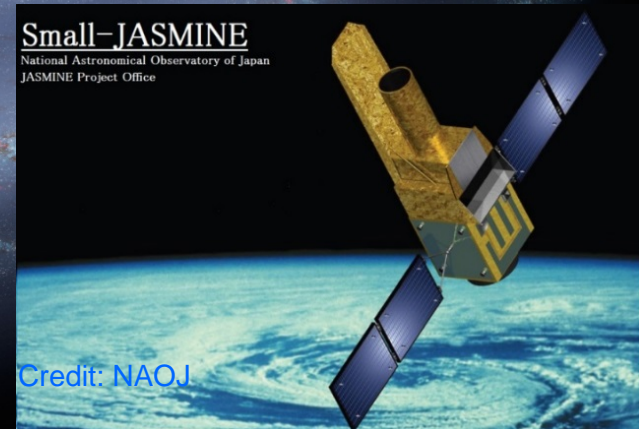


小型JASMINE (赤外線位置天文観測衛星)

郷田直輝 (国立天文台JASMINEプロジェクト)
JASMINE準備チーム



Credit: NASA



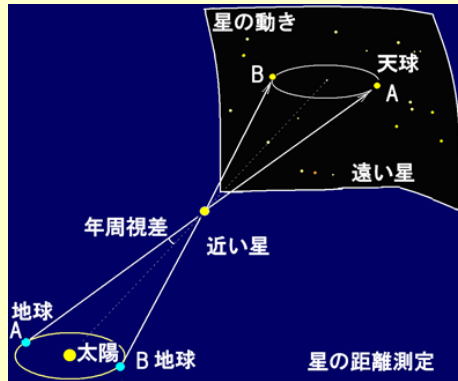
1. 小型JASMINEは何を観測するのか？～位置天文観測～

★位置天文観測とは

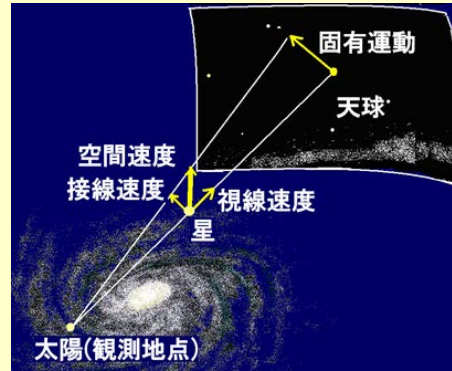
* 星の撮像観測を行い、その観測で得た天体の天球面上での位置の時間変動(時系列データ)とそこから導かれる年周視差と固有運動等の位置天文パラメータを供出する。

* 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

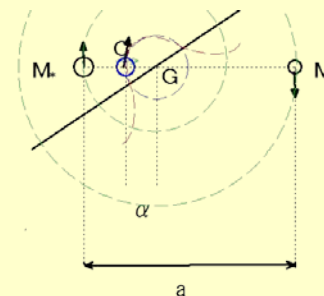


星の接線速度



* 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



位置天文観測の大革命時代到来

光学大型位置天文観測衛星Gaia(ESA)は革命的：

質（ 10μ 秒角クラスの位置決定精度）、**量**（10億個以上の星）とも画期的な星の位置、距離、速度情報が得られる時代に突入！

* 科学運用:2014年~2019年

→2020年末→2024年まで(見込み)



天の川銀河の研究が大進展！！

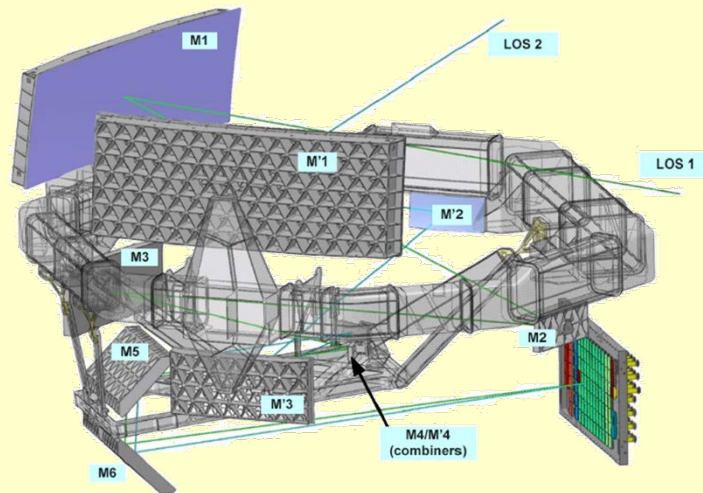
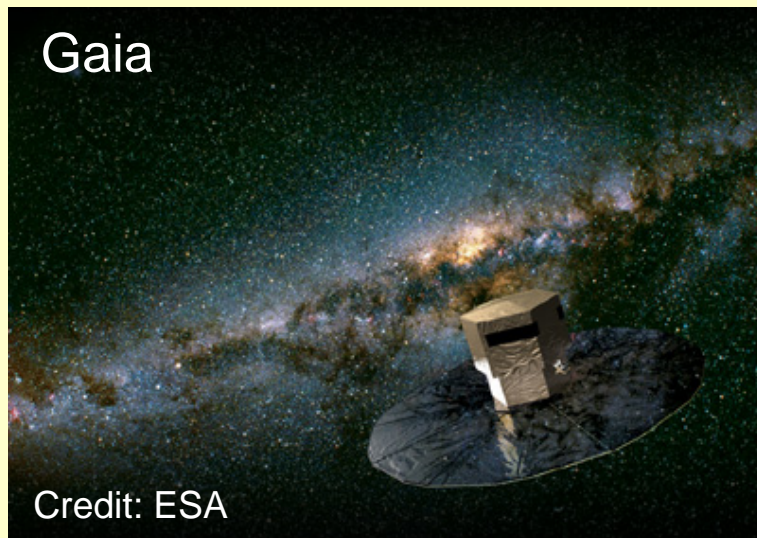
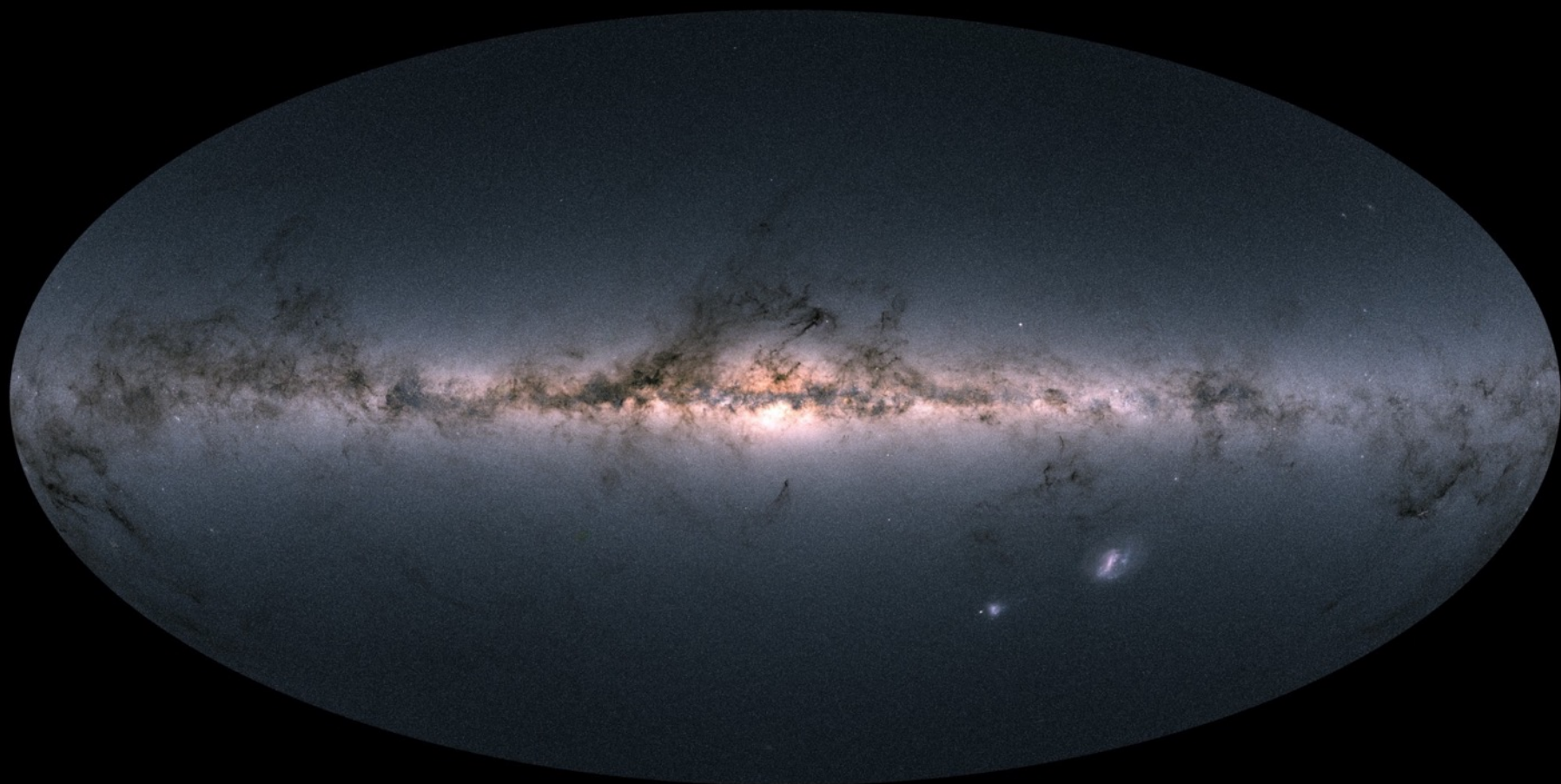


Figure courtesy EADS-Astrium

Gaia DR2 (2回目の中間データ) : 2018年4月
Gaiaでみた天球の星 (13億個)



