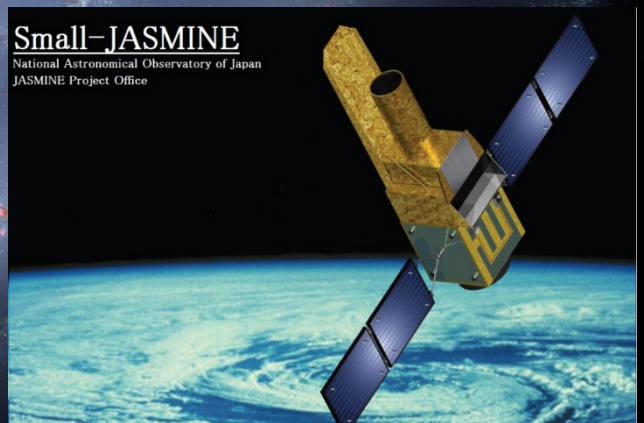
2019.5.23

小型JASMINE
（赤外線位置天文観測衛星）

JASMINE : Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration

JASMINEチーム



★小型JASMINE計画

➔赤外線位置天文観測衛星計画

◎JAXA宇宙研の公募型小型計画宇宙科学ミッション（イプシロンロケットでの打ち上げ）での実現を目指している。

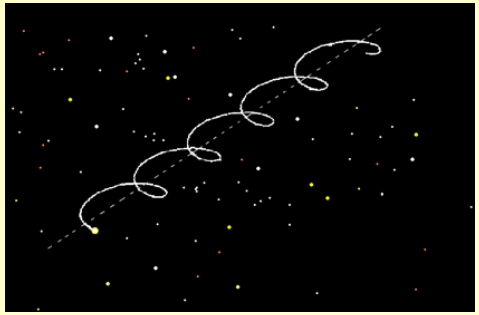
◎2019年5月、JAXA宇宙研により公募型小型3号機（打ち上げ目標は2024年度頃）に選定された。

小型JASMINEは何を観測するのか？~位置天文観測~

★位置天文観測とは

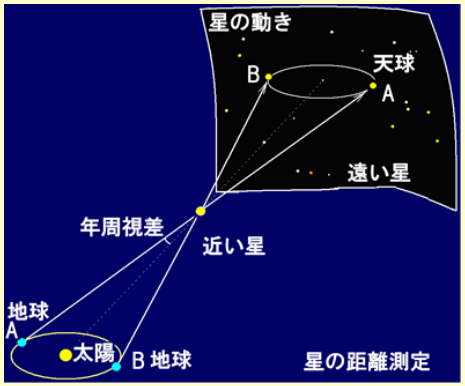
＊星の撮像観測を行い、その観測で得た天体の天球面上での位置の時間変動（時系列データ）とそこから導かれる年周視差と固有運動等の位置天文パラメータを供出する。

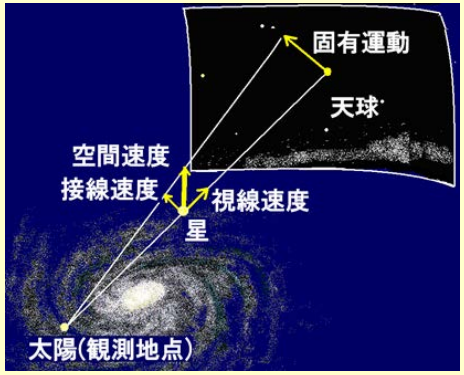
＊年周楕円運動＋固有運動（直線運動）＝らせん運動 ⟶ らせん運動



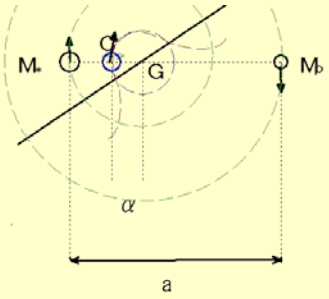
星までの距離

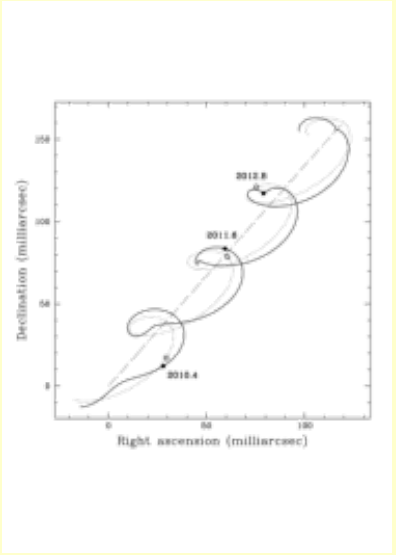
星の接線速度





＊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

➡ これらの天体の物理情報
が得られる

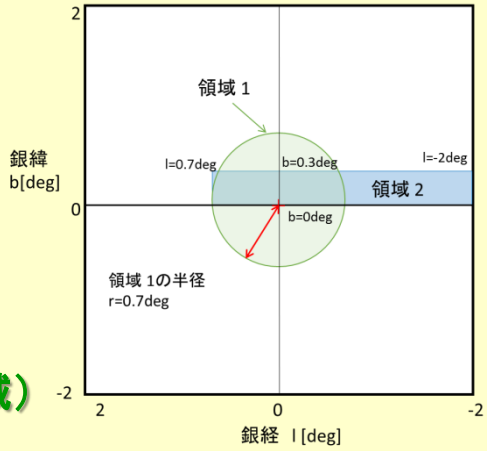
★小型JASMINEのミッション概要

＊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(同じ星に対して約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
世界同時公開(キープロジェクトに関して)。

○銀河系中心核バルジ領域に対して、67000個のバルジの星および31000個のディスクの星を測定(Hw<15等級)

○サーベイ領域:

Hw=0.7J+0.3H



プロジェクトサーベイ: 銀河系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**(中心から100pc程度の領域)**

*領域2＝＞銀経－2 度～0.7、銀緯0.0度～0.3度の範囲の領域

(400pc×45pcのディスク領域)

○観測精度(目標)、等級、個数:

年周視差精度:25μ秒角程度以下
固有運動精度:25μ秒角/年程度以下 ⟺ **Hw<~12.5等級**

⟺ **観測個数の見込み(全観測領域)**
7000個程度のバルジ星

*領域1:**5000個程度のバルジ星**
*領域2:**3000個程度のバルジ星**

＃観測される手前のディスク星の個数:領域1＝＞4000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)

固有運動精度: ～125μ秒角/年 程度以下
(25μ秒角/年 程度以上) ⟺ **~12.5等級<Hw<~15等級**

⟺ **観測個数の見込み(全観測領域)**
60000個程度のバルジ星

*領域1:**45000個程度のバルジ星**
*領域2: **26000個程度のバルジ星**

＃観測される手前のディスク星の個数:領域1＝＞21000個程度、領域2＝＞9500個程度

★小型JASMINEのミッションの意義と科学目標

ミッションの意義(Science goals of the mission)

銀河系探求を通じての銀河の形成と進化の解明

我々の銀河系（天の川銀河）は、我々自身が居住するという意味で特別な存在。
また、銀河としては最も身近な天体。
しかし、その物理的特徴や起源については、未だ解明されていない謎も多い。
Gaiaの結果によって、さらに謎が深まっている（より複雑な構造）

↓

一方、個々の星に分解できて、星の分布・運動を精密かつ詳細に明らかにできる唯一の銀河。
＝＝＞その代表的なものとして、個々の恒星までの距離（年周視差）や接線速度（固有運動）の精密測定（10μ秒角オーダー）は、現在の技術では、銀河系内の星にしか適応できない。

↓

銀河系に対しては、他の銀河には適用できない手法を用いることも可能であり、
非常に良い”実験場”となる。

↓

銀河系に関する知見を増やし、系外銀河も含めた銀河の形成・進化の解明に発展させるのが、
小型JASMINEのミッション意義(Science Goals of the mission)である。

