条件で打ち上げられる可能性あり。

(3)ウクライナのユジノエ社のロケットがカナダの射場から打ち上げられる協定が締結。
ユジノエ社との交渉を開始。

2-4. GaiaチームとJASMINEチーム、日本との協力関係

★GaiaチームとのNano-JASMINEのデータ解析に関する協力

- * 2007年10月から開始。ヒッパルコス衛星及びGaiaのリーダー(当時)だったM.Perryman氏から提案。NJの生データを用いてGaiaのソフトの確認が当初の目的
- * 2008年のMOUを締結。

○Gaiaチームが構築した開発環境中で、Nano-JASMINEのソフト開発を実施

○逆にNano-JASMINEメンバーの一部はCU3 collaboratorとして

登録されている

山田(京大)、吉岡(海洋大)、郷田、矢野、穂積(滋賀大)、
五十里、酒匂(東大)

Gaiaのメンバー専用リソースのほとんどにアクセス出来る。

Industry restriction (企業の作成したドキュメントは見られない)

○Gaiaのコアデータ解析の会合には、

山田氏(京大)が2011年春以来ほぼ毎回出席

西氏(新潟大)が、アーカイブの会議に出席

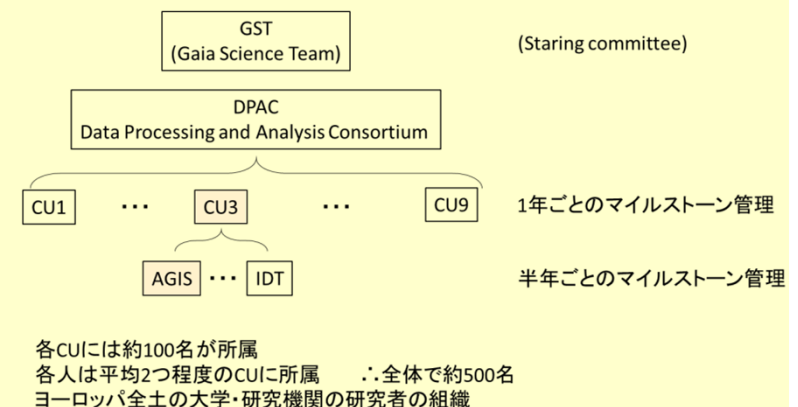
○GENIUS (EU-FP7予算:2013/10～2017/3)

のfull partner: Gaiaデータのvalidation、データ公開、NJデータとのマージング

* ヨーロッパ12機関+京大(山田氏が日本側代表)

○Gaiaチームは、ESAによるNano-JASMINEの打ち上げを支援

Gaiaの開発体制の紹介(組織)



3. 小型JASMINE計画の概要

- * **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。

らせん運動

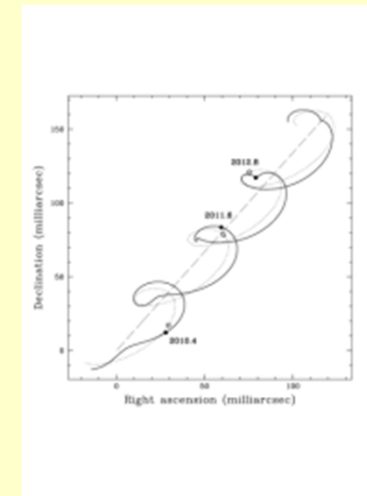
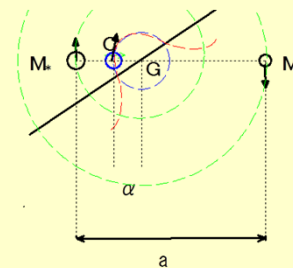
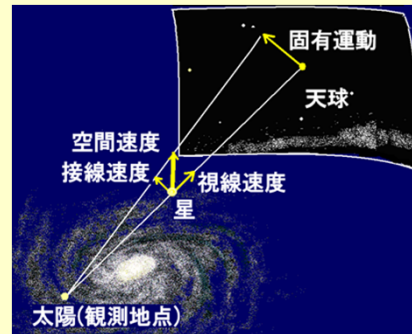
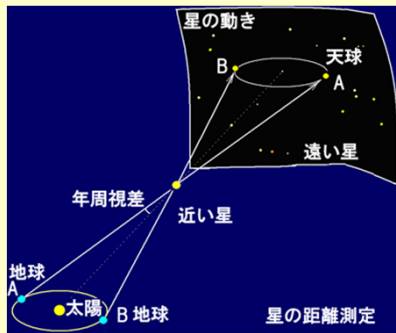
* 年周楕円運動+固有運動(直線運動)=らせん運動