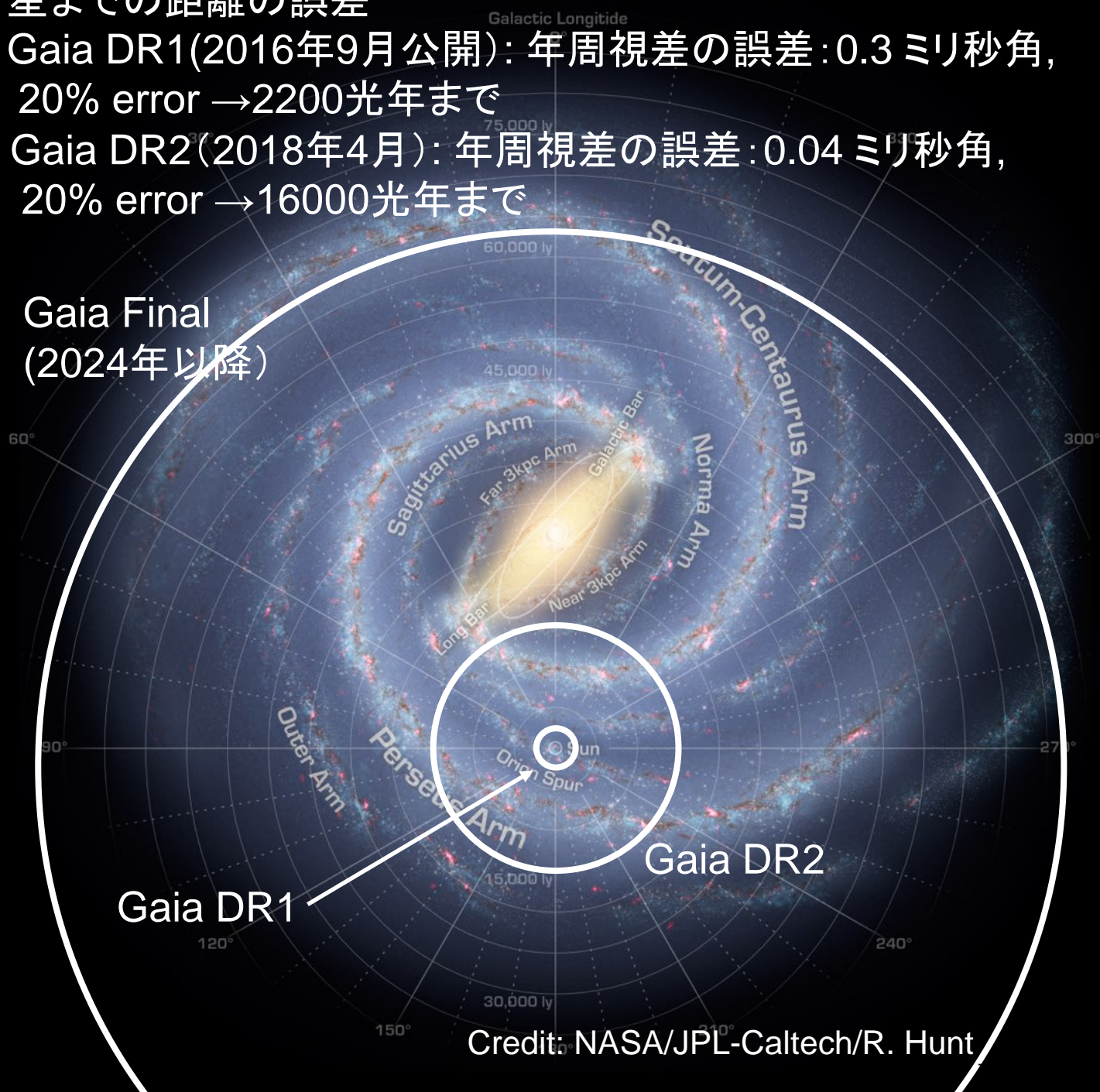
Credit:ESA/Gaia/DPAC

星までの距離の誤差

Gaia DR1(2016年9月公開): 年周視差の誤差: 0.3 ミリ秒角,
20% error → 2200光年まで

Gaia DR2(2018年4月): 年周視差の誤差: 0.04 ミリ秒角,
20% error → 16000光年まで

Gaia Final
(2024年以降)



Credit: NASA/JPL-Caltech/R. Hunt

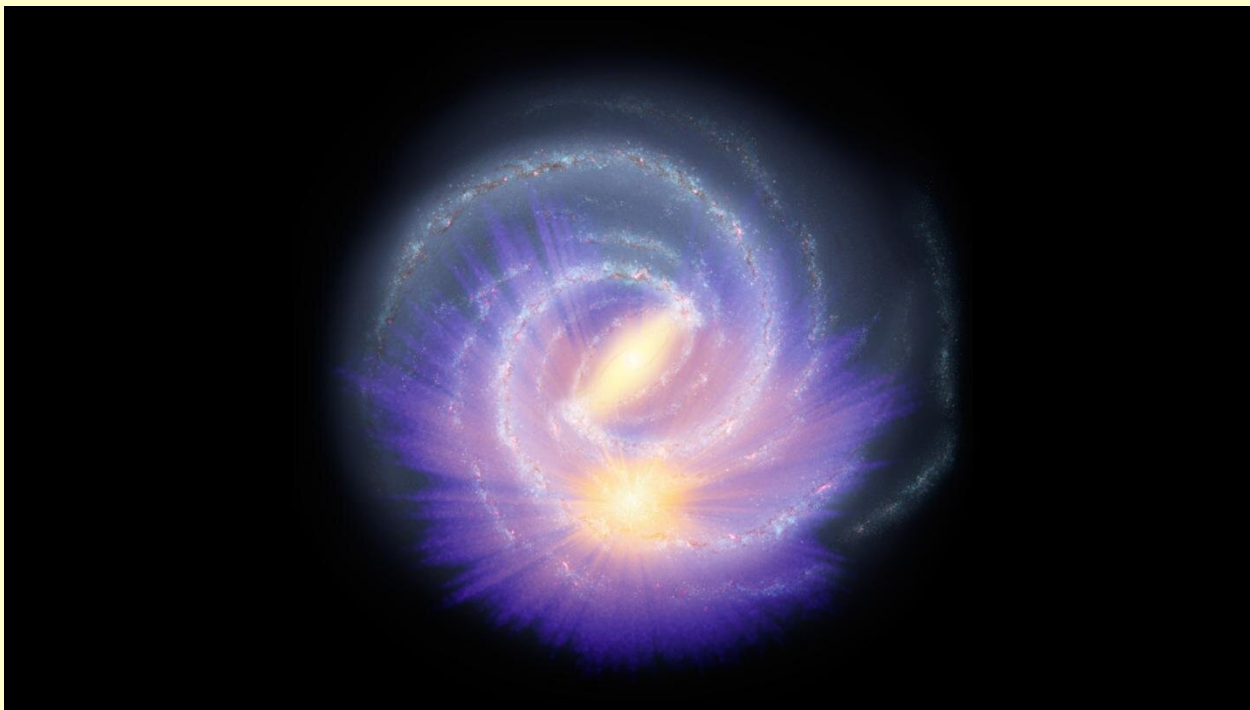
* Gaiaの成果例

(Gaia DR2 (2018年4月公開)を利用したもの)

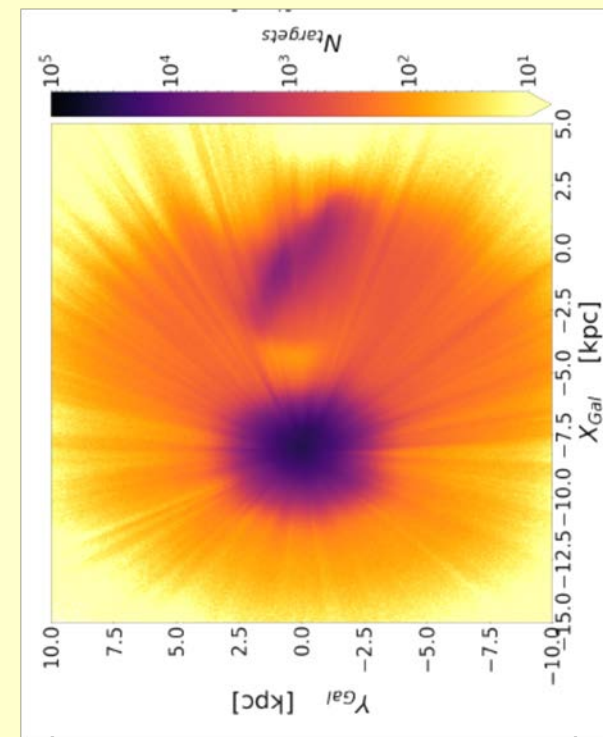
この1年間で2000本以上の論文
(論文生産率はハッブル望遠鏡を超えた)

- 太陽系内天体、オウムアムアのふるさと？
- 星の色と明るさの関係→恒星進化論
- 系外惑星の質量導出
- 白色矮星のカタログ
- 高速度星の発見
- 隠された星団の発見
- 星の密度分布
- ダスト(塵)の3次元分布
- 天の川銀河の総質量測定
- アンドロメダと天の川銀河との相対速度
- 矮小銀河の衝突の痕跡
- 銀河間を飛来する星
- バー構造の実視
- 太陽系近傍の運動星団の精密測定～複雑な星の速度構造～
- 銀河面振動(さざ波)の発見
- その他、多数

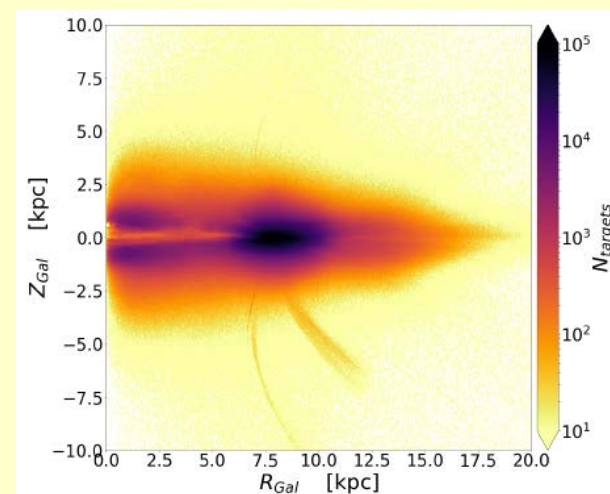
* バー構造の実視



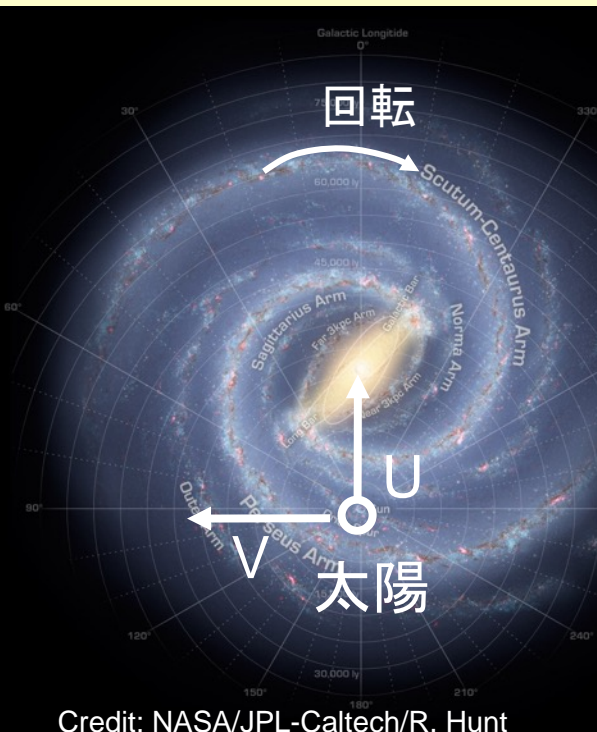
Copyright: Data: ESA/Gaia/DPAC, A. Khalatyan(AIP) & StarHorse team; Galaxy map: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech)



(Anders, F., et al., 2019)