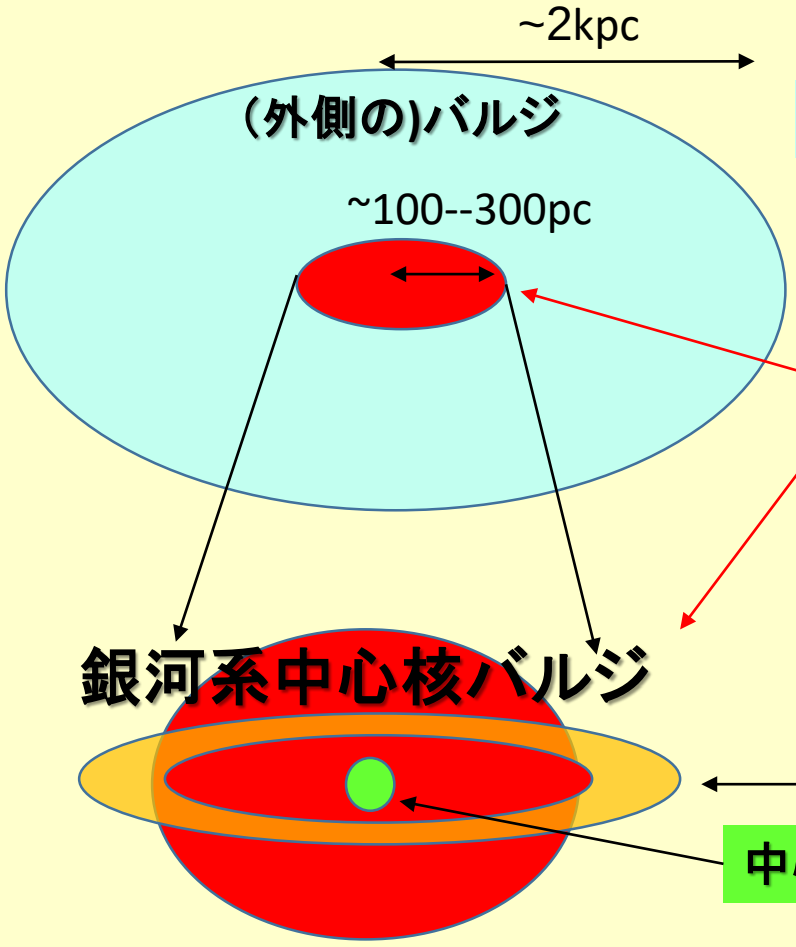
具体的には、小型JASMINEは、特に可視光では観測困難であり未解明なことが多い、中心核バルジに注目。

★小型JASMINEは中心核バルジに注目！

◎中心核バルジ：母銀河と銀河系中心との物理的関係をつなぐ重要な領域(半径~100pc-300pc程度）

*：数十マイクロ秒角以下の高精度測定を行う位置天文ミッション ＋ 分光観測（視線速度）

固有運動＝＞接線速度
年周視差＝＞距離



外側のバルジ ← Gaia*(可視光観測),
(WFIRST*の一部観測)
BRAVA, etc(視線速度測定、年齢、星のタイプ等）

銀河系中心核バルジ ← 小型JASMINE*,
地上観測（分光、測光）:
APOGEE2, MOONS,MWM,
VVV,GALACTICNUCLEUS,etc.
=>視線速度、年齢、
星のタイプ等）

世界でユニークなミッション！

中心近傍領域(<10pc) ← GRAVITY*(VLTI), TMT etc.
(視野が狭い)、
APOGEE, GALACTICNUCLEUS,
etc.

中心核バルジ:外側のバルジとは異なる様相。
未解明の天体や天体現象の宝庫を探査。
＝＞バルジやバー構造の解明のためにも中心核バルジをおさえる必要性有り

小型JASMINEの科学目標

～5次元天文データによる銀河系と巨大ブラックホールの進化を結びつける銀河系中心核の解明～

「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を科学目的とする。そのため、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」

小目標

(1)バー･バルジ構造の解明につながる中心核バルジ内のディスク構造の解明：ミラ型変光星をトレーサーとした、中心核ディスク（または内部バー）の存在の検証とその軌道構造および形成時期の解明

→ 外側のバーの形成時期解明への波及
系外銀河のdisk-like bulgeに相当？

(2) 巨大BHの進化と銀河系中心の活動の解明につながる重力場の解明：
中心核バルジでの重力ポテンシャル、特に、回転する棒状(扁平なディスク形状も含む)ポテンシャルの存在の検証とその回転速度（中心核ディスクまたは内部バーの形状（パターン）の回転速度に対応）や傾度、扁平度などの物理的特徴の解明

→ 中心領域へのガスの輸送機構の解明へ
→ 巨大BHの進化、中心領域での活動性

(3)星の位相分布関数を用いた、中心核ディスク（または内部バー）周りの拡がった空間の力学構造とその起源の解明

→ もし“緩和状態”➔複数の巨大BHの落下の可能性
そうでない場合➔現在の構造が形成した時の情報(classical bulge?)

図1

小型JASMINEの科学目標

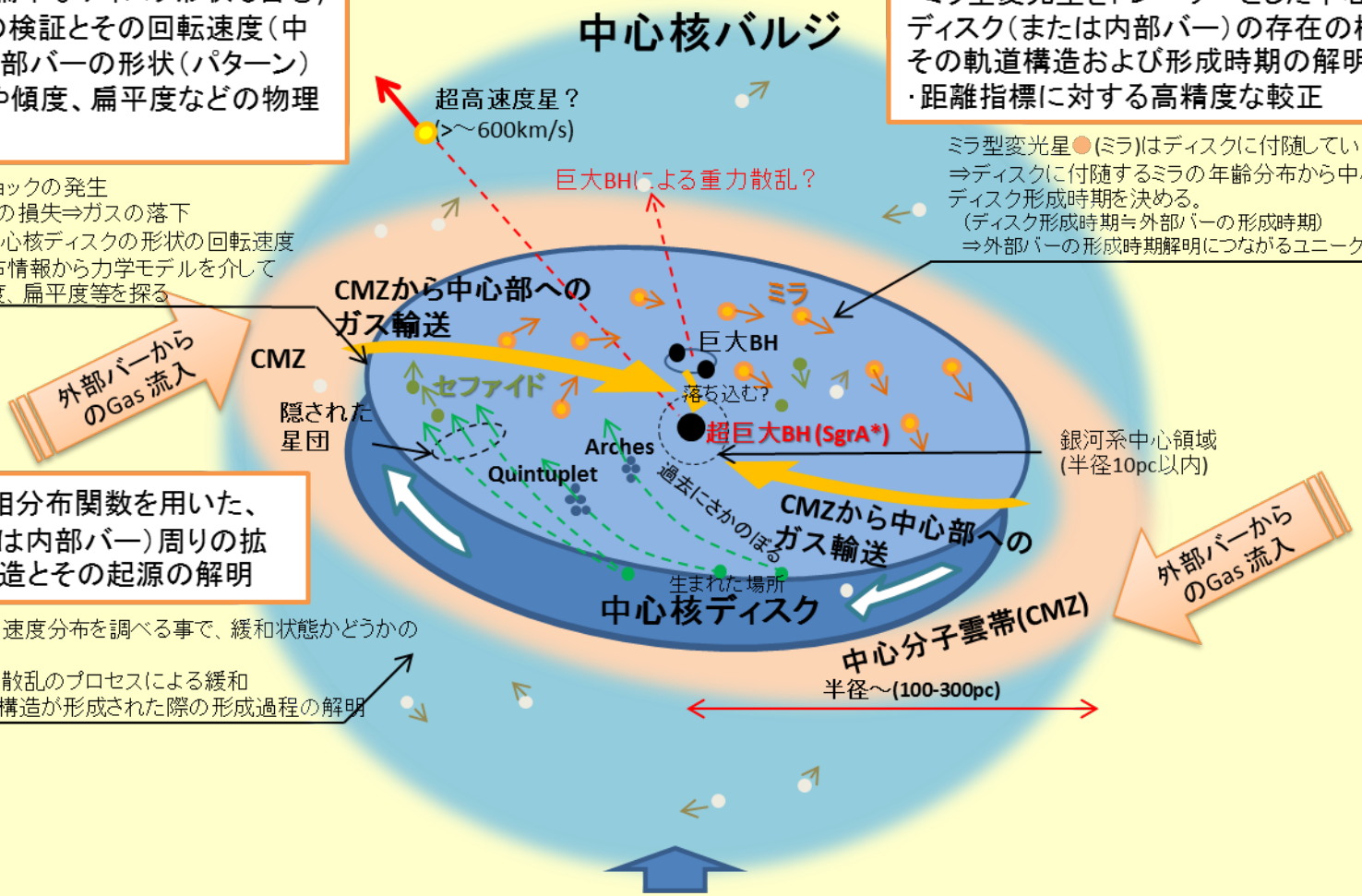
―中心核バルジで、小型JASMINEが世界で初めて解明する研究課題―

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(扁平なディスク形状も含む)ポテンシャルの存在の検証とその回転速度(中心核ディスクまたは内部バーの形状(パターン)の回転速度に対応)や傾度、扁平度などの物理的特徴の解明

