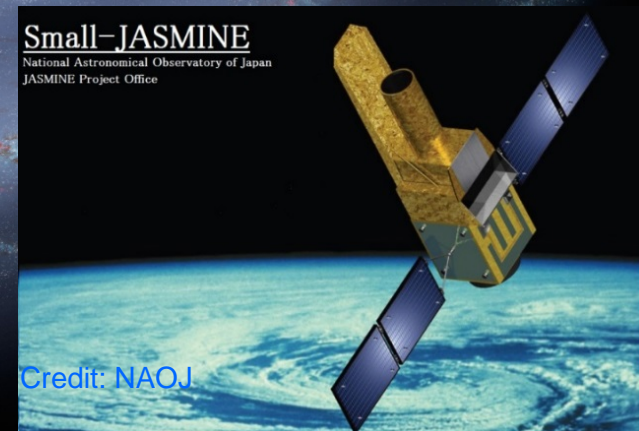


# JASMINE (赤外線位置天文観測衛星) の 全体的状況

郷田直輝 (国立天文台JASMINEプロジェクト)  
赤外線位置天文観測衛星 (小型JASMINE)  
プリプロジェクト候補チーム



Credit: NASA



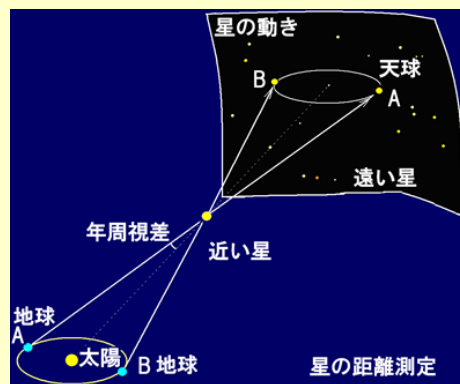
# § 1. 位置天文観測とは？

## ★位置天文観測(astrometry)

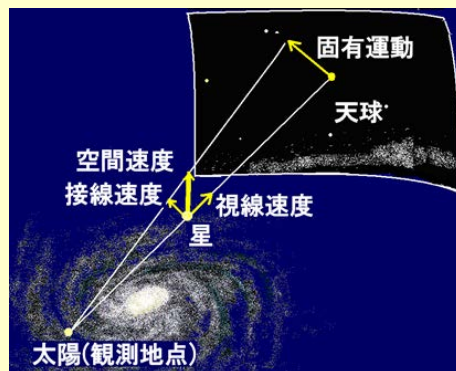
\* 星の撮像観測を行い、その観測で得た**天体の天球面上での位置の時間変動(時系列データ)**とそこから導かれる**年周視差**と**固有運動**等の位置天文パラメータをカタログとして供出する。

\* 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



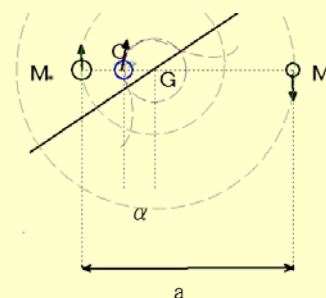
星の接線速度



\* 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



Credit: ESA



# 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**（ $10\mu$ 秒角クラスの位置決定精度）、**量**（15億個以上の星）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

→ 2022年末まで運用延長決定

→ さらに2025年末まで延長(見込み)