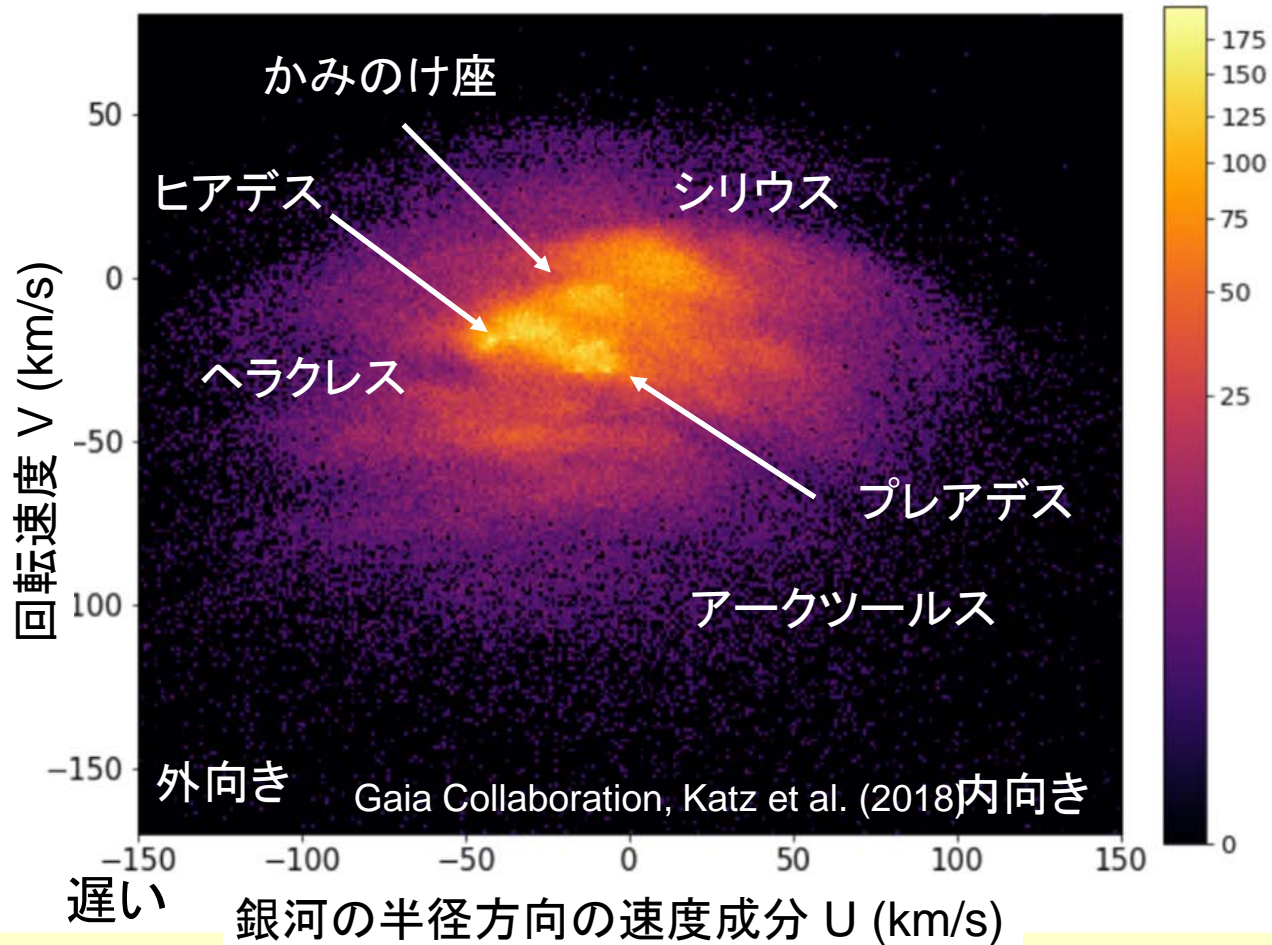


* 太陽系近傍の運動星団 ～複雑な速度構造～



速い

Gaia DR2



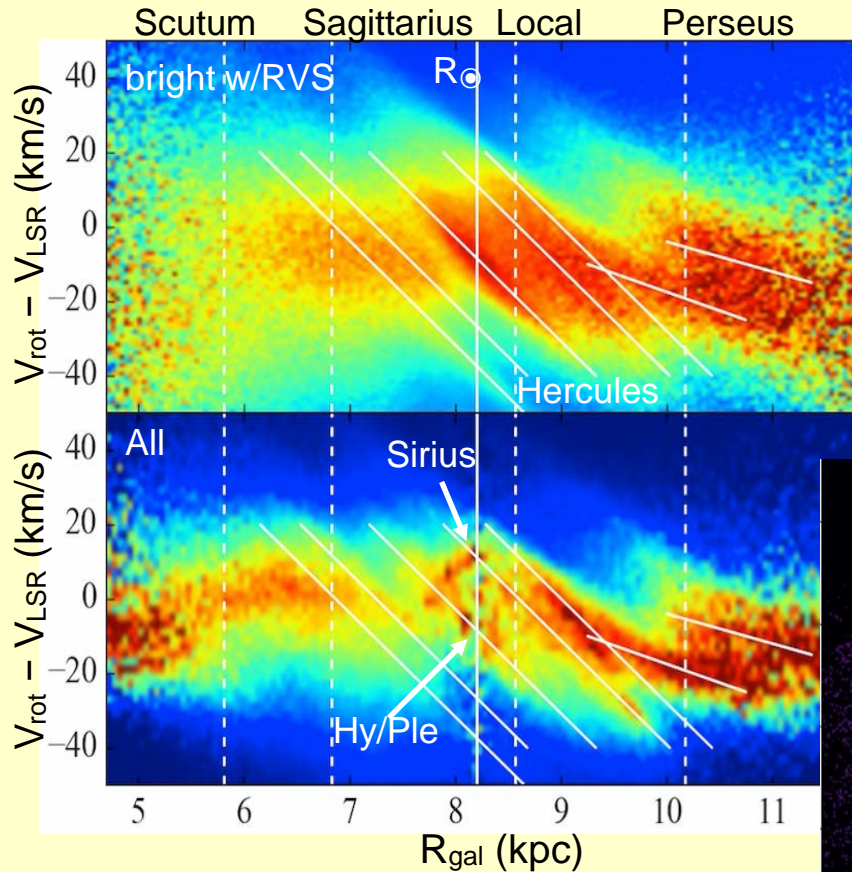
バー構造や渦状腕の

影響の可能性(非軸対称

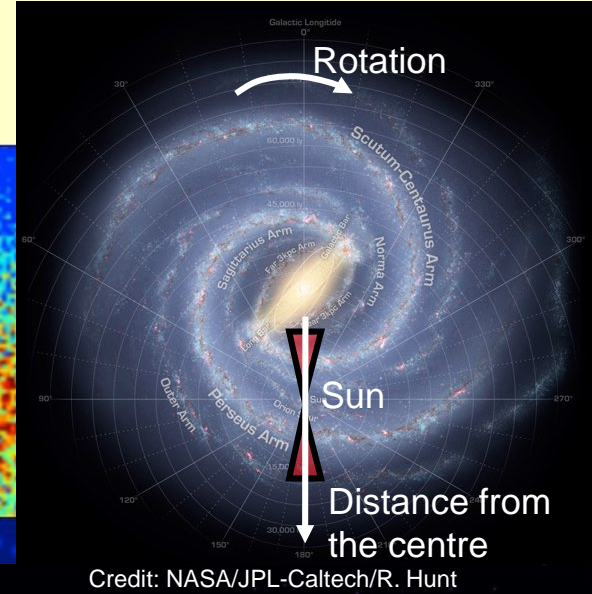
構造による共鳴効果→軌道が分岐し別種類の軌道に分かれる)、

他、矮小銀河の残骸、星団の残骸の可能性も。

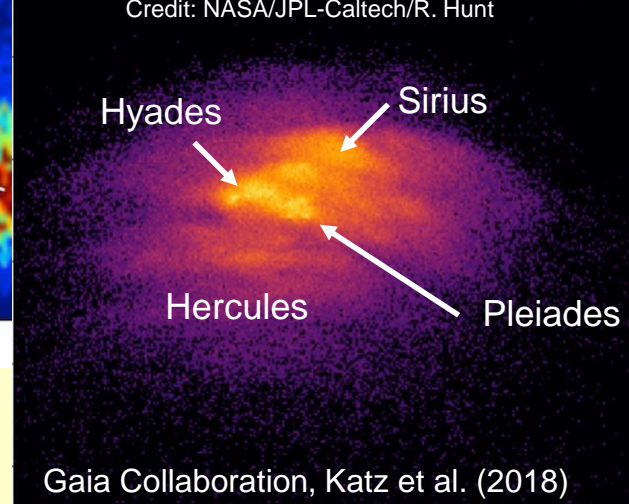
太陽系近傍と同様な運動集団 (sub-structure) が
他の箇所にも拡がって存在している



Kawata et al. (2018, MNRAS, 479L, 108)



Credit: NASA/JPL-Caltech/R. Hunt



Gaia Collaboration, Katz et al. (2018)