ガス同士の衝突によるショックの発生
⇒角運動量、エネルギーの損失⇒ガスの落下
ショックの起きやすさ⇒中心核ディスクの形状の回転速度等に依存⇒星の位相分布情報から力学モデルを介してディスクの回転速度、傾度、扁平度等を探る

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(または内部バー)の存在の検証とその軌道構造および形成時期の解明
・距離指標に対する高精度な較正

ミラ型変光星●(ミラ)はディスクに付随しているか？
⇒ディスクに付随するミラの年齢分布から中心核ディスク形成時期を決める。
(ディスク形成時期≒外部バーの形成時期)
⇒外部バーの形成時期解明につながるユニークな方法



小目標(3): 星の位相分布関数を用いた、中心核ディスク(または内部バー)周りの拡がった空間の力学構造とその起源の解明

中心核バルジの密度分布や速度分布を調べる事で、緩和状態かどうかの検証
⇒複数の巨大BHによる重力散乱のプロセスによる緩和
(超巨大BHの進化)または構造が形成された際の形成過程の解明

その他* 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
⇒なぜ星団があるのか
+定常的な進化の実証:
現在から10億年以内のタイムスパンにわたる星の形成史に迫る。

Arches, Quintupletの星の位置運動情報から星団の誕生した領域を探る。

セファイド変光星は中心核ディスクに付随しているか？
＝＞中心核ディスクの軌道構造

超高速度星はどうしてあるのか?
星の運動情報を調べ過去にさかのぼる事で、銀河系中心の超巨大BHによる散乱が原因かを解明。

多様な天体の探求:
重力レンズ天体、コンパクト天体、恒星物理、星間物質

★主な科学目標

小型JASMINEが、他のミッションに比べて威力を発揮できる

(A)銀河系中心核バルジの力学的構造の探求と起源の解明

中心核バルジのグローバルな力学構造は、どうなっているのか？
複雑？

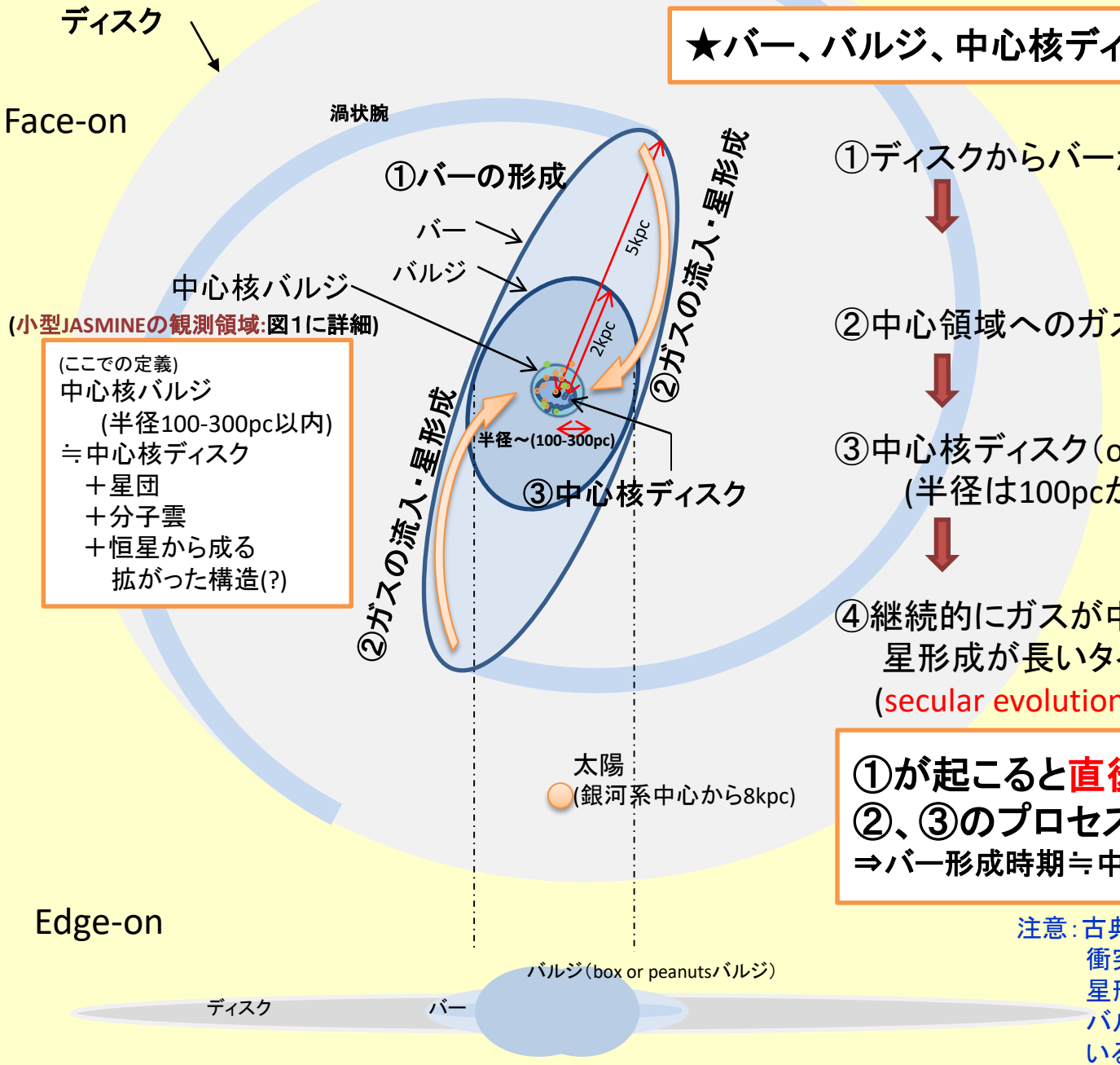
(1)ミラ型変光星をトレーサーとした、 中心核ディスク(または内部バー)の存在の検証とその軌道構造および形成時期の解明

中心核ディスク➔
系外銀河のdisk-like bulgeに相当するかもしれない

＊中心核ディスクないしは内部バーの存在の検証
　＜＝固有運動情報による判断。
＊中心核ディスクに属する一番古い星の年齢
　＝＞中心核ディスクないしは内部バーの形成時期の推定
　＝＞外側のバー構造やバルジの形成時期の推定(ユニークな方法かも)

○固有運動情報をもとにディスクに属すると同定されたミラ型変光星の周期一年齢関係、and/or ディスクに属すると同定した恒星の分光観測、多色測光観測のデータ＝＞年齢
➔中心核ディスク(または内部バー)の形成時期決定
➔外部バーの形成時期の決定(ユニークな方法かも)

図2　銀河系の構造（ディスク、バルジ、バー、中心核バルジ）



(ここでの定義)
中心核バルジ
(半径100-300pc以内)
≒中心核ディスク
＋星団
＋分子雲
＋恒星から成る
拡がった構造(?)

★バー、バルジ、中心核ディスクの形成シナリオ(通説)

①ディスクからバーが形成

②'バルジの形成
(buckling instability)

②中心領域へのガスの流入・星団や星の形成

③中心核ディスク（or内部バー）の形成
(半径は100pcから300pc程度)

④継続的にガスが中心核ディスクに流入し
星形成が長いタイムスパンにわたって起こる
(secular evolution (定常的な進化）シナリオ)?