星までの距離

星の接線速度

- * 星によって、らせん運動からの“ずれ”がある

惑星系、連星系、
重力レンズ効果など



★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。

=> 1. 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
- バルジの星で年周視差精度が $20\mu\text{秒角}$ よりよい星の数(SJの観測領域内):

Gaia: ~80個、SJ: ~8600個

2. 短周期変動する天体現象(短周期の連星系、

マイクロレンズ、系外惑星系など

同一天体の観測頻度は、Gaiaは年に8回程度、SJは、100分程度に1回

小型JASMINE

★ミッション要求(科学的主目的から導かれるもの)

○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(~20 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(星の個数は、バルジ、ディスクすべてで約22,000個)

*領域1=> **要求は3500個程度以上のバルジ星(見込みは4900個程度)、**

*領域2=> **要求は2000個以上のバルジ星(見込みは5000個程度)**

#観測される手前のディスク星の個数: 領域1=>3500個程度、領域2=>1600個程度
(測光精度は相対精度で<0.01mag程度の見込み)

* 観測領域1, 2に対するミッション要求は、後述する科学目的(1)、(2)から直結する。

○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。

* 副次的目的

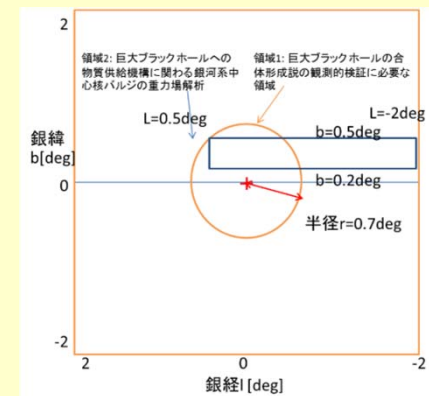
○サーベイ領域:

公募(共同利用)サーベイ=> 審査の上決定: 特定の対象天体 夏と冬に観測

○観測精度(目標):

副次目的(公募サーベイ)=> **特定天体方向(候補天体例: Cyg X-1)**

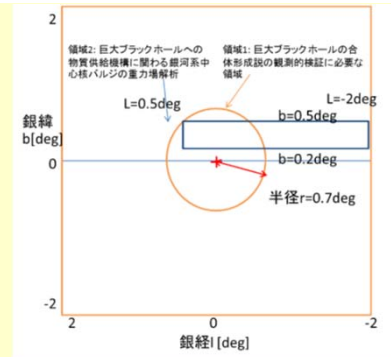
* 精度は、各々の対象天体に対する科学目的による(10 μ asクラスは達成見込み)



★科学目的

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

銀河系は、巨大ブラックホールの形成や銀河の力学構造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

★その他の具体的な科学目的の例

I. 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) 中心核バルジ内の未知な星団の検知 (= > 星形成率に波及)

(3) 中心核バルジ内での高速度星(HVS)の発見 => HVSとS-starsの起源解明

* 連星 + SgA *

(4) バルジ内の共生星X線連星やX線点源の解明

or 単独星 + IMBH-SgA * 連星

(5) 星間吸収物質の3次元分布

(6) 中心付近の変光星の物理的解明

(7) 未発見のBH検出

(i) BH-恒星の連星系の発見 → 軌道要素の解析が可能

(ii) 位置天文学的重力レンズ効果

* 参照: 太陽系外の星による位置天文学的マイクロレンズの
初検出! (HST: Sahu, et al. 2017)