* 銀河面のさざ波

～銀河ディスク面に垂直な方向に沿って星の軌道が振動～



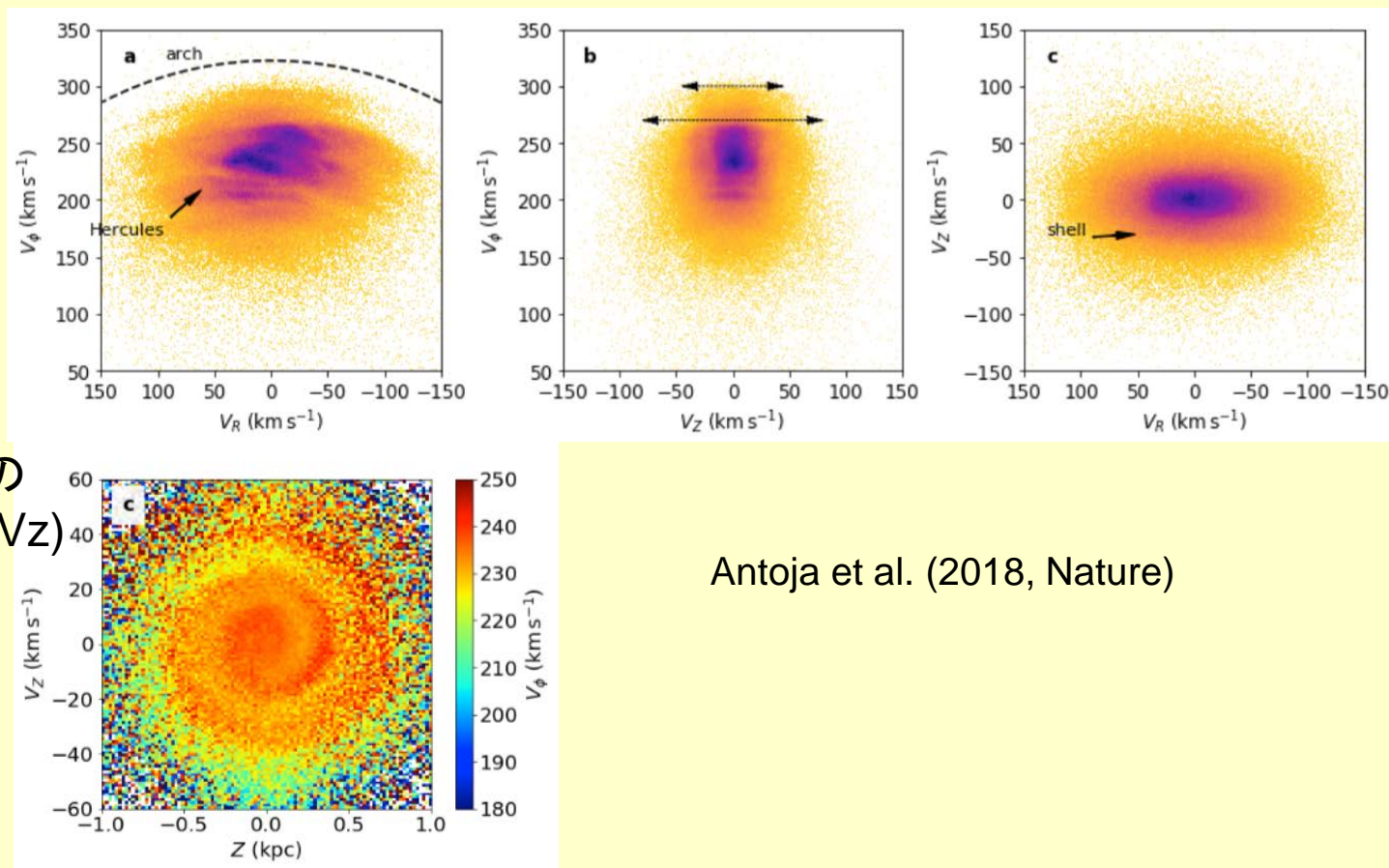
Credit: ESA

バー構造や渦状腕、矮小銀河の残骸の可能性

銀河系ディスクの星は、完全なPhase mixing(位相混合状態~緩和状態)を
起こしてなくて非平衡状態



摂動が比較的最近に加わっていきそう

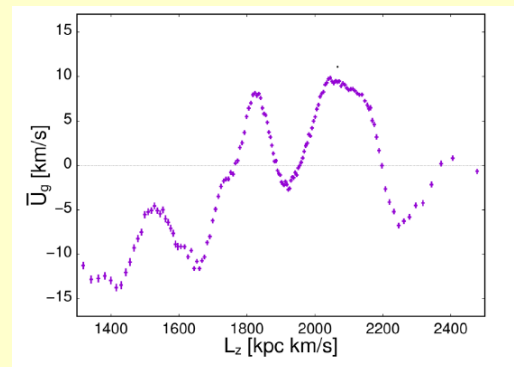


Antoja et al. (2018, Nature)

銀河面に垂直方向は軸(z軸)の座標

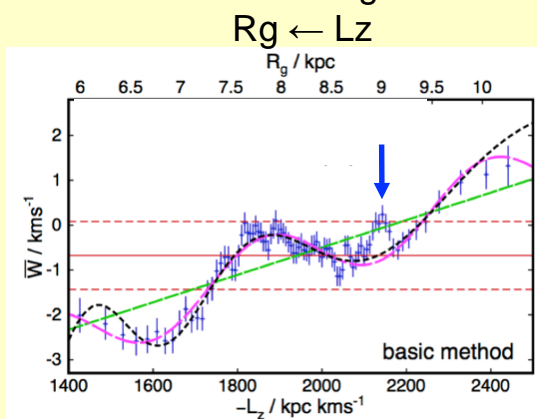
銀河面に垂直方向の振動と 銀河半径方向の振動

半径方向の平均速度



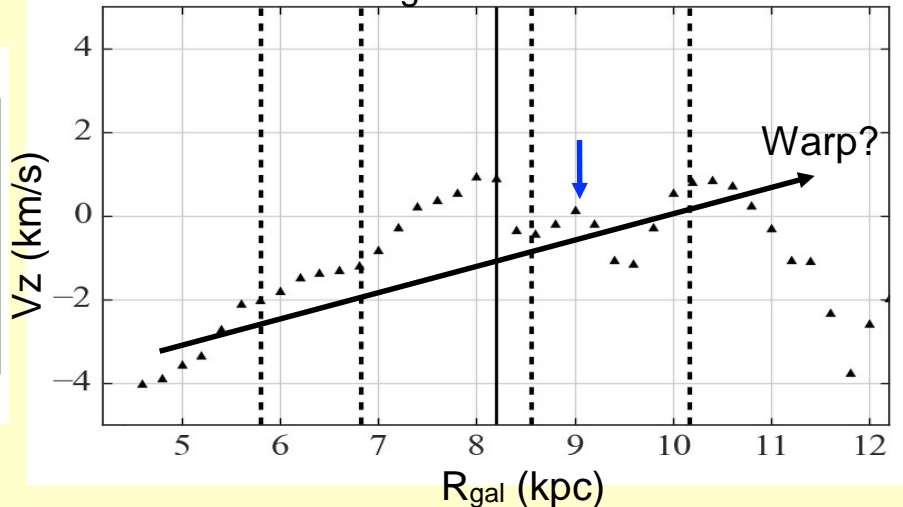
垂直方向の平均速度

Gaia DR1 solar neighbourhood



Schönrich & Dehnen (2018)

Gaia DR2 using the current radius



Friske & Schönrich (2019)

銀河中心からの距離

Gaia DR2 => 銀河系ディスクはなめらかに

Kawata et al. (2018)

回転しているのではなく、摂動を受けている。

* 銀震学 (銀河面の振動)

星の軌道が銀河面に垂直な方向に沿って振動



・その起源は？

矮小銀河の衝突？

非軸対称構造による影響 (バー構造や動的渦状腕)？

・非平衡状態を考慮した、

* 今までは平衡状態を仮定

銀河ディスクの重力場の評価

銀河面でのダークマターの質量密度

→ダークマターの正体制限

振動の物理情報が重要！

* **バー構造**は、いろいろな面でキーとなる存在



横から見た模式図

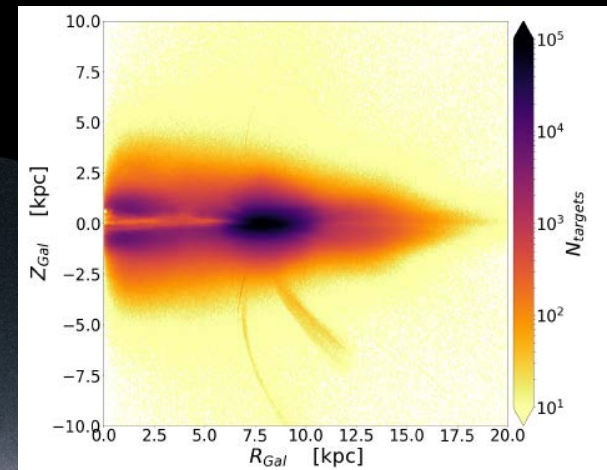
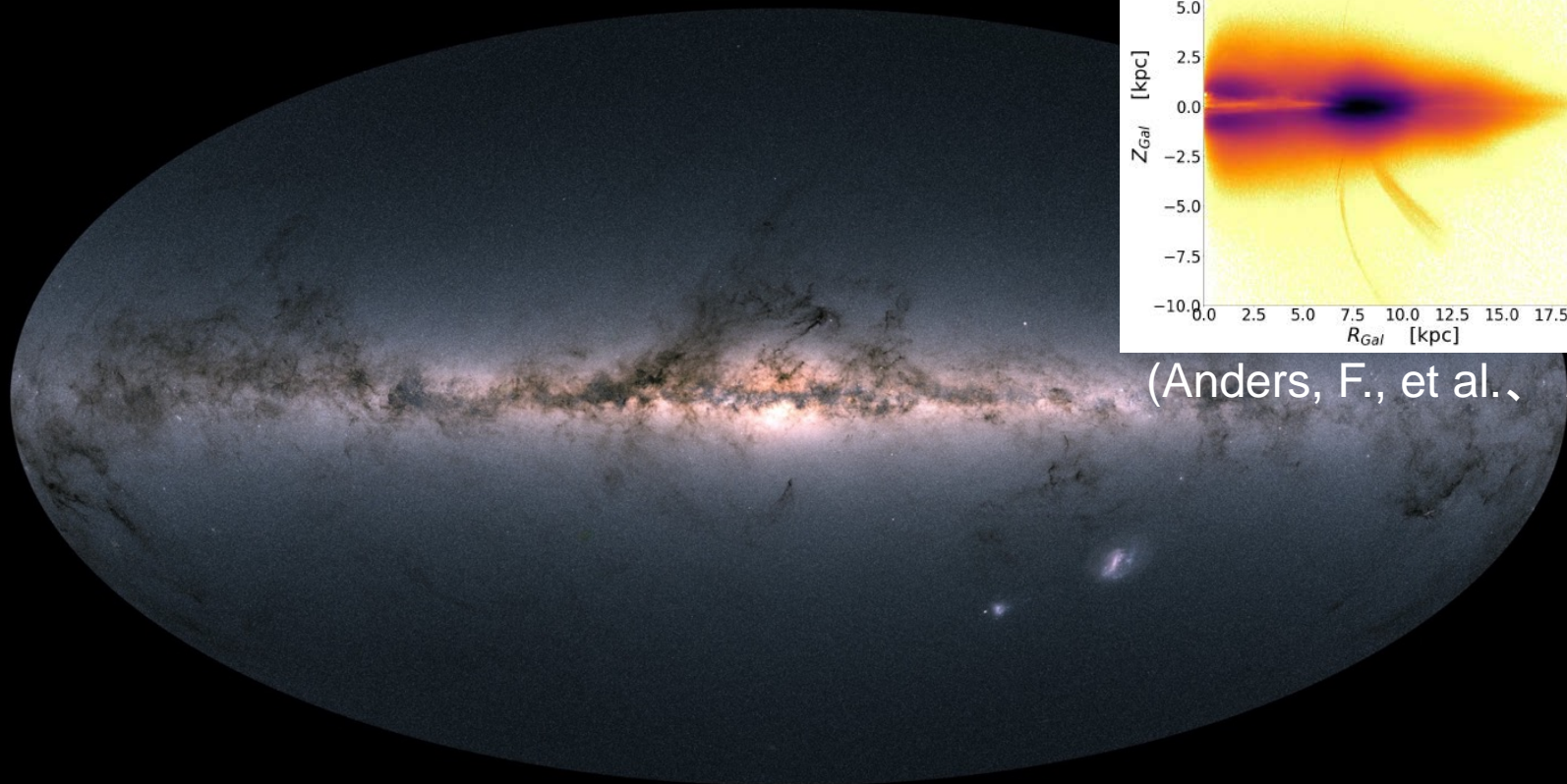
- ・ **バルジの形成、進化** (バーによる buckling instability)
- ・ **太陽系近傍の運動星団の起源**
- ・ **銀河面の振動**
- ・ **銀河ディスクのガスを中心領域へ提供**
- ・ **太陽や恒星の誕生場所やその軌跡**