①が起こると直後に
②、③のプロセスが進む。
⇒バー形成時期≒中心核ディスクの形成時期

注意：古典的バルジ成分（銀河同士の衝突合体などを起因とし、集中的な星形成やガス降着等により発達したバルジ）が初期に形成され、残っている可能性もあり。

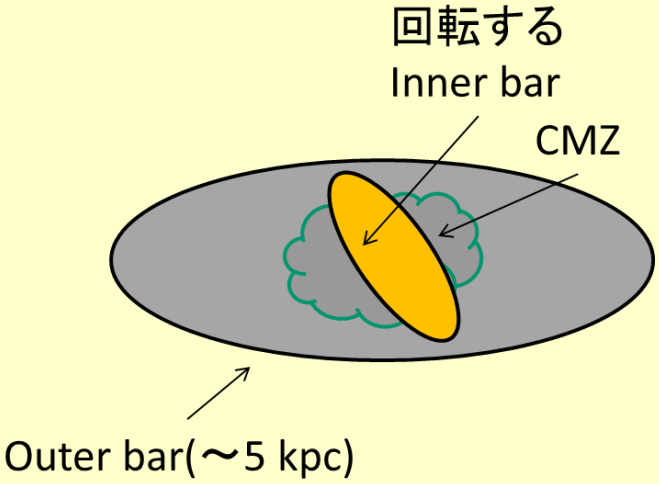
(2) 中心核バルジでの重力ポテンシャル、特に、回転する棒状(扁平なディスク形状も含む)ポテンシャルの存在の検証とその回転速度（中心核ディスクまたは内部バーの形状（パターン）の回転速度に対応）や傾度、扁平度などの物理的特徴の解明

＊中心へのガスの供給機構（角運動量損失）の明確化
➔（速く）回転する棒状構造(扁平な中心核ディスクまたは内部バー）が存在するか？
＊重力ポテンシャルの回転角速度等を星の位相分布関数から力学的モデルとの比較により明らかにする。
＊もし、分光観測など何らかの方法で星の年齢が評価できれば、その情報と合わせて ミラ型変光星を用いた解析結果を補完し、非軸対称構造の存在の検証やその形成時期を多数のサンプル数が追加されることにより統計的にも有意な情報として得る。

中心核バルジでの棒状構造の存在の検証やその形状の回転速度などの物理的特徴
＝＞巨大ブラックホールの質量（の進化）を決めるパラメータになっている可能性もある。

*回転速度などの物理的特徴=>巨大ブラックホールへのガスの供給、つまり巨大ブラックホールの質量の増加に関わる可能性
*一方、巨大ブラックホールから恒星への力学的影響（2体散乱による恒星軌道のカオス化）による中心核ディスクの“破壊”効果が巨大ブラックホールへのガスの供給を止めるメカニズムになっている可能性もある。

＝＞銀河系のような疑似バルジ的要素が強い他の系外銀河のバルジと巨大ブラックホールの相関を考える上で貴重な情報を提供。

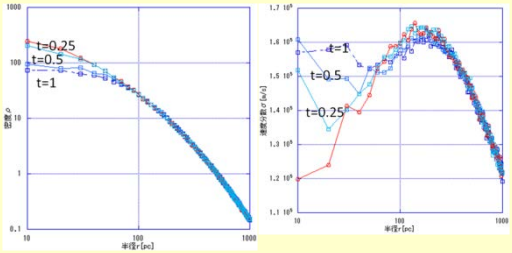


(3)星の位相分布関数を用いた、中心核ディスク(または内部バー)周りの拡がった空間の力学構造とその起源の解明

＊中心核バルジの(中心核ディスクを取り囲む拡がった領域での)比較的古い星々が、なんらかの天体による重力散乱効果を通じて“加熱”され、星の密度や速度分散の空間分布が緩和状態の分布になっているかどうかを判断する。

ここで“加熱”とは、重力散乱により、ある天体の重力エネルギーが、周りの星の運動エネルギーへ転換し、周りの星の運動エネルギーが増加することを意味する。

緩和状態:100pc程度まで緩和している星々があると、その密度分布と速度分散分布は、モデルの詳細(初期条件や加熱する天体の質量分布等)に依存せずに特有な関数になる(密度はコア構造、速度分散は平坦なプロフィール)



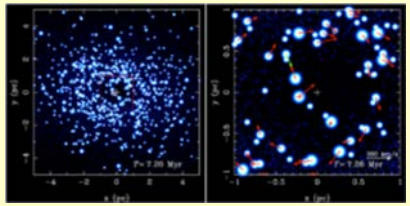
＊観測の結果、もしも緩和された状態でない場合
＝＞観測された密度や速度分散の分布の形状から、中心核ディスクを取り囲む拡がった領域での力学構造(classical bulge成分である可能性もある)が形成された際の形成過程に対する制限を与えることが可能。

＊一方、観測の結果、もし100pc程度まで、力学的に”加熱“された緩和分布になっている場合
＝＞緩和の原因探求が興味深い。

宇宙年齢以内にこのような緩和状態を100pc程度以内で構築されている
＝＞ 恒星系への膨大なエネルギー供給による“加熱”(重力散乱による、重力エネルギーから運動エネルギーへの転換)が必要。
＝＞複数の中間質量ブラックホール(ただし、1個の ブラックホールの質量は約10万倍太陽質量以上である必要があり、そのようなブラックホールは 巨大ブラックホールと呼んでもふさわしい)が中心に落ち込む際の力学的摩擦、およびそれに伴う、中心付近で巨大ブラックホール同士が近づき、束縛系となった際のその束縛エネルギーの恒星系へのエネルギー解放以外は考えにくい。(球状星団や巨大分子雲ではエネルギー解放が不十分)

＝＝＞中心部分の(超)巨大ブラックホール(太陽質量の約400万倍)であるSgrA*の形成進化に大きな制限を与える可能性がある。

(B)銀河系中心核バルジの物理的特徴や多様な天体の探求



(1)中心付近の星団の運動➔星団の起源

＊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

(2) 中心核バルジ内の未知な星団の検知

＊固有運動情報をもとにした(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➔secular evolution(定常的な進化）の実証

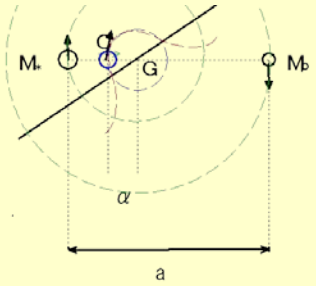
(3)中心核バルジ内での高速度星(HVS)の発見＝＞HVSとS-starsの起源解明

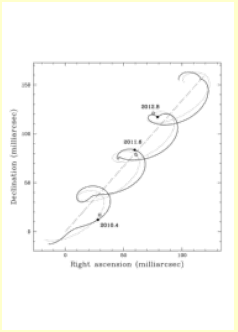
＊連星＋SgA*
or 単独星＋IMBH-SgA*連星

(4)バルジ内の共生星X線連星やX線点源の解明

(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



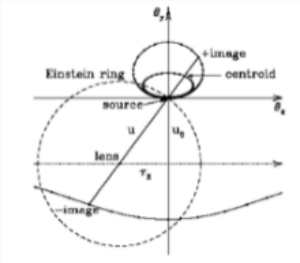


(7)未発見のBH検出

(i) BH一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➔ ～30太陽質量BHの起源への制限？

中間質量BHの検出？



(8)重力レンズ効果による系外惑星検出

＊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)

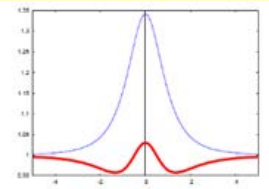
=>白色矮星Stein2051Bの質量が決定！！

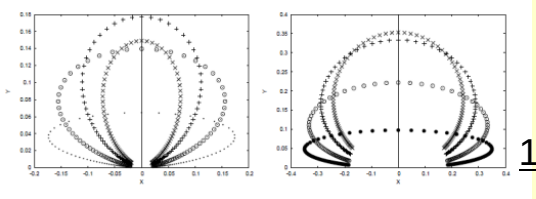
(100年近くの論争が決着)

(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)