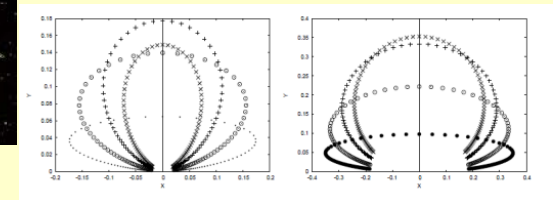
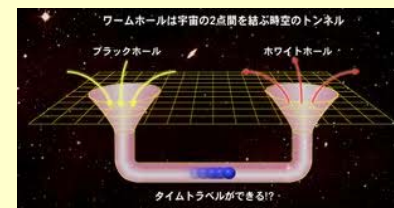
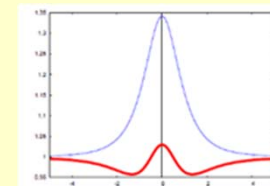
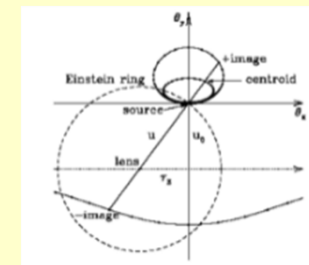
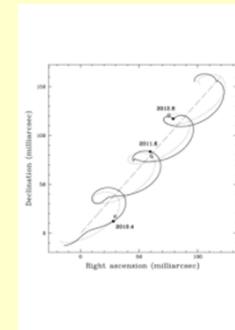
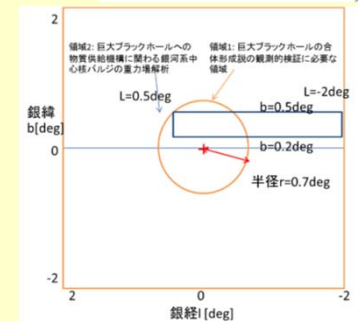
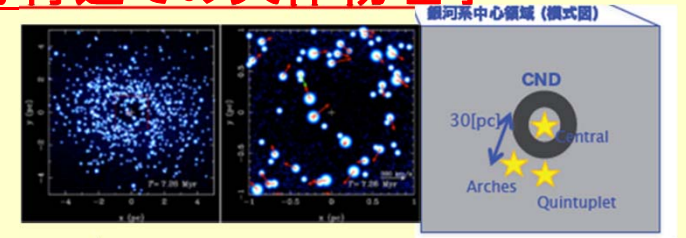
=> 白色矮星Stein2051Bの質量が決定!! (100年近く of 論争が決着)

(8) 重力レンズ効果による系外惑星検出

(9) 重力レンズ効果による未知天体の発見

ワームホールの発見?!

(10) 距離の関数としての偏光の導出(=>銀河系磁場構造)



II. 銀河系中心方向以外(夏と冬の期間:公募観測)

銀河系内天体で、**短時間変動現象を伴い近赤外線です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

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

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

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

○位置天文学的マイクロレンズ効果を用いた野良ブラックホールの質量確定

(野良ブラックホールが飛び込んだと思われる巨大分子雲の情報からレンズ効果を予測)