## 天の川銀河の研究が大進展！！

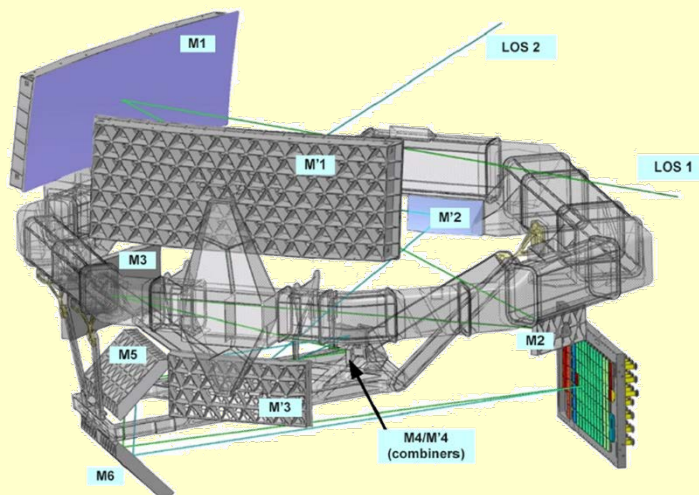
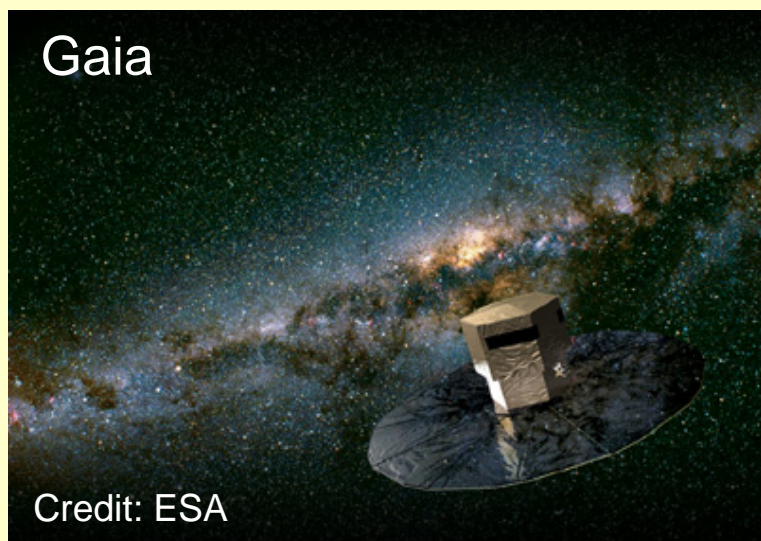


Figure courtesy EADS-Astrium

# ★Gaiaカタログのリリース:

\* 科学運用: 2014年～2019年

→ 2022年末まで運用延長決定

→ さらに2025年末まで延長(見込み)