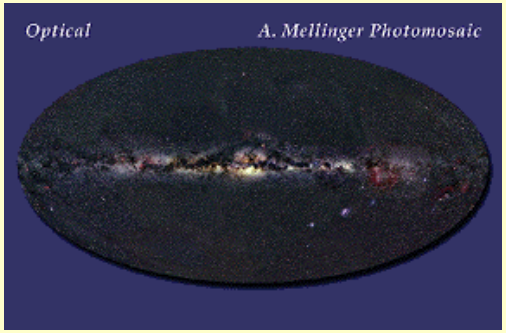


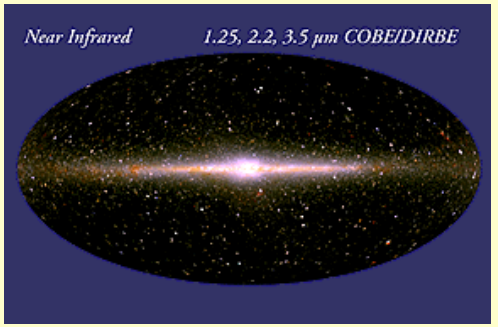


小型JASMINEの特徴、ユニークさ

我々の銀河系の中心核バルジの多数の星の詳細な運動の性質を近赤外線を用いた位置天文の手法により精密に観測できる、これまでで、はじめての機会を得るものである。

ESAが運用中の大型位置天文観測衛星Gaiaは、画期的な観測データを輩出中であるが、可視光での観測であるため、中心核バルジの領域に対しては高精度で測定出来る星の個数はほんの少数に限られる。
一方、小型JASMINEは、近赤外線での観測を行うため、ダストによる吸収効果が可視光よりも弱い。





バルジの星で年周視差精度が、
例えば25μ秒角より良い星の数（SJの観測領域内で）:
Gaia: ～70個、 SJ: ～7000個
固有運動精度が125μ秒角/年より良い星の数
Gaia: ～3800個程度、 SJ: ～67000個程度

さらに、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

★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。

中心核バルジ研究の科学的意義と波及効果

*中心核バルジのグローバルな力学構造とその起源の解明
＝＝＞(a)外側のバルジ（半径2kpc程度のバルジ全体構造をしめす）やバーの形成モデルに対する強い制限を与える。

＝＝＞外部バーの形成時期の決定（ユニークな方法かも）

＝＝＞銀河系全体の構造や形成進化の解明：

バーやバルジ形成は、銀河系全体の形成の高感度な探針

(b)母銀河（銀河系ディスク構造や外側のバルジ領域）から銀河系中心領域(半径が10pc程度 以内)へのガスの輸送機構(ガスの角運動量やエネルギーの損失機構)の解明＝＞中心にある巨大ブラックホールへのガス供給や中心部付近での星団や星形成の源の解明。

（1）巨大BHの“進化”とも関連
*巨大BHの質量を決める物理的パラメータを知る鍵

（2）銀河系中心部の活動性の解明

＊中心核バルジ内での星団や星の起源解明とsecular evolution(定常的な進化）の実証
＝＞ディスクからバルジ、バルジから中心核バルジ内へのガスの流入のヒストリー

*中心核バルジは、disk-likeバルジ（中心核ディスクに相当）、classicalバルジの顔をもつ可能性あり。

〇バルジの多様性の解明
＝＝＞銀河系のバルジの構造や形成は、3つのタイプ(classicalバルジ、B/Pバルジ、disk-likeバルジ)の顔をもつ可能性があり＝＞現時点では全く未解決

この複雑な様相は銀河系だけが特殊であるとは考えにくい。他の渦巻き銀河も同様であるのに遠方にあるため観測が困難でバルジの全容が観測されていないだけであるかもしれない。

＝＞銀河系は非常に良い“実験場”と言える。

参考：バルジのタイプについて

○古典的バルジ(classical bulge)

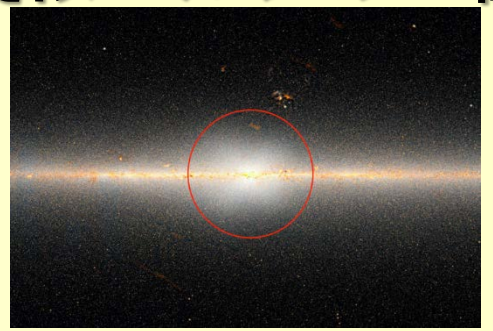
＊楕円銀河とよく似た輝度分布を示す。

＊宇宙の初期に、銀河同士の衝突合体を起因として、
ディスクとは別に、集中的な星の形成とガス降着、
あるいは合体過程によっても発達したと考えられている

○Box/Peanutバルジ(疑似バルジの一種)

＊バルジを横から眺めると、
箱やピーナツの形状に似ている

天の川＝＞



○disk-like bulge（疑似バルジの一種）

＊ディスクとよく似た輝度分布、形状を示す。

疑似バルジ ➡ 先に形成されたディスクから定常的に
進化したと考えられている

★小型JASMINEの科学目標の今後の拡張

小型JASMINE：7万個程度のバルジの星の運動情報

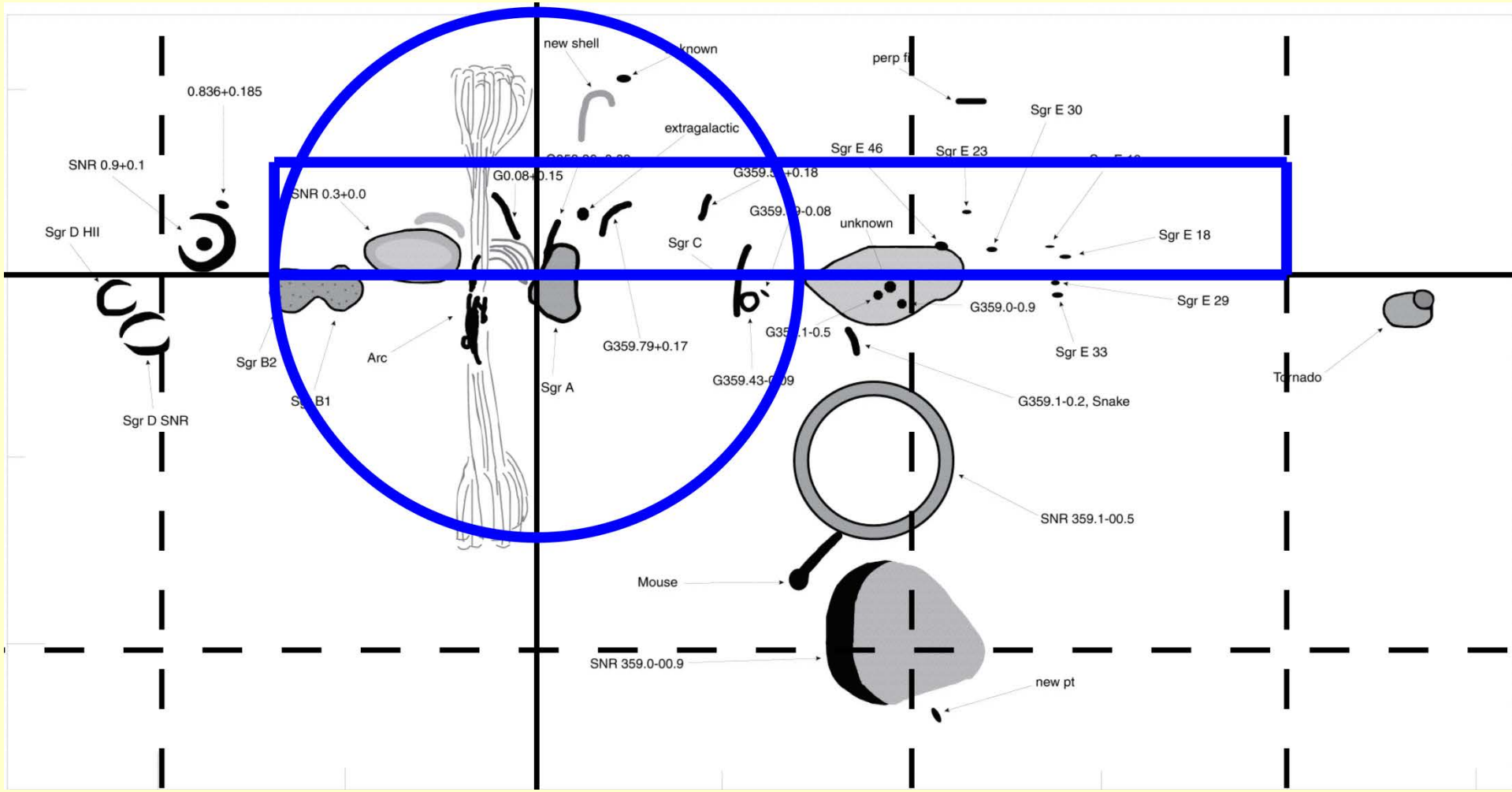
＋地上の分光観測（視線速度、星のタイプ、年齢など）、
多色測光観測（星のタイプ、年齢など）によるフォローアップ