以上のようにGaiaはすでに数々の成果
今後、ますます期待できる！

- ・精度の向上
- ・変光星の解析
- ・連星系、系外惑星、重力レンズ天体の解析
- ・その他、諸々

しかし・・・

Gaiaでは、よく見えないところが！ 天の川銀河の中心、銀河面など



(Anders, F., et al., 2019)

Gaia DR2 (2回目のデータ) : 2018年4月
Gaiaでみた天球の星

Credit: ESA/Gaia/DPAC

2. JASMINE計画

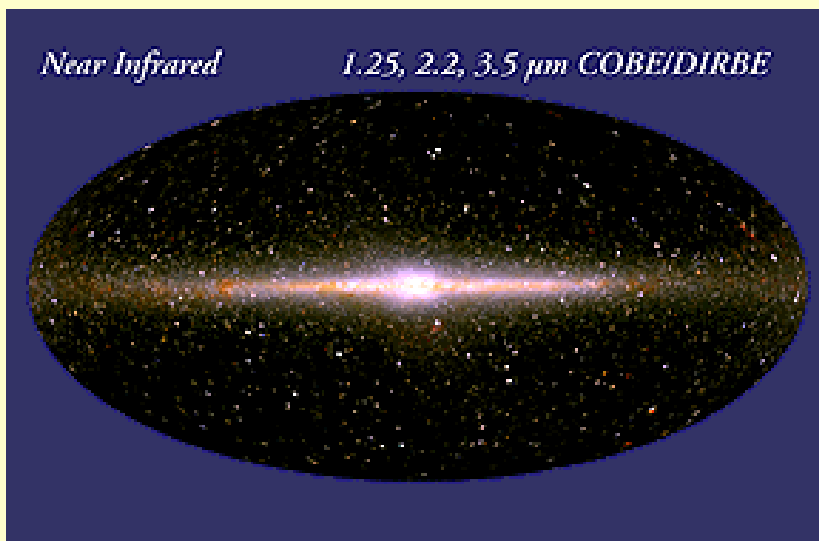


赤外線位置天文観測衛星計画



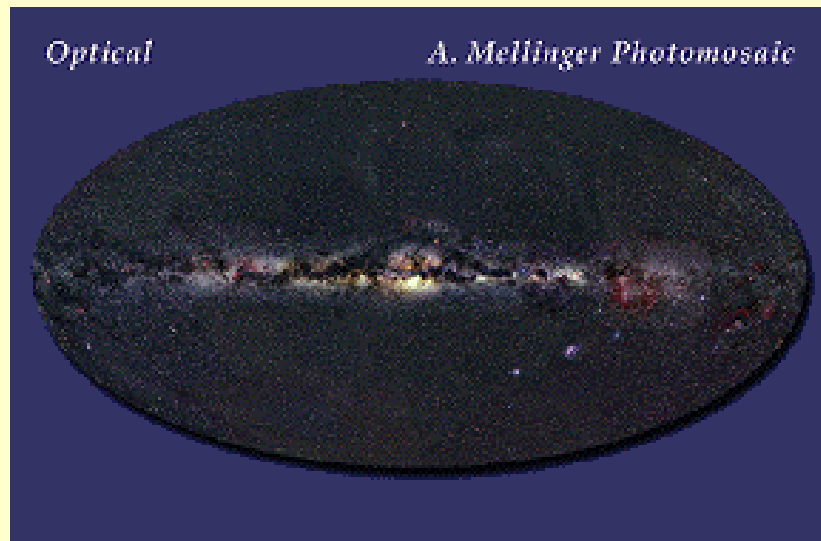
近赤外線による観測

(波長: 1.1~1.7ミクロン)



可視光による観測

(塵に覆われて可視光では観測しにくい)



小型JASMINE

◎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号機の唯一の候補に
選定していただいた。

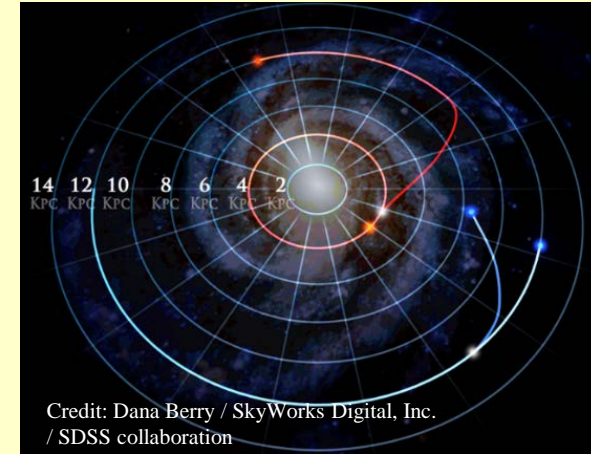


イプシロンロケットでの打ち上げ(内之浦)

Credit:JAXA

○2つの大きな科学目標

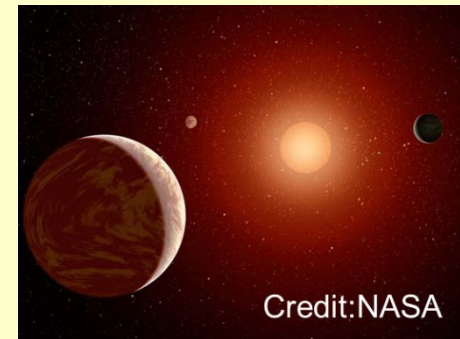
1. 赤外線による位置天文観測により、距離2万6千光年に位置する天の川銀河中心領域(**中心核バルジ**)の星の運動を測定し、**銀河中心考古学**と**銀震学**を遂行すること。
=>天の川銀河のバルジ、バー、ディスク、そして中心の巨大ブラックホールの形成の研究
=>さらには、**太陽系の誕生の現場と軌跡の解明**



2. 時間軸天文観測により、我々が住むことができる系外惑星の候補天体を探査すること。

一> **太陽系外生命存在の可能性探求**

トランジット法、アストロメトリ法、マイクロレンジング法を駆使して、生命存在可能領域の地球型惑星を探査すること。



中心核バルジ探査

天の川銀河 (銀河系)

ディスク

渦状腕

バー

バルジ

中心核バルジ

1500光年

600光年

半径~(300-900光年)

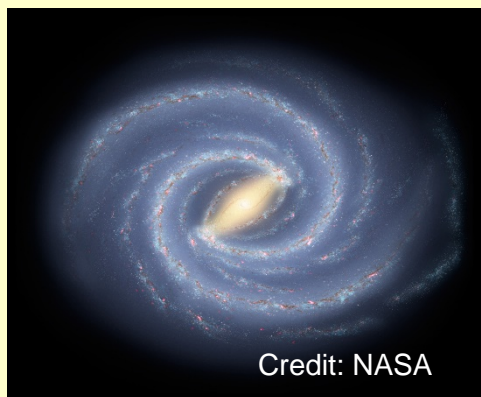
太陽
(銀河系中心から26000光年)

バルジ (box or peanutsバルジ)

ディスク

バー

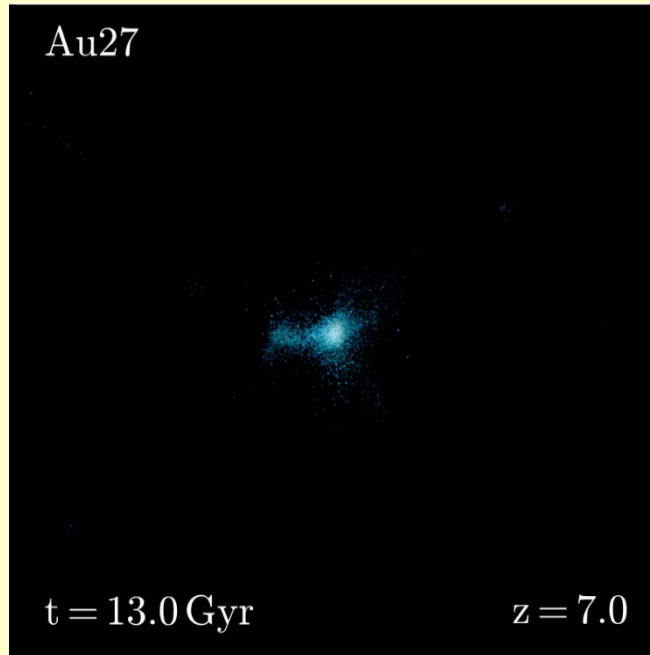
上から見た模式図



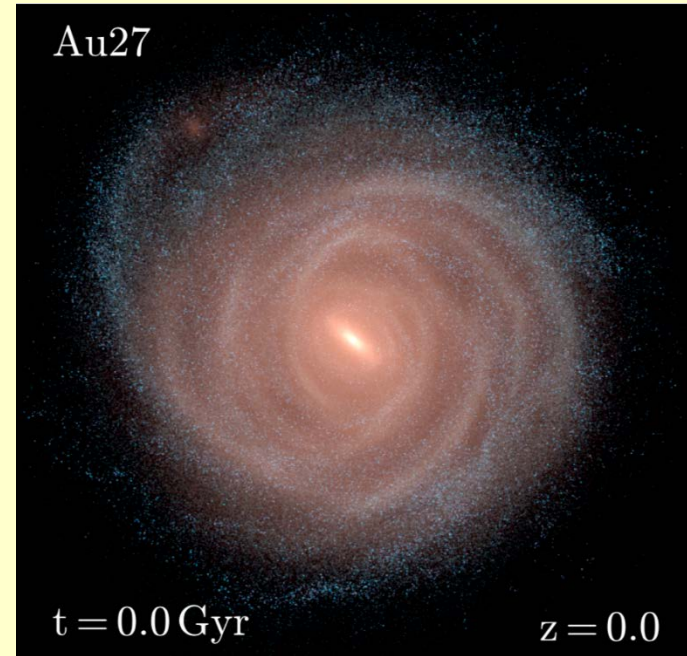
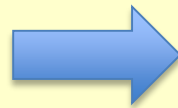
横から見た模式図

銀河中心考古学

太陽系を宿した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をもった(歴史が凝縮している)銀河中心領域の多くの星の運動を正確に求めることにより、銀河系のバルジ、バー、ディスクそして中心ブラックホールの形成過程を明らかにする。