## 中間リリース

初回のデータ(DR1): 2016年9月14日に公開

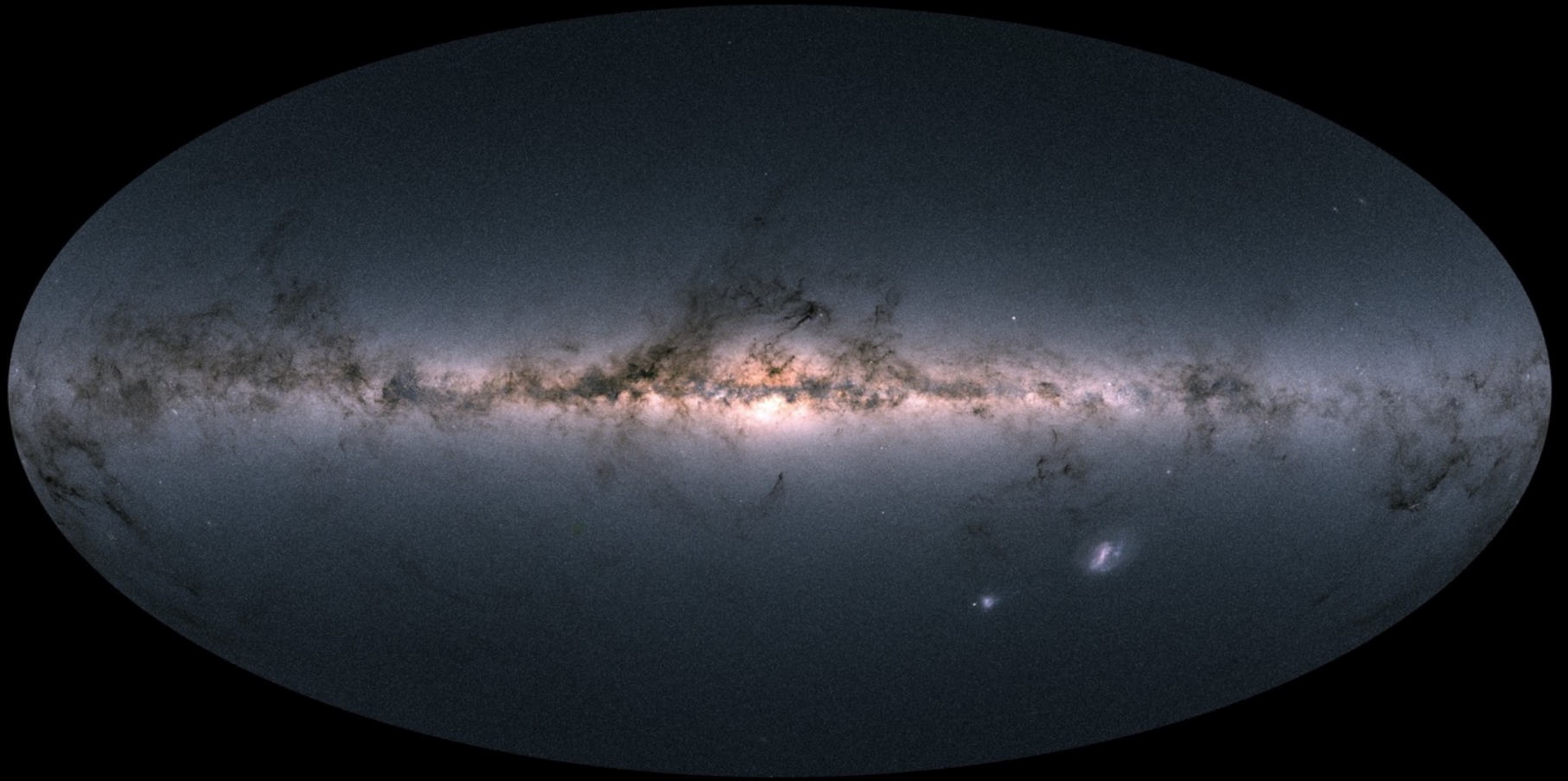
2回目のデータ(DR2): 2018年4月25日に公開

3回目は早版(EDR3)は、2020年12月3日に公開

3回目の完全版(DR3)は、2022年前半に公開予定。

\* DR4(ノミナル運用+ $\alpha$ )、  
DR5(延長含)の公開日は未定

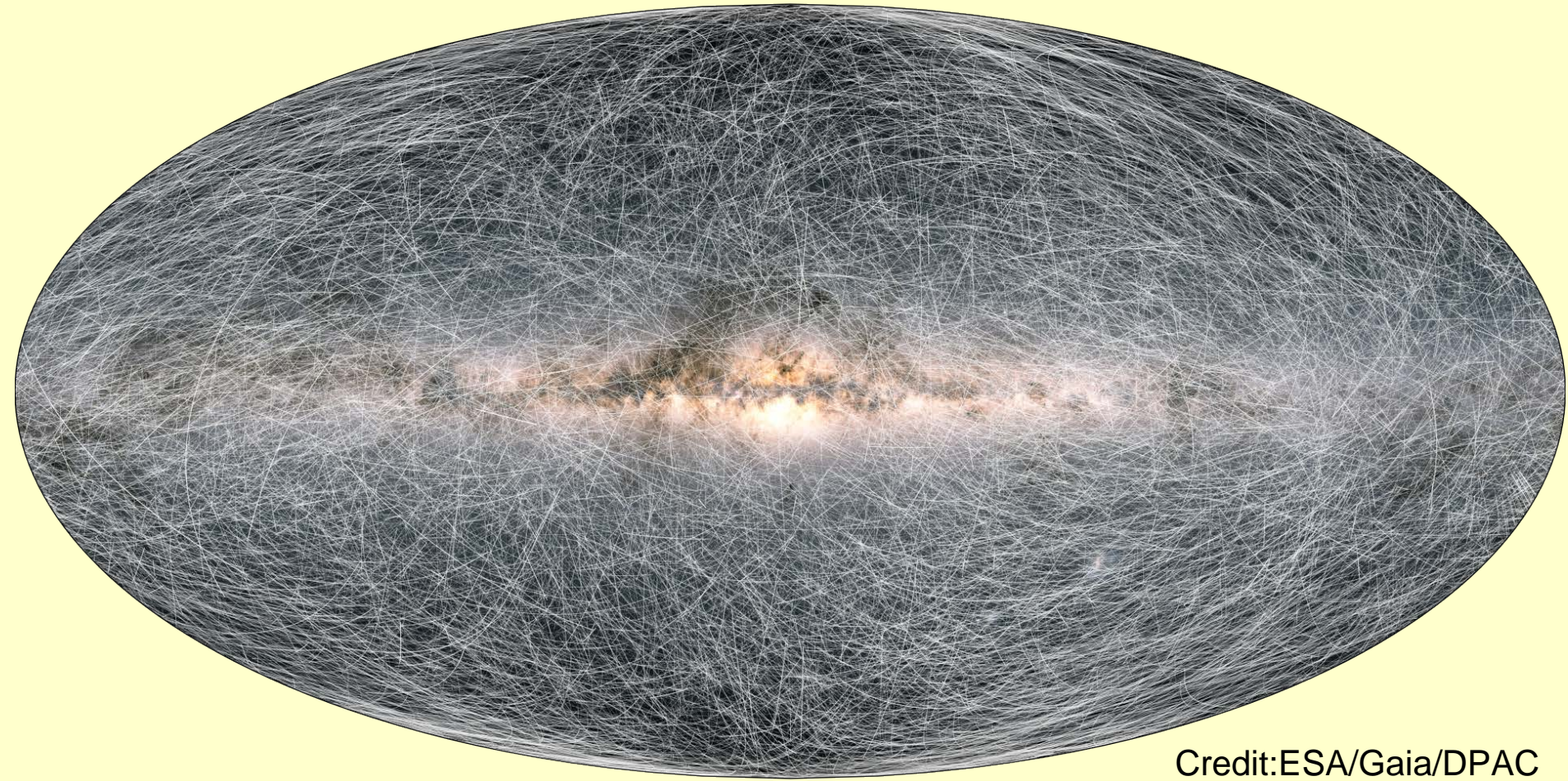
Gaia DR2（２回目の中間データ）： 2018年4月  
Gaiaでみた天球の星（１３億個）