小型JASMINEが測定する星のタイプ、年齢などの情報が
今後増えていくと、他のプロジェクトとのサイエンス連携、
共同研究により、さらに科学目標が拡大できる見込み

＊Gaiaの成果が上がってきており、世界的に位置天文データを
用いるコミュニティが拡大してきており、また銀河系の力学構造の
解析など様々な分野で解析ツールも進展し、公開もされてきている。
＝＞小型JASMINEへつながるものと期待できる

位置天文以外も。。。
銀河系中心核領域を近赤外線帯域において高時間分解能
(100分毎に同一天体)で長期間(3ヶ月連続×６回)モニター撮像
されたデータは今までに類が無く、多くの新たな発見が期待できる。

★例：電波天文学との連携



小型JASMINEの観測領域における主な電波源

(プロジェクトサーベイ以外の)
観測モード:夏と冬期

Option1:**トランジット観測による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**

独立なサイエンス検討チームの立ち上げ

➔河原 創(東大)＋exo JASMINE検討チーム
(増田賢人(プリンストン大)、小谷隆行(ABC/NAOJ)、
山田亨(ISAS))

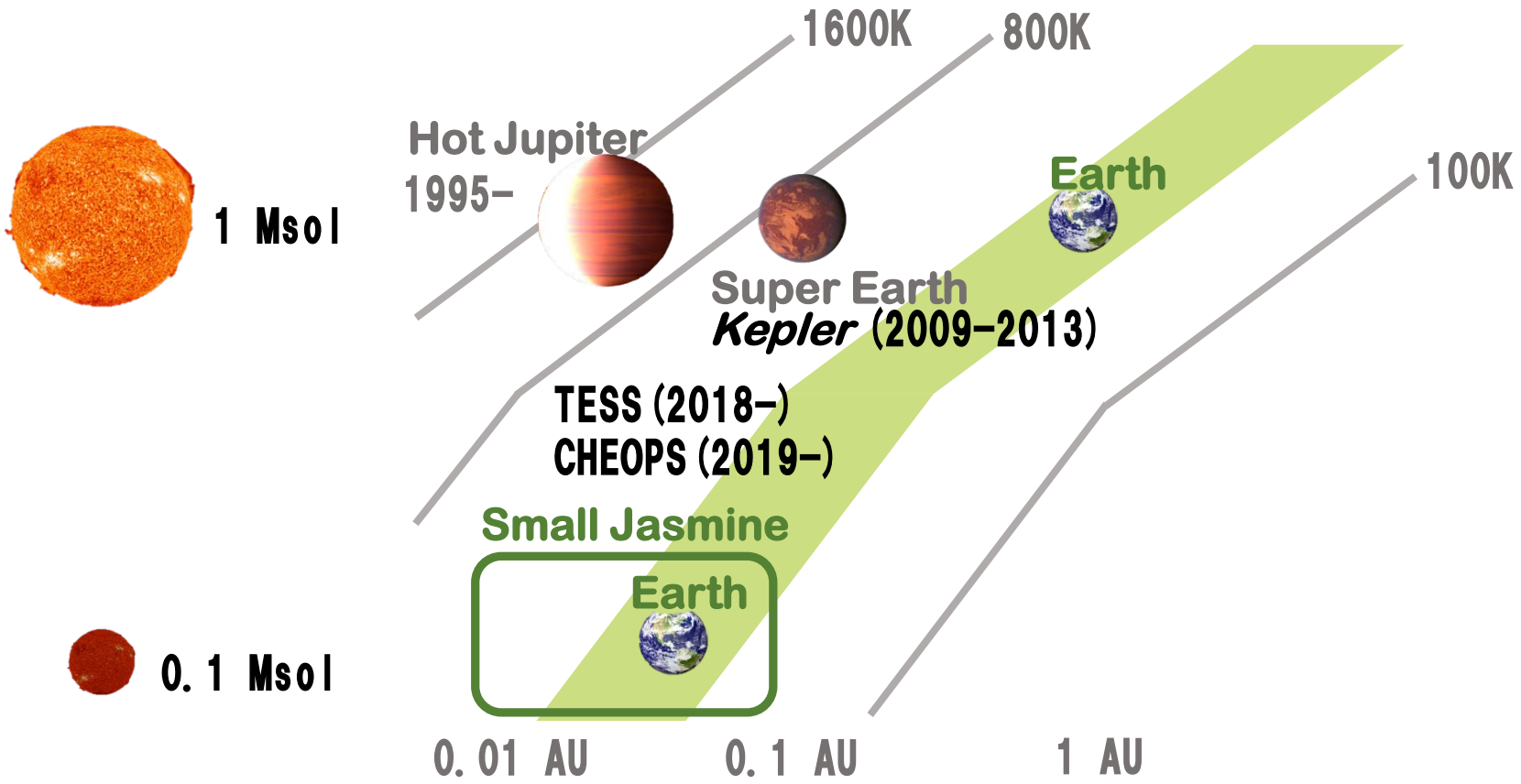
Option2: その他、コミュニティから提案があった科学的意義が高い特定天体の観測

科学目標の意義が十分高く、観測可能性も高ければ、特定天体としてあらかじめ決めておくオプションがある。

注:ミッション要求やシステム要求はあくまでも主目標から直結するものであり、副次目的によって変更はしない。副次目的は主目標から結びつくシステムの範囲内で可能なものに限る。

Option3: データ解析のためのキャリブレーション

Secondary Science: Small Jasmine による系外惑星探査



mid M-type 星のハビタブルゾーンを含む領域でJWST観測のベストターゲットとなる地球型惑星の発見をめざす

モデル恒星・惑星系

恒星 0.2Rsol, 3000K, 16-25pc
惑星 地球型惑星@ハビタブルゾーン
公転周期 14d-30d
トランジット深さ 0.25%

→ TESSの20倍光子数が集められる
このような恒星系は数百個以上存在

観測戦略とサイエンス

観測期間：１天体あたり 30日程度
ターゲット：TESS/RV surveyにより短周期の内側惑星が見つかる系 (20-30天体)

- ハビタブルゾーン内に地球型の発見
  (期待値 =1.5年で0(1)程度)
- JWST追観測のターゲットとなりうるトランジット惑星系の発見
  (H>10 NIRSPEC, R=2700, J>8.5 NIRISS, R=700)
- 内側惑星半径・ephemeris高精度決定
- 昼側放射の検出(optional)

★ 副次目的の候補：銀河系中心方向以外（夏と冬の期間）

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）

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

候補例

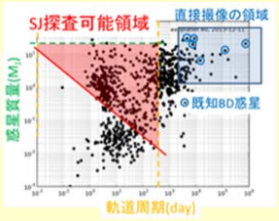
○**X線連星系（CygX-1など）の軌道要素決定**➔降着円盤やジェットの基礎的な物理に迫る
○**ガンマ線連星系の軌道要素解析**➔高密度星の正体判別、放射モデルへの強い制限

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

有力候補天体：Cyg X-1:(l=71°， b=+3°)
周期5.6日(Gaiaでは観測不可能)
伴星: mv～9mag (小型JASMINEで検出可能)、位置変化は、40～50μ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）

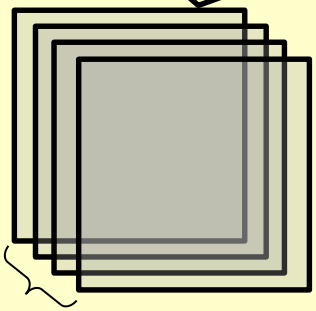
○**系外惑星探査（位置天文法による検出）：特に主星が低質量星の場合。**
褐色矮星まわりの惑星発見。
○既知の系外惑星の軌道要素決定➔惑星の質量決定、
惑星形成モデルの制限など。
○**恒星表面上での活動**（黒点等）
➔活動恒星の物理的解明
○星形成領域の3次元分布
▪



主星が低質量星(Ms<0.1Msun, V-H>7mag)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