130億年前



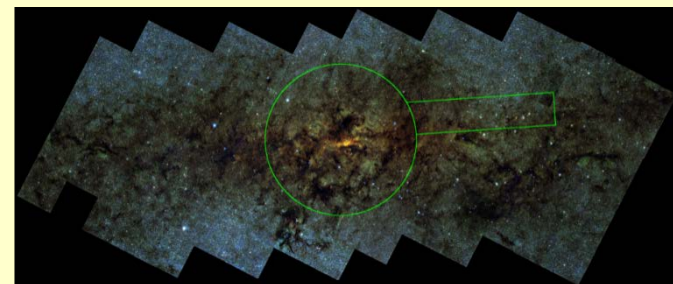
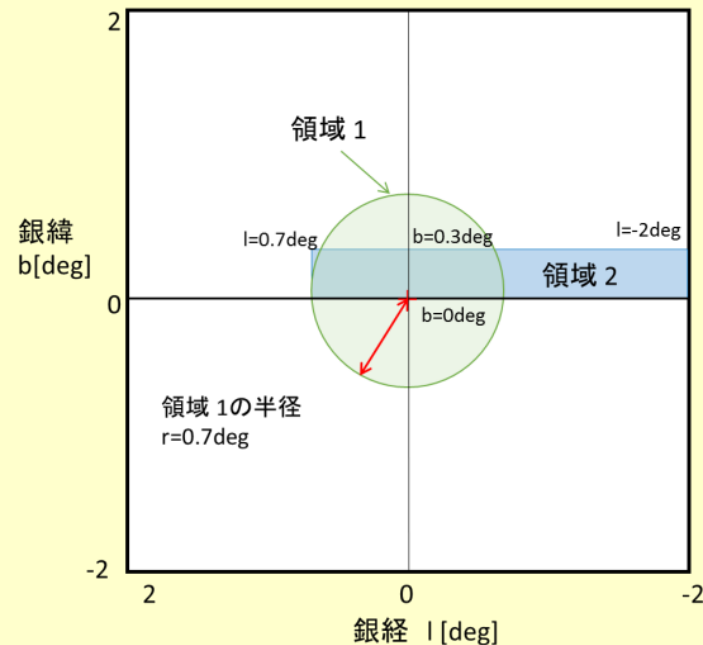
Auriga 27 (Grand et al. 2017)

現在

★銀河中心考古学のため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。

観測領域



J, H, K tricolor composite image of the Galactic center area (imaged by SIRIUS on the Nagoya University IRSF 1.4m telescope; Nishiyama et al., 2004 Spring Astronomical Society Press Release). The survey area of Small-JASMINE is written with the green line.

This document is provided by JAXA.

○サーベイ領域:

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)

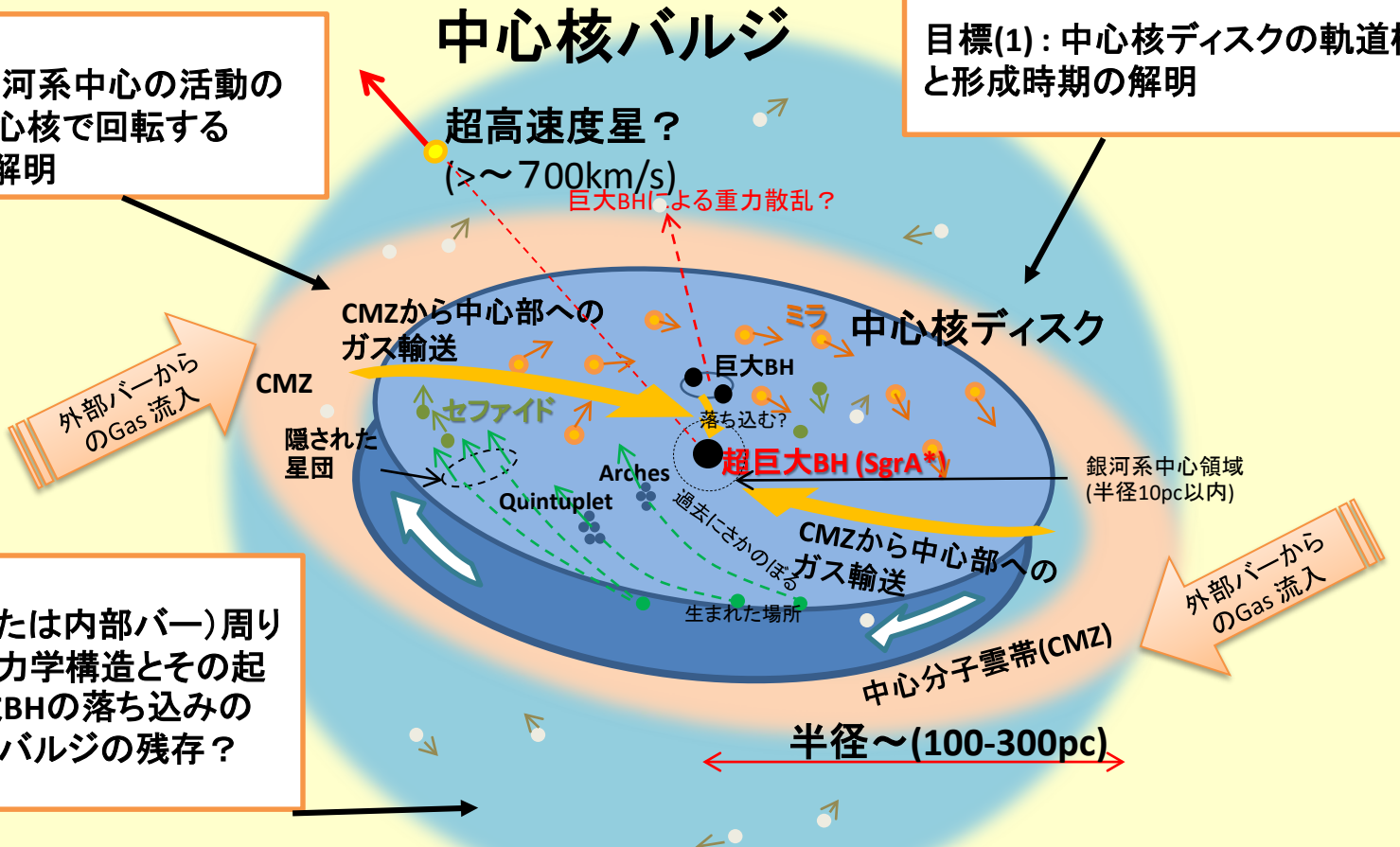
ディスクの星: 31,000個 (うち4,900個 Hw<12.5)

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—

目標(2):
巨大BHの進化と銀河系中心の活動の
解明につながる中心核で回転する
(ミニ)バー構造の解明

目標(1): 中心核ディスクの軌道構造
と形成時期の解明



目標(3):
中心核ディスク(または内部バー)周りの
広がった空間の力学構造とその起源の解明
=> 巨大BHの落ち込みの痕跡
または古典的バルジの残存?

*** 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

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あるのか?

多様な天体の探求:
重力レンズ天体、コンパクト天体等

★科学目標(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の解明

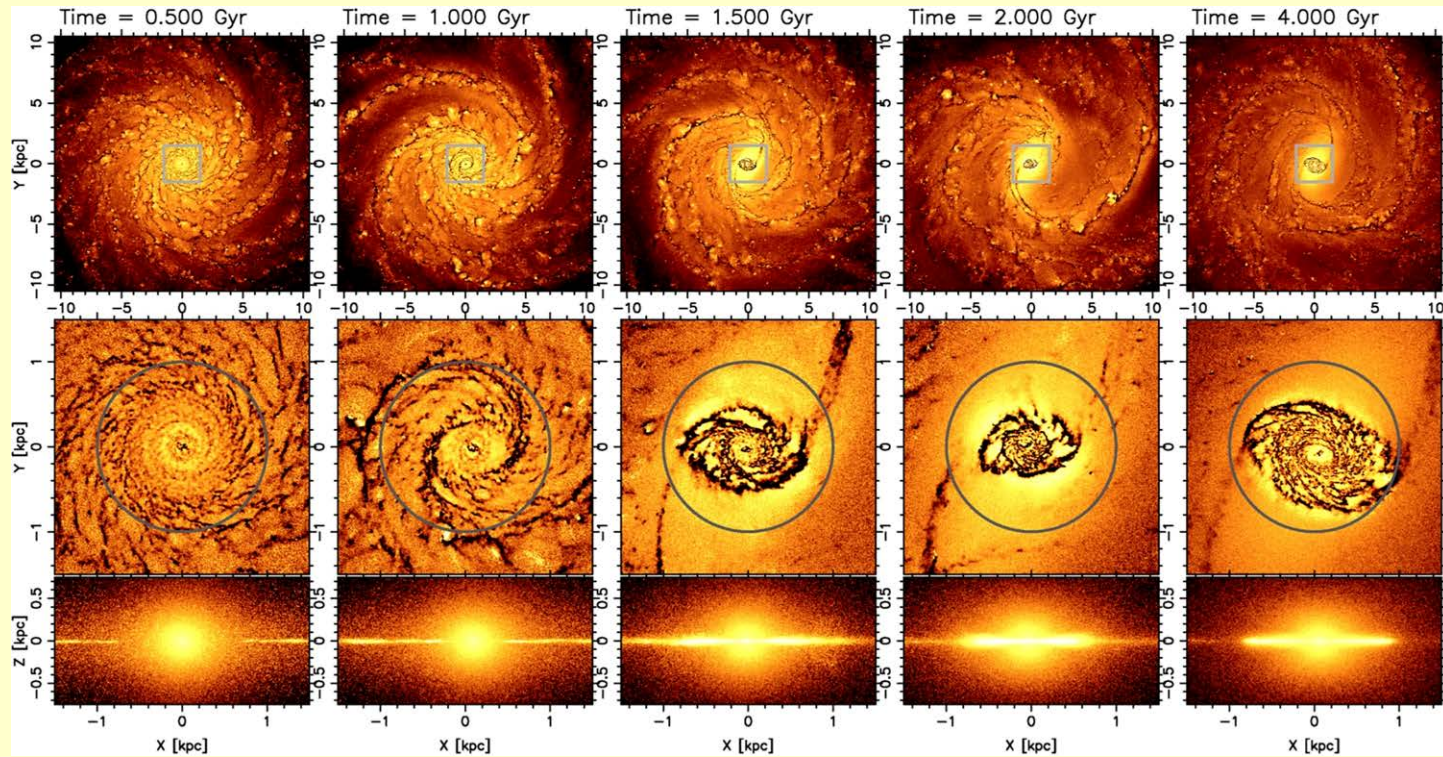
○固有運動情報をもとにディスクに属するミラ型変光星を
同定→ 銀河面に垂直な運動成分(非常に小さいはず)
の情報が必要! → **固有運動が必要**

同定されたミラ型変光星の**周期-年齢関係**、
=>年齢

→ **中心核ディスクの形成時期決定**

→ **外部バーの形成時期**の決定(ユニークな方法かも)