○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。

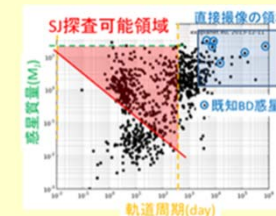
褐色矮星まわりの惑星発見。

○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



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

★ 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

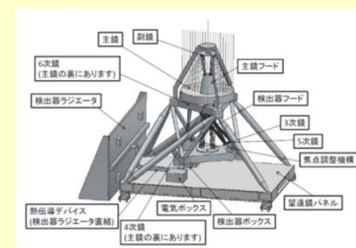
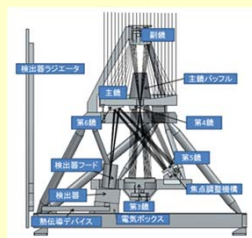
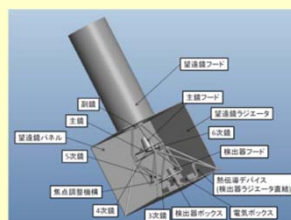
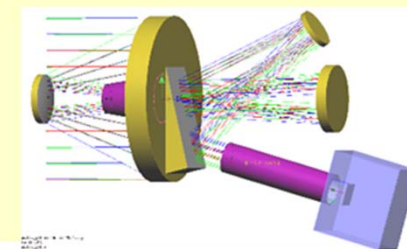
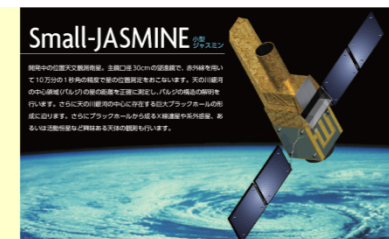
視野面積: 0.6度 × 0.6度

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)



○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)

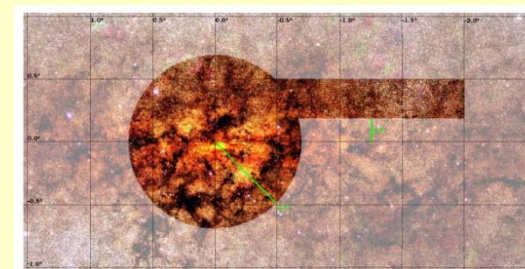
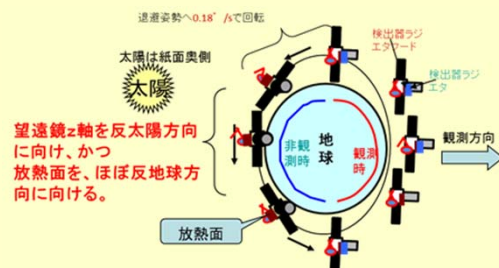
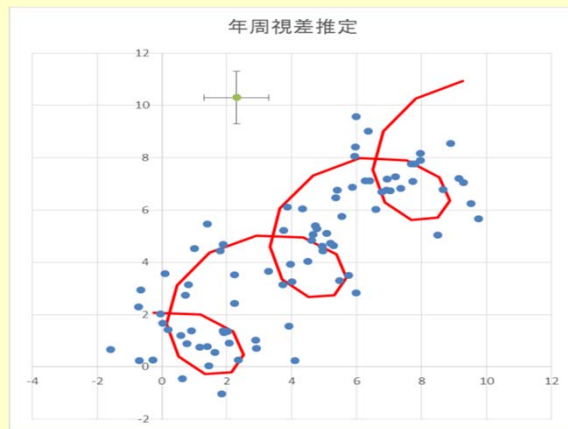


Figure 1: The two Small-JASMINE target regions near the Galactic centre: a centred circular target with a radius of 0.7° and a rectangular off-centre target with 0.3° × 2.5°. Coloured 2MASS image.

★データ解析

星の天球上での運動： らせん運動（年周楕円運動＋直線運動（固有運動））

星の天球上での位置の時系列データから、年周楕円運動の長半径（年周視差）を推定。
小型JASMINEのミッション要求⇒年周視差の精度が20マイクロ秒角程度以内



小型JASMINEの場合

- 同じ星に対して約15～60万回の測定
- 1回撮像精度（～4ミリ秒角）の200倍程度の高精度（20マイクロ秒角）での年周視差推定

多数回撮像：同じ星や同じ星同士のペアが検出器上の異なった場所で撮像される。



統計誤差（ランダム成分）： $1/\sqrt{N}$ 則で減少

系統誤差⇒“推定”：モデル化（ある関数形でfit）と

推定残差（測定値と最適なモデル値との差：無相関）の減少（ $1/\sqrt{N}$ 則）。

モデル化残差（系統誤差）が残っていれば、それを検知し、モデルの改良

星の相対位置関係とその運動について制限を課すことにより、推定（モデル化）可能：

年周期運動と直線運動以外の変動は、系統誤差成分

* 但し、星の運動と縮退する系統誤差成分は、星の運動が既知の観測データを用いて校正

○モデル化の具体例：多項式（主に光学歪みなどの大域的歪み）、フーリエ級数、ベイズ型スプライン回帰法

* ただし、系統誤差をover fittingしないように赤池情報量基準を適用するモデル関数の妥当性の判断に用いる。

★ 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

熱歪検証モデル： 特殊鋼メーカー2社に依頼し、極低熱膨張の超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 $0 \pm 5 \times 10^{-8}/K$ の超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。