★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

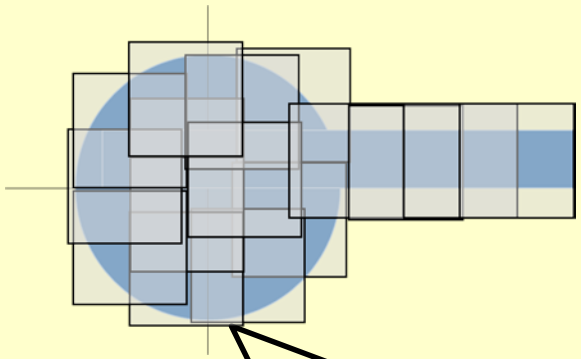


(ほぼ同一視野の)単位フレーム約20枚
=小フレーム

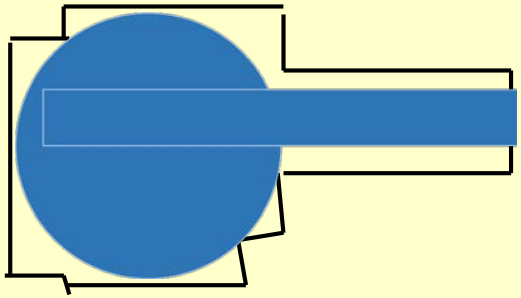
約3年間の運用期間
(1年のうち、春と秋の約半年観測)

(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

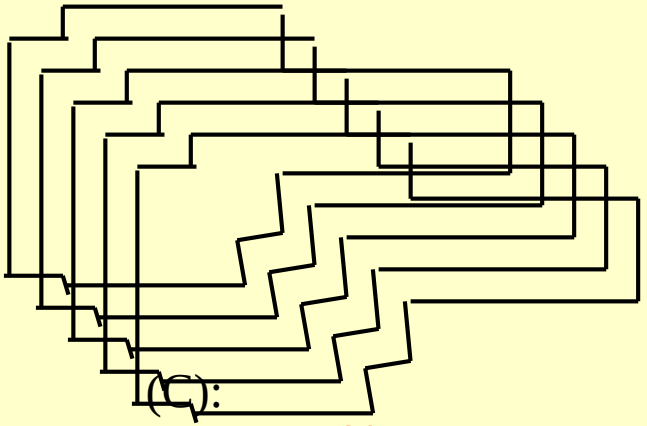
大フレーム約8000枚



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)



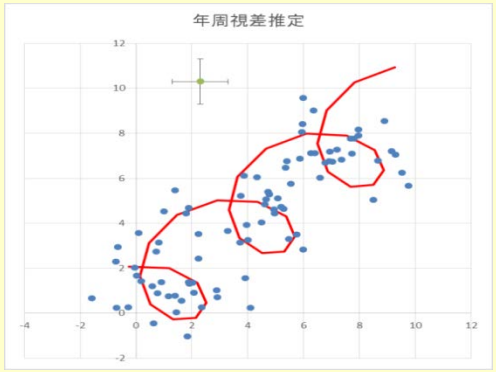
(C):
系統誤差補正
年周視差・固有運動導出

★データ解析の原理

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25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/√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/√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

Self-calibration

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

＊短時間では(多くの）星の相対距離は“不変”と見なせる。

＊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。

＊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

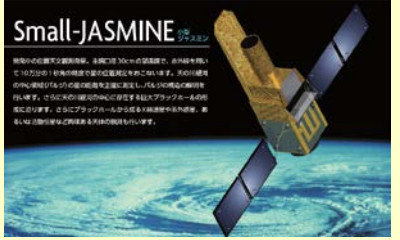
＊Gaia等の高精度測定データもキャリブレーションに使用。

〇モデル化の具体例：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。

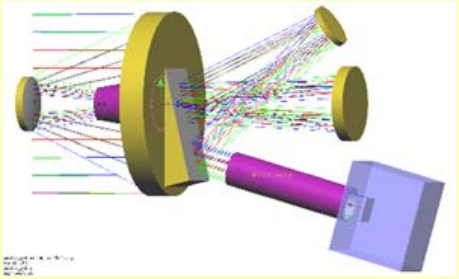
➡ モデルの単純化が必要 ➡ システムに工夫が必要＝＞熱構造安定、指向安定性など

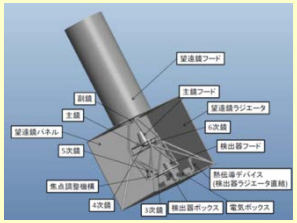
★ 小型JASMINEのミッション概要

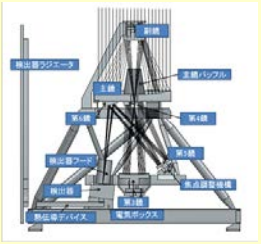


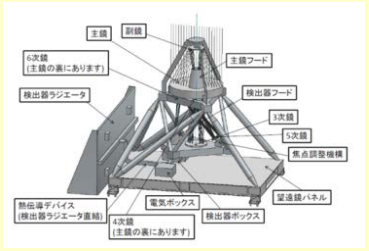
○小型JASMINEの仕様

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　H4RG(Teledyne社）
アストロメトリ用観測波長：Hw-band(1.1～1.7ミクロン）
衛星重量：約400kg(RCS込み）

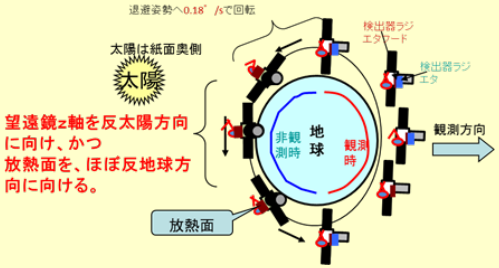


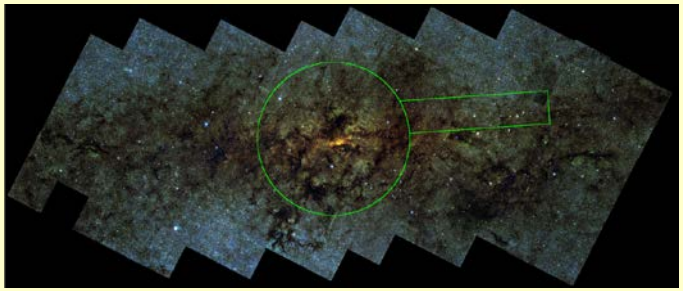






○観測データは、天体の天球面上での位置および測光の時系列データ、およびそれを解析した、天体毎の年周視差、固有運動なども提供。
○時系列データは、約50分間の連続撮像、その後約50分間の非観測時間、そして再度約50分間の連続撮像データ。観測の総時間までそれが繰り返される。
○観測期間：3年間程度
○軌道：太陽同期軌道（高度約550km以上)(tentative)





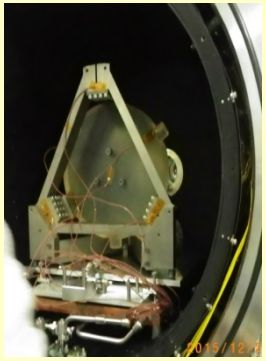
銀河中心の J,H,K 三色合成画像 (名古屋大学 IRSF 1.4m 望遠鏡搭載の SIRIUS で撮像 : 西山 他, 2004年度春季天文学会記者発表資料)に観測領域を緑線で書き込んだもの

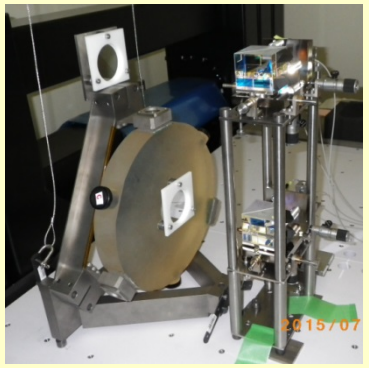
★ キーとなる技術要素の技術実証実験

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、実験が進んできた。

(1) 観測装置の熱変動実証

熱歪検証モデル： 我々が開発した**熱膨張率が0±5x10^{-8}/Kの超スーパーインバーに関して、長期寸法変化がスーパーインバーより1桁以上小さい、0.01pp/年程度であることが分かった。**この材料を用いた**望遠鏡主構造のフルモデル(BBM相当)を設計、製作した。熱構造モデル(STM)相当でもある。**