バーの形成

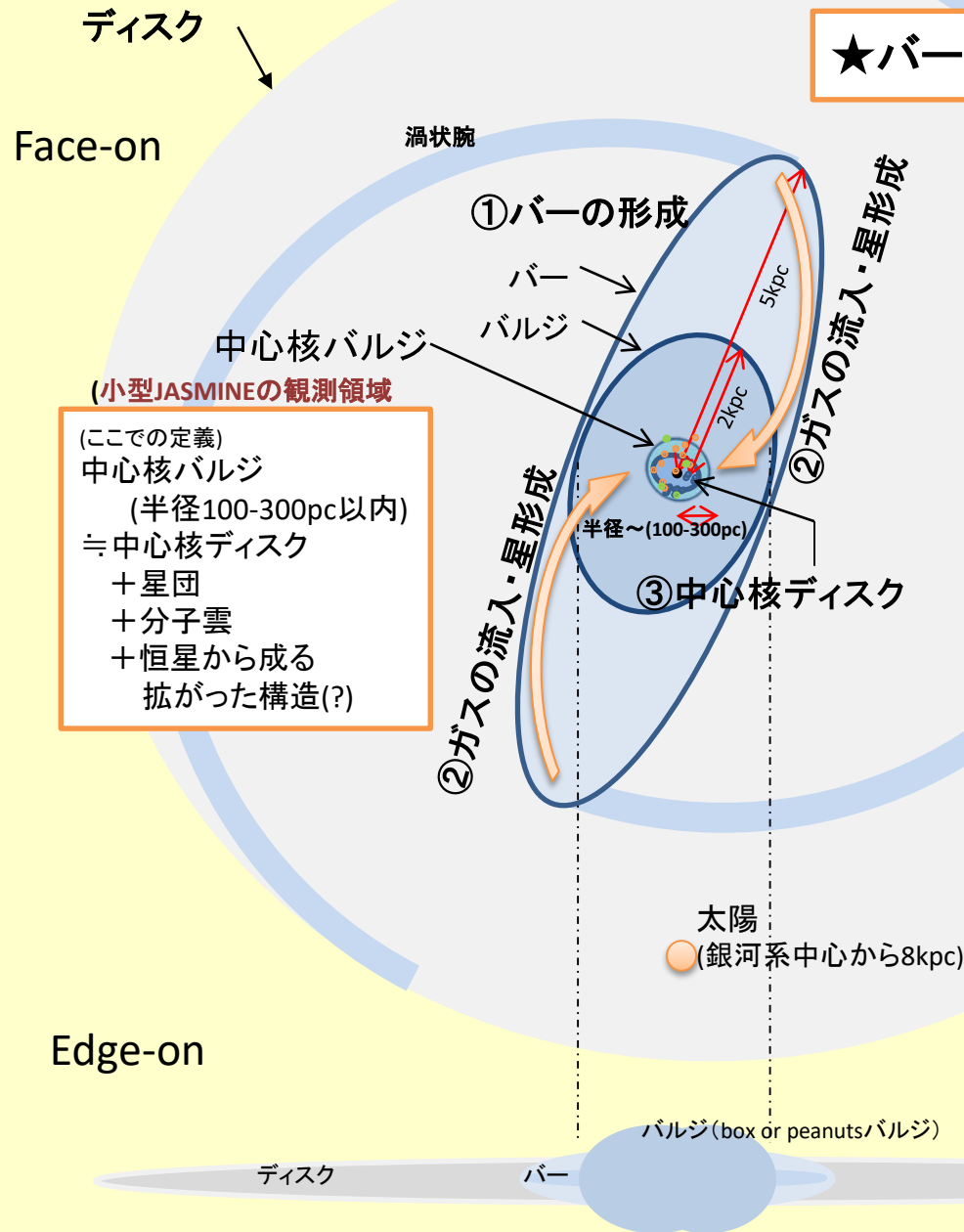


中心核ディスクの形成

Baba & Kawata (2019)

銀河系の構造(ディスク、バルジ、バー、中心核バルジ)

★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)

①が起こると直後に

②、③のプロセスが進む。

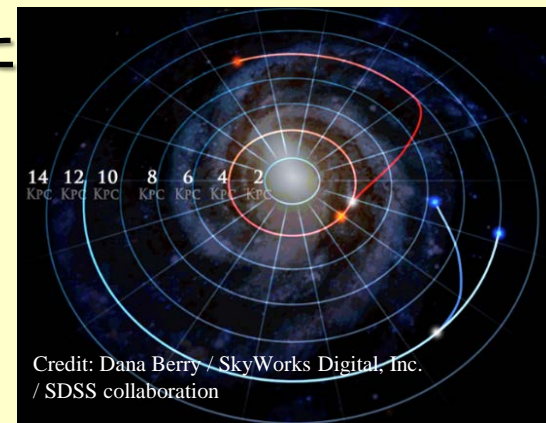
⇒バー形成時期≡中心核ディスクの形成時期

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。

バー構造とディスクを解き明かすための小型JASMINEの役割

* 以下の現象が大なり小なりバー構造and/orディスク構造に関係している。

- ・バルジの形成と進化(バーによるbuckling instability)
- ・運動星団(stream motion):
速度空間の複雑なサブ構造
- ・銀河面振動
- ・ディスクのガスを中心核バルジへ輸送する機構
- ・太陽系の誕生の現場と軌跡の解明



Radial Migration,
Wobble around the Galactic mid-plane

しかし、上記の問題は完全には解決されていない。

* 小型JASMINE:

○銀河中心考古学

→ 中心核ディスクの形成時期

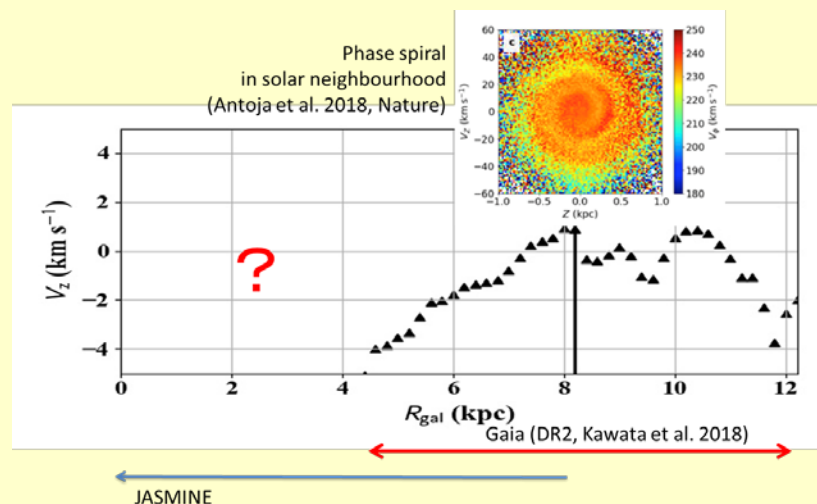
→ バー構造の形成時期:

重要なパラメータ

+ 内部ディスクでの銀震学

→ 重力場の評価=>ディスク面上での
ダークマターの密度評価

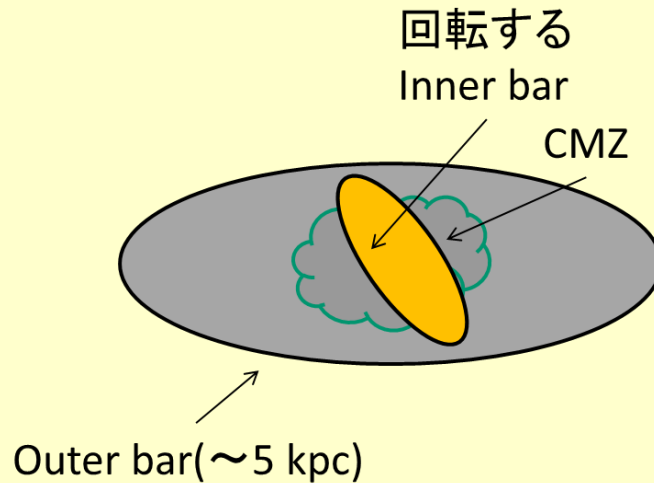
→ ダークマターの正体の制限



科学目標(2)

中心核バルジ内に回転する(ミニ)バー構造はあるのか??

もし存在すれば、パターンの回転速度を評価



* 早く回転するバー構造

→ ガスを中心領域に落としやすくなる

→ 巨大ブラックホールの質量増加

銀河系中心領域での爆発現象

科学目標(2)

中心核ディスク(または内部バー)周りの広がった空間の力学構造とその起源の解明

=> 古典的バルジの残存または巨大BHの落ち込みの痕跡？

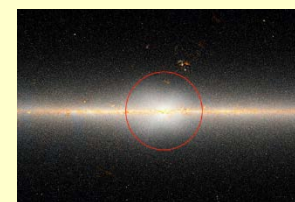
ケース1: この構造ができたときの名残を残しているか？！

=> 古典的バルジの残存？！

Classical bulge in M81



X-shaped distribution of stars in the bulge is visible.



ケース2: サブ構造が存在するか？

ケース3: 緩和状態の分布になっていれば...



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(1個のブラックホールの
質量は約10万倍太陽質量以上)の落ち込み

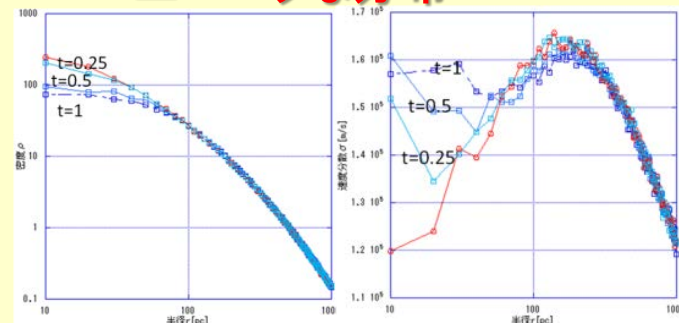
球状星団や巨大分子雲ではエネルギー解放が不十分

=> 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*の形成進化にきな制限を与える可能性がある。

[Credit: NASA, ESA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA).]