Credit:ESA/Gaia/DPAC



# Gaia EDR3でとらえた星の運動



Credit:ESA/Gaia/DPAC

100pc以内の4万個の星に対する今後40万年間の軌跡(予想)



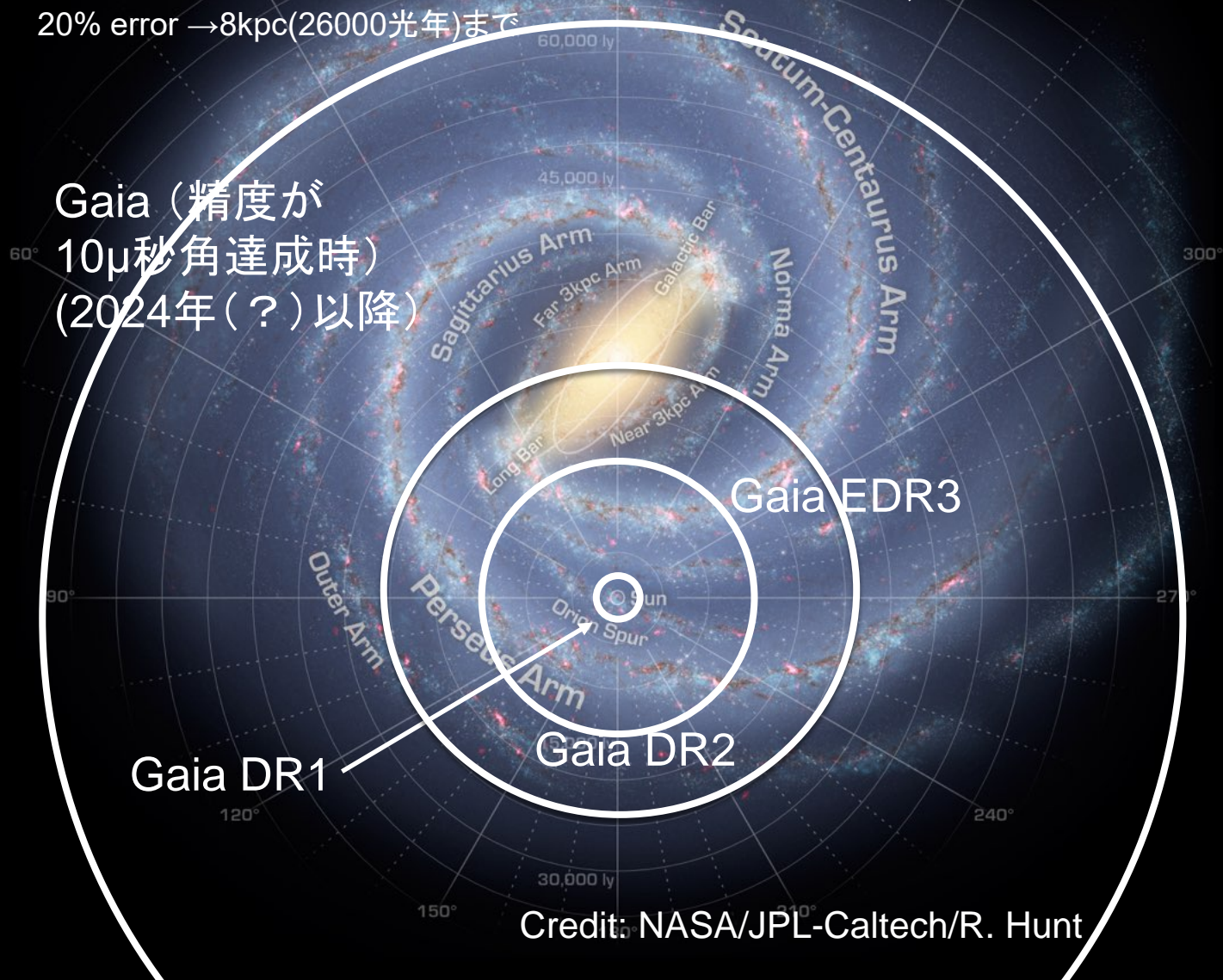
## 星までの距離の誤差 (3等級<G<15等級)