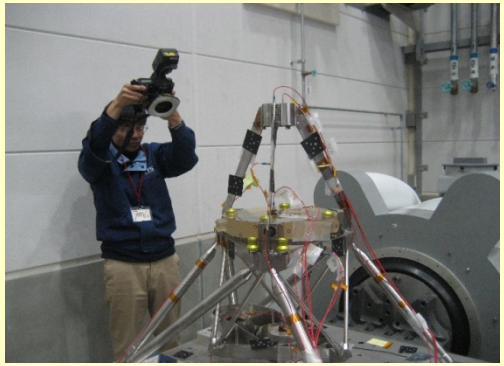


右：熱ひずみ検証モデルと三軸干渉計の設置状況
左：真空槽中の熱ひずみモデルの設置状況

(2) 熱環境

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を開発しているが、製作した検出器BOXBBMを熱構造モデル化して、振動試験を実施し、固有振動数などの構造特性を取得した。
また、望遠鏡主構造のBBMが完成すれば、熱真空試験が開始できるまでの試験準備ができた。

右：望遠鏡主構造のフルモデル(BBM相当)

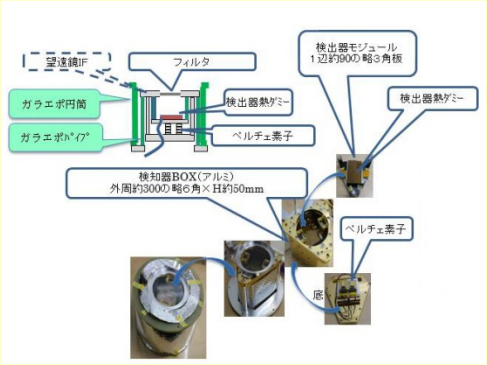


(3)光学系要素技術(迷光対策など)

植毛サンプルの散乱特性を実測し、それをもとにした迷光量計算を行い現在の計算精度では問題がないことを確認した。

(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

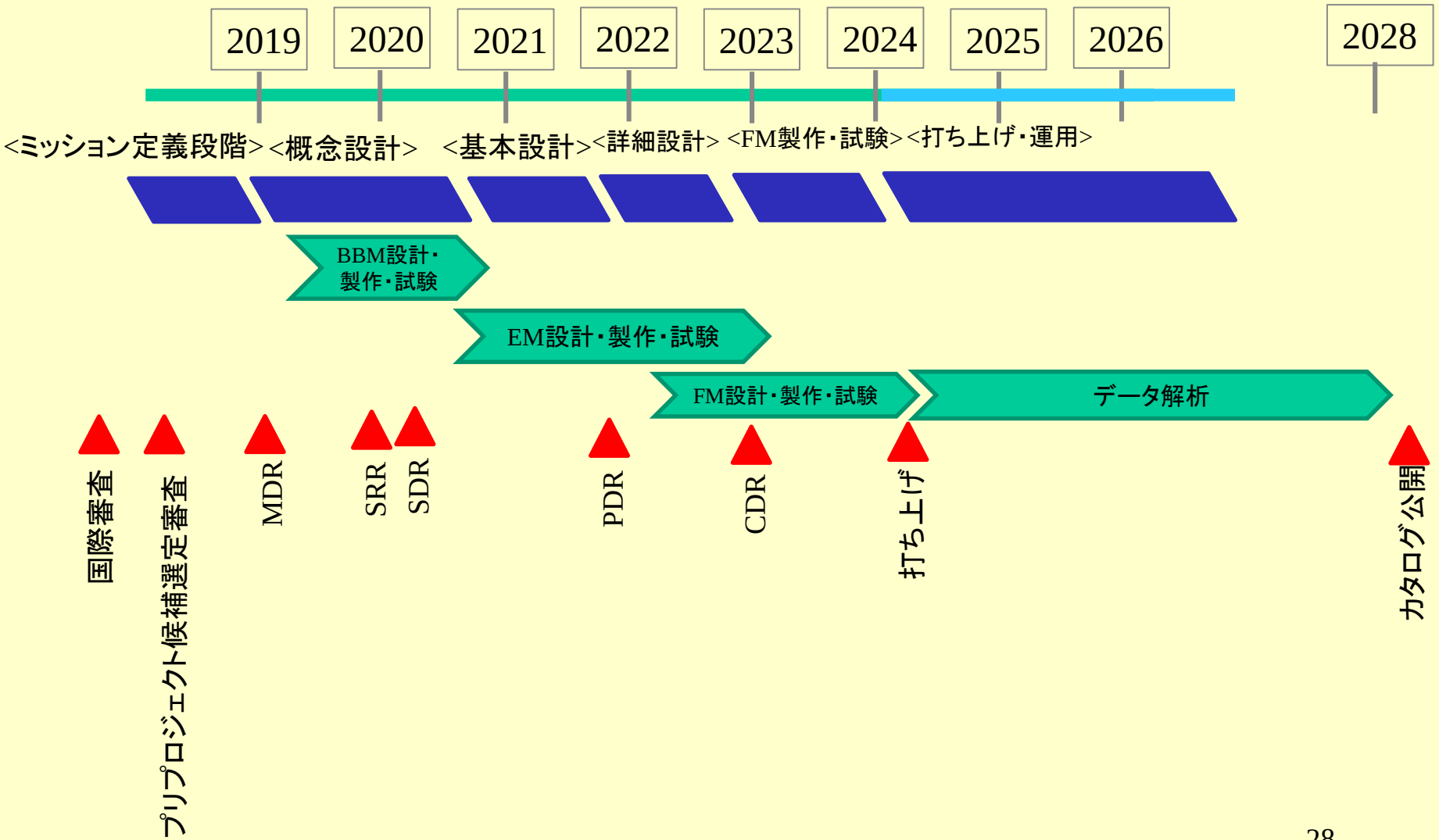


(5)システム検討

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た。

(6)データ解析手法の開発と目標精度達成の実証

今後のスケジュール案


2019
2020
2021
2022
2023
2024
2025
2026
2028
<ミッション定義段階>
<概念設計>
<基本設計>
<詳細設計>
<FM製作・試験>
<打ち上げ・運用>
BBM設計・
製作・試験
EM設計・製作・試験
FM設計・製作・試験
データ解析
国際審査
プリプロジェクト候補選定審査
MDR
SRR
SDR
PDR
CDR
打ち上げ
カタログ公開

★実施体制

現時点：国立天文台JASMINE検討室（スタッフ10名）が
中心となったJASMINEチーム

また、宇宙研での所内準備チーム（所長決定）

チーム長：山田良透（京大：宇宙研システム研究員）
PI：郷田直輝(国立天文台)
PS:河田大介（University College London）
POC、システム：片坐宏一(宇宙研)

JAXAプリプロジェクト以降は大規模な拡大を行う

★コミュニティの検討状況

○国内

光赤外線天文学連合（光赤天連）からの推薦

光赤天連では、マスタープラン2020への申請にあたり、光赤天連からの推薦を検討してきた。その中で小型JASMINEに関して検討された結果は、以下の通りである(推薦書の一部抜粋)。

総合評価:
学術的評価:
JASMINE 計画は日本初の人工衛星による位置天文観測を行なう野心的なものである。
先行する位置天文観測衛星の HIPPARCOS や Gaia が可視光で観測を行なってきたのに対し、小型 JASMINE では赤外線での観測を行なうために銀河中心の観測が可能になった。
このため、現時点で銀河系中心核の解明を行なうための最もパワフルな計画であると言える。

実現性:
これまでにも外部による様々な審査や評価を受けており、着実に対応を行なってきていている。
ハードウェア的な技術実証でも、ソフトウェア的な面、特にこの計画のキーとなる要素である「データ解析による 20μ 秒角の精度達成」の実証についても、きちんと計画的に進めている。
また海外の位置天文衛星計画のグループの協力を取り付けていることも評価できる。
JAXA 宇宙研公募型小型衛星として採択されれば実現性は高い。

★世界のコミュニティからの国際協力とサポート

(1)海外からの推薦、小型JASMINEへの参加表明

*IAU Commission A1のpresidentから正式な推薦

*Gaiaのデータ解析チームからの参加
(i) アストロメトリデータ解析: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。
(ii) Photometryデータ解析:バルセロナ大学から参加表明

(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
http://www.jasmine-galaxy.org/meetings/gaia-jasmine.html

(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)
との協力。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。

＊GaiaNIR(大型赤外線位置天文観測衛星)の計画提案メンバーとして協力。
小型JASMINEが先駆けとなり、日本も貢献していく。

(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。
*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

(5)地上通信局に関するESAの協力や検出器に関する米国の機関の協力に関して交渉中

今後もよろしく御願いします