(2) 熱環境

小型JASMINEでは、常温の望遠鏡に極低温(170K)の赤外線検出器を振動無く設置する必要がある。そのために、堅牢で断熱された検出器BOXを開発した。

(3) 光学系要素技術(迷光対策など)

植毛サンプルの散乱強度分布実測、CNTの特性測定など

(4) 赤外線検出器(H4RG)

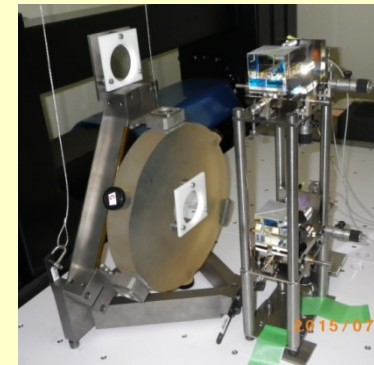
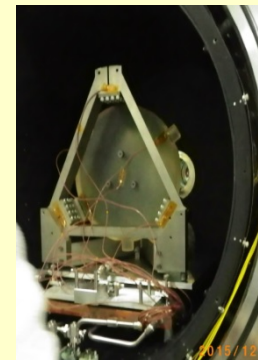
放射線による感度の時間変動や障害の検討とその対策

(5) 電気系

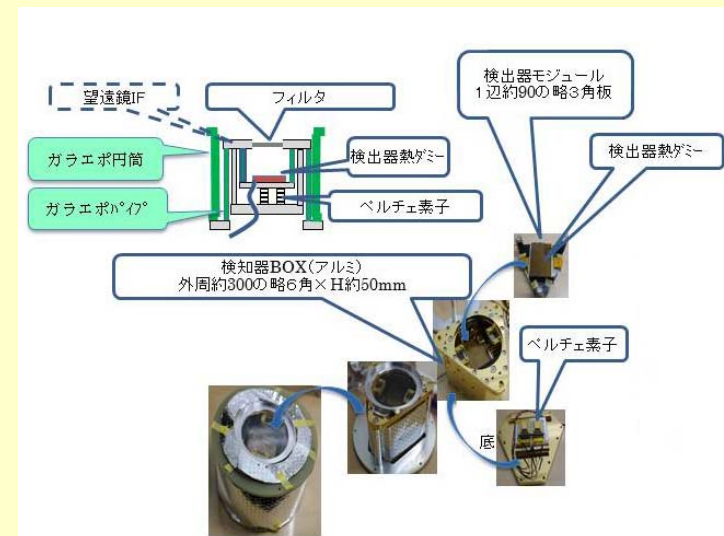
電気コンポーネントについての候補機種調査など

(6) システム検討

衛星全般の質量・電気等のリソース配分、通信の成立性、姿勢運用等全般にわたり行い、より精査が必要な部分を洗い出した。また、試験検証計画を精査し、開発スケジュールをバス・ミッション間で整合させ、リスクの洗い出しを行ってきている。



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



★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

○2016年2月～3月:MDR(ミッション定義審査)相当の審議
*ヒアリング審査4回(7時間半程度)

○2016年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。

→1, 2とも宇宙研のサポートを得て、検討を行った。

2017年3月下旬、事前審査→パス(本審査を受けてよい)

4月初旬に Δ MDR→パス(評価委員会から理学委員会へPhase A1(宇宙研の
プリプロジェクト)へ進めることを推薦)