Image credit: NASA/JPL-Caltech/D. Lang

ユニークな分布



多様な目的: 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

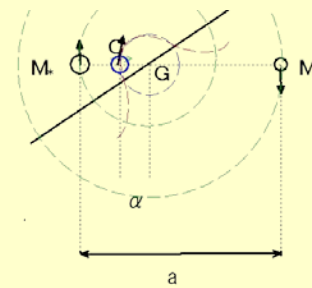
* 固有運動情報をもとにした(共通の固有運動をもつ)“隠された星団”の探査
(年齢が数億年程度以内)

+ 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 + 中間質量BH-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—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)

(プロジェクトサーベイ以外の)観測モード

★科学目標の例

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
決めておくプランを考える。

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

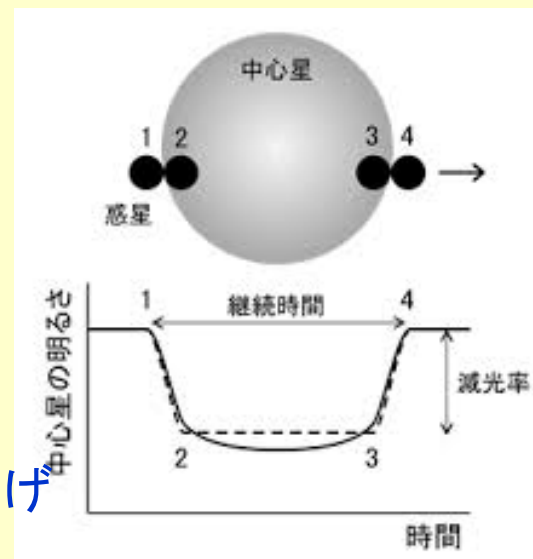
1. JASMINEチームと独立なサイエンス検討チームの立ち上げ

河原 創(東大) + **Exo JASMINE検討チーム**
(増田賢人(プリンストン)、
小玉貴則(ボルドー大学)、
小谷隆行(ABC/NAOJ)、
福井暁彦(東大)、山田亨(ISAS) (敬称略))

* 小型JASMINEの位置天文観測の
性能があれば、発見できる可能性あり!
他の衛星プロジェクトより有利性あり

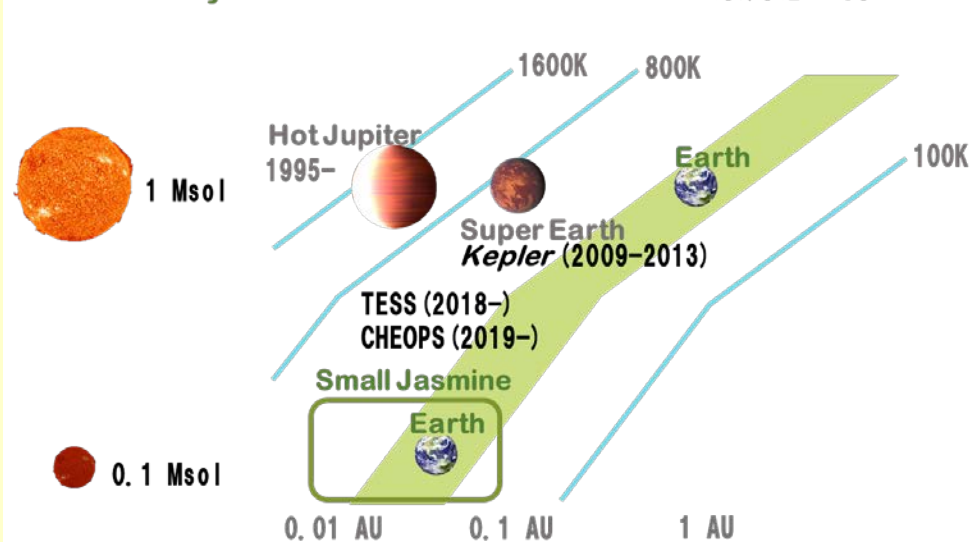
* 日本で衛星による系外惑星探査観測は
初めて!

=> 詳細は河原氏の発表を参照



Credit:天文普及研究会

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



★ 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

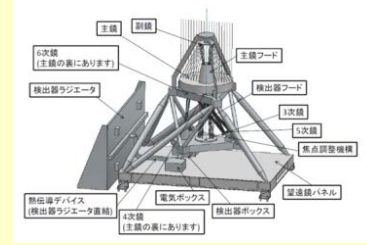
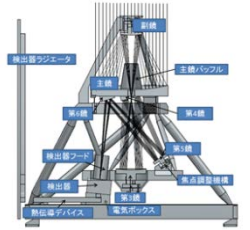
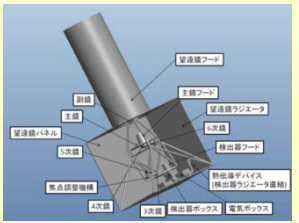
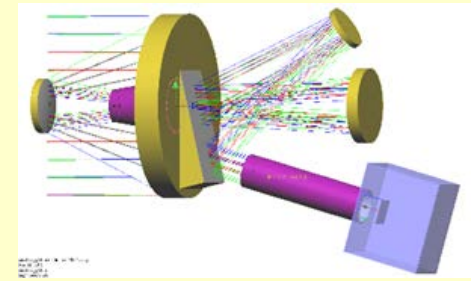
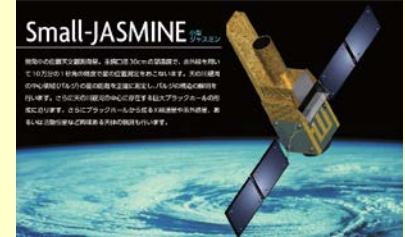
視野面積: 0.6度 × 0.6度

アストロメトリ用検出器: HgCdTe (4k × 4k) 1個 **H4RG (Teledyne社)**

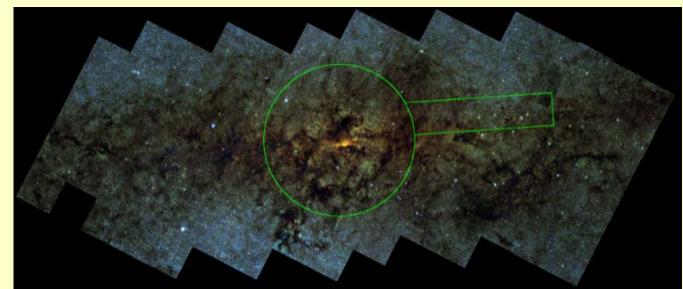
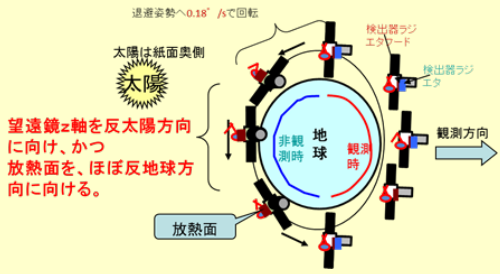
アストロメトリ用観測波長: **Hw-band (1.1 ~ 1.7ミクロン)**

衛星重量: 約400kg (RCS込み)

詳細は、ポスター発表P2.02 (鹿島、他)を参照



- 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)



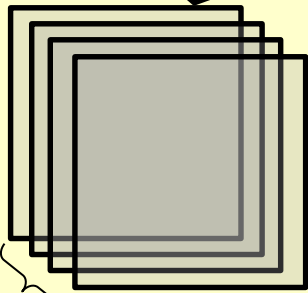
J, H, K tricolor composite image of the Galactic center area (imaged by SIRIUS on the Nagoya University IRSF 1.4m telescope: Nishiyama et al., 2004 Spring Astronomical Society Press Release). The survey area of Small-JASMINE is written with the green line.

★観測手法・データ解析の概要

詳細は、ポスター発表P2.01
(山田、他)を参照

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

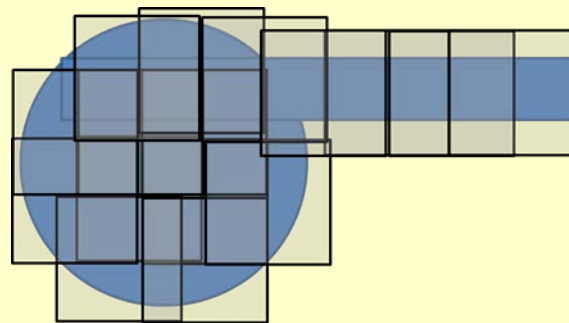


(ほぼ同一視野の)単位フレーム約20枚
=小フレーム

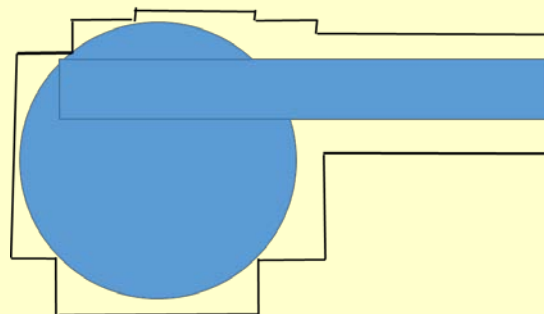
約3年間の運用期間
(1年のうち、春と秋の約半年観測)

(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

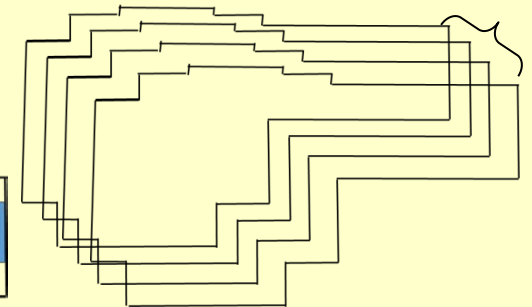


小フレーム(視野サイズ)



大フレーム
(銀河系中心方向の観測領域全域)

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

★25マイクロ秒角という微細な角度の精度を どうやって達成できるのか？

* 東京から見て、100km先にある、富士山頂に立っている人の髪の毛1本の太さの約4分の1を見込む角度



★データ解析の工夫と安定な装置の開発

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。

小型JASMINEの場合

- 同じ星に対して約15～60万回の測定

年周期楕円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。

→ 相対位置の変動は、“誤差”としてモデル化(関数形でフィットする)

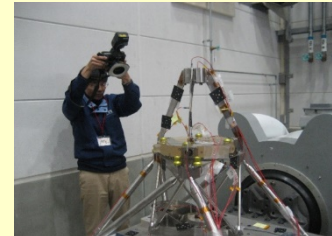


モデルの単純化が必要

システムに工夫が必要

⇒ 熱構造安定、指向安定性など

熱構造安定な望遠鏡構造：我々が企業と一緒に開発した
熱膨張率が $0 \pm 5 \times 10^{-8} / K$ のスーパー・スーパーインバーを支柱に
用いて、また同様に低膨張なCREACERAMという素材で作った
鏡を使って望遠鏡を構成。さらに、鏡と支柱の間のつなぎにも工夫を
施す。



★世界のコミュニティとの国際協力

(1) 国際天文学連合組織委員会からの推薦

*IAU Commission A1のpresidentから正式な推薦

(2) データ解析に関するGaiaとの密な協力体制

*Gaiaのデータ解析チームからの参加

(i) アstrometryデータ解析: ハイデルベルグ大学とドレスデン大学から参加意思表示の正式レター
またDLRからもLOI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

(3) 検出器ユニット開発に関する米国チーム(25名程度)との協力

*検出器boxユニット(検出器、ASIC、熱制御のための検出器box、制御電子回路等)についての製作、試験、納入を依頼した。

*NASAのPartner Missions of Opportunityに応募中。

(4) ESAによる地上通信局のサポート(サイエンスデータのダウンロード)

宇宙研とESAとの調整が開始している。ESA側は前向きな対応。

(5) 中心核バルジ研究での他のプロジェクトとの国際協力

*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。

*他の分光、測光観測とも連携を進める(MWM, MOONS, GALACTICNUCLEOUS, VVV等)

(6) 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。

GaiaNIR: (全天サーベイ型近赤外線衛星、
打上目標 2040年代: ESAへ申請予定)

Post-Gaia候補

PI: David Hobbs @ Lund observatory, Sweden



**世界初の赤外線位置天文観測衛星として
小型JASMINEが先駆けとなり、日本も貢献していく**³⁷

★おわりに

位置天文観測：地味だが。。。



距離をはかる営み：人類の認識の拡大
星の(天球面上での)地図と運動

→天の川の謎や巨大ブラックホールをはじめ
様々な天体の謎が解き明かされていく。

Jasmine

小型JASMINEへのご支援をよろしく申し上げます！