5月:理学委員会でパス(理学委員会から宇宙研へPhase A1へ進める
ことを推薦) *主にPhase A1で行うべきいくつかの課題付き。

○2017年6月：宇宙研所長より、Phase A1に進める前に通常の計画審査を実施。先ず、高度な専門性を要するため、国際審査を計画審査の一環として8月末頃に行う。国際審査の目的は、Phase A1での課題と優先度を明確にすること。

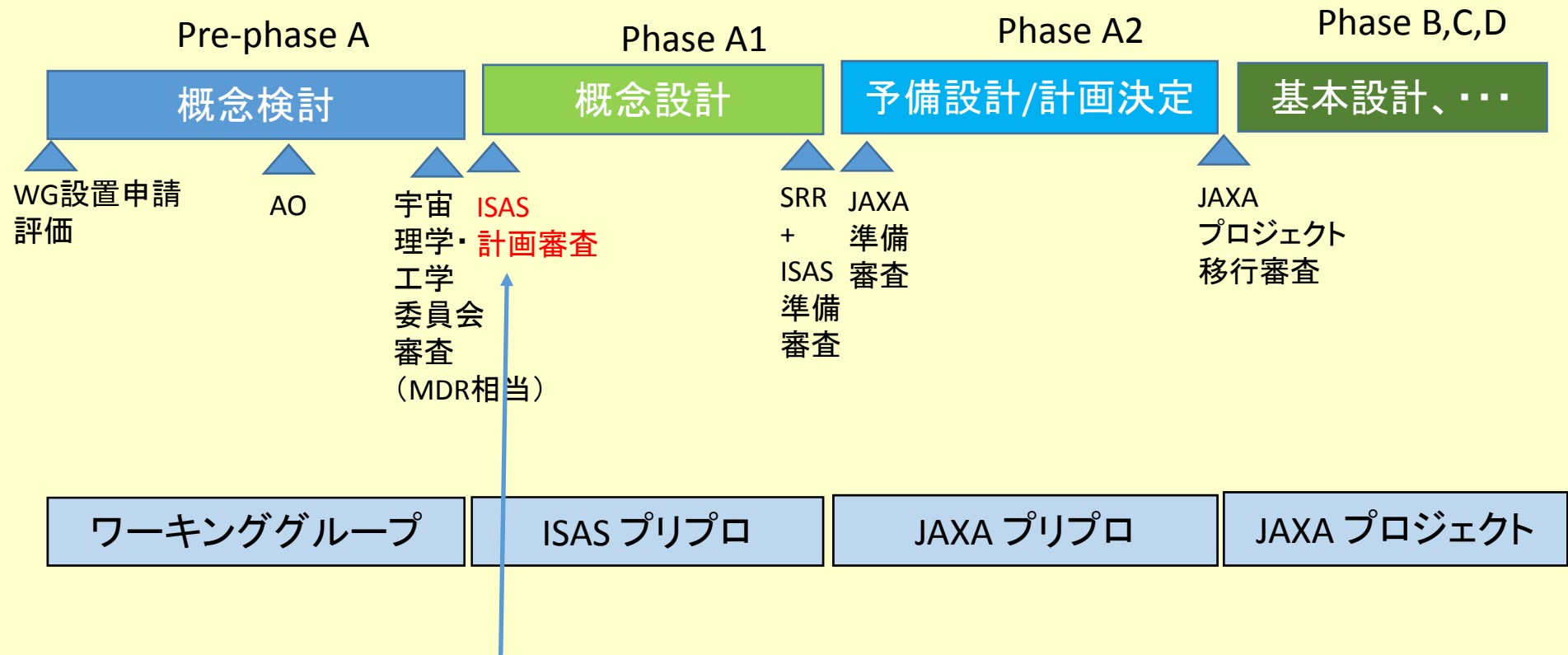
* Phase A1で想定されるいくつかの課題：

- コミュニティとの議論によるサイエンスの拡大
- 技術実証（特に、赤外線検出器、熱構造安定性等）
- データ解析による精度達成検証の詳細精密化



国際審査や計画審査では、具体的課題に対して、Phase A1での検討計画、開発計画、体制などが問われる。

★審査段階(従来の方法)



- * 小型JASMINEは、まもなくこのISAS計画審査。
- * その分科会として、先ずは国際審査。その後、本審査。

★小型JASMINEに対する国際協力

(1) 世界的なユニーク性と海外からの推薦、参加表明

- *IAU Commission A1のpresidentから正式な推薦

- *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。

(2) Gaiaとの密な協力体制

Gaia-JASMINE joint meetingの公開開催(2016.12.6～9)@国立天文台三鷹キャンパス

- * Gaia の概要、状況、DR1(第1回中間リリースデータ)の説明、DR1を使ったサイエンス
- * JASMINEの概要、状況
- * お互いのデータ解析、validation方法、アーカイブについての意見交換、協力など
- * 電波位置天文と光赤外位置天文との協力
- * Post-Gaiaといった将来計画

(3) 将来の国際的な計画への橋渡し

- *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)やGaiaNIR(近赤外線衛星、打上目標～2035:ESAへ申請予定)などのPost-Gaia候補との協力

- *Theiaとはサイエンスとデータ解析に関する協力でMOUを締結予定。

- * GaiaNIRの計画提案メンバーとして協力。小型JASMINEが先駆けとなりうる。

(4) 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。

(5)WFIRSTによるMicrolensingサーベイとの協力

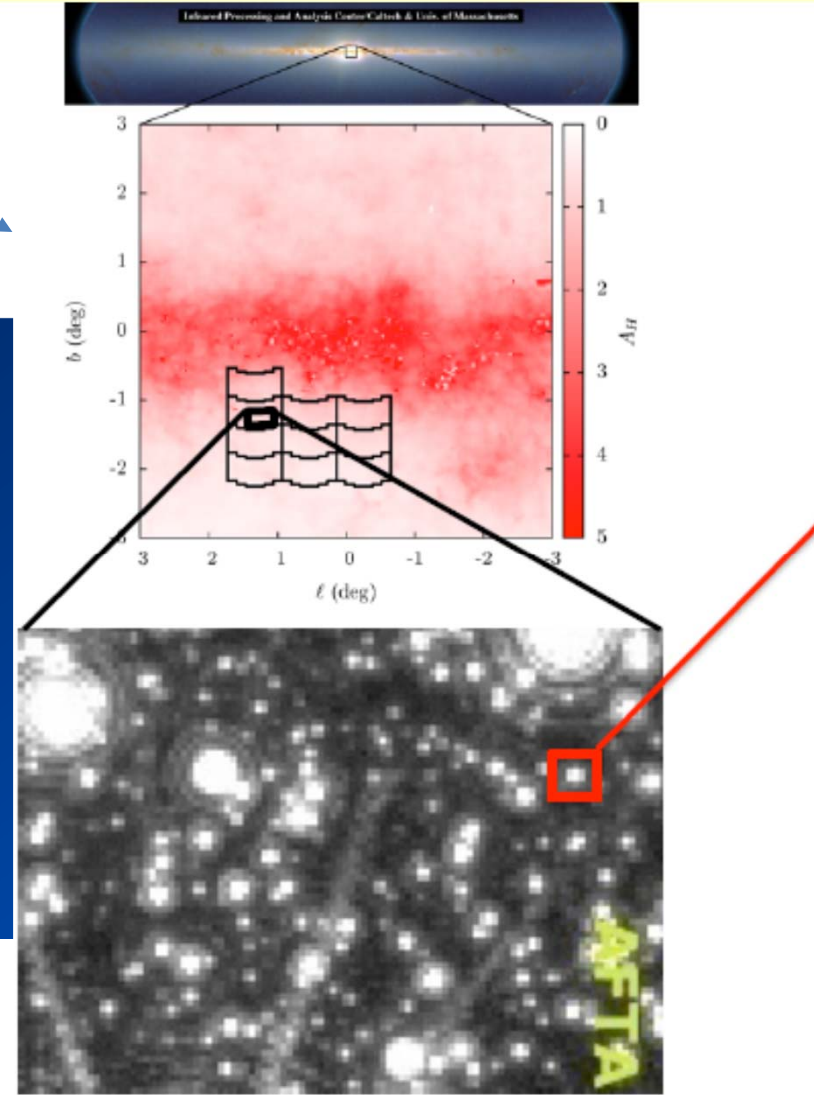
Microlensing Fields

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



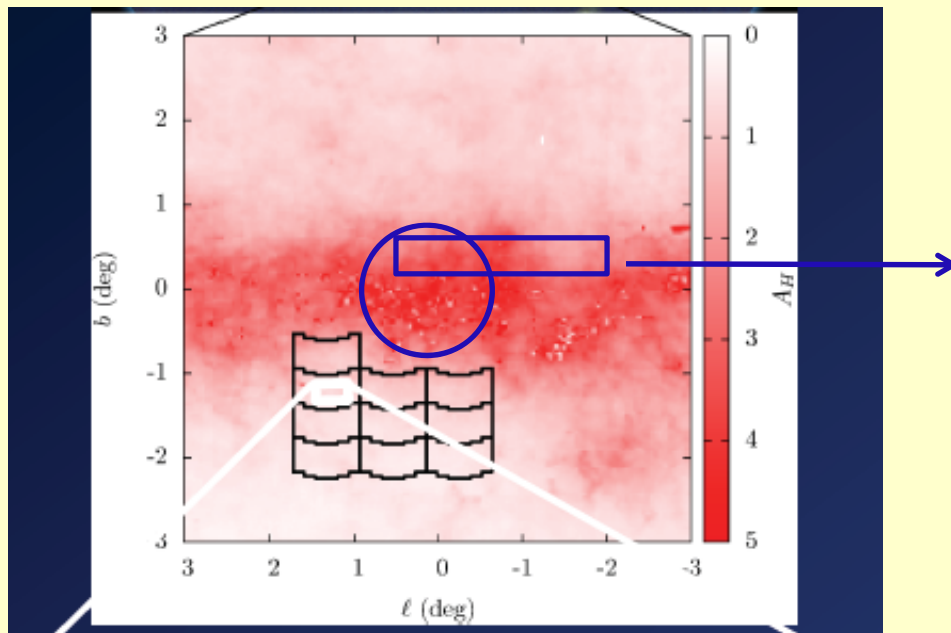
Synergy with WFIRST

If $10\ \mu\text{as}$ –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

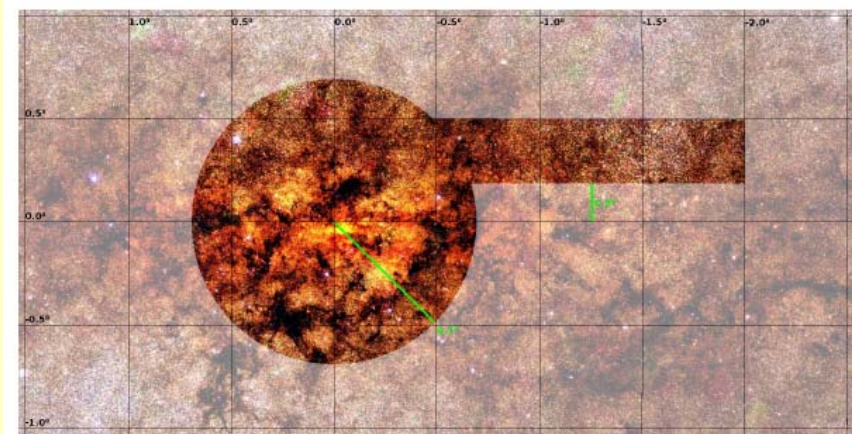


Figure 1: The two Small-JASMINE target regions near the Galactic centre: a centred circular target with a radius of 0.7° and a rectangular off-centre target with $0.3^\circ \times 2.5^\circ$. Coloured 2MASS image.

今後もよろしく御願ひします

Jasmine