Gaia DR1(2016年9月公開): 年周視差の誤差:0.3 ミリ秒角,  
20% error →670pc(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 →5kpc(16000光年)まで

Gaia EDR3(2020年12月): 年周視差の誤差:0.02 ~0.03 ミリ秒角,  
20% error →8kpc(26000光年)まで

Gaia (精度が  
10 $\mu$ 秒角達成時)  
(2024年(?)以降)



Credit: NASA/JPL-Caltech/R. Hunt

# \* Gaiaの成果例

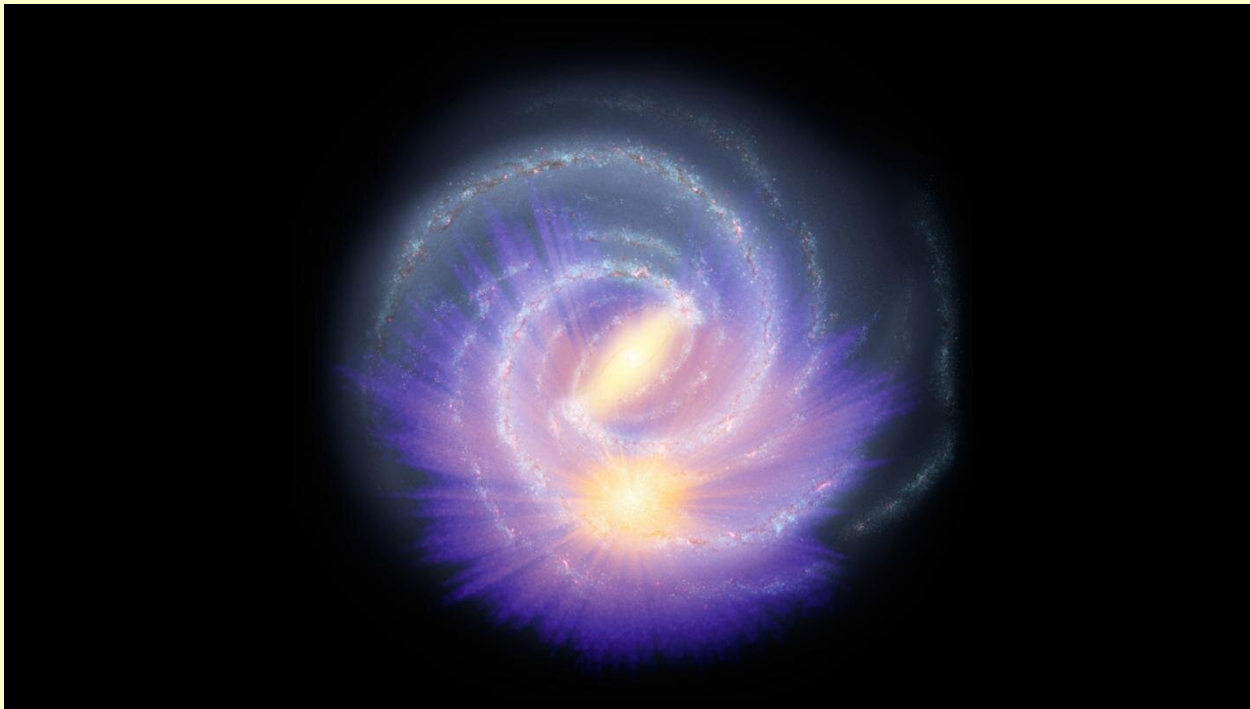
## 2020年12月時点で4300本以上の論文

- 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atalog
- 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～  
(→EDR3では、anti-center方向に拡張)
- 銀河面振動(さざ波)の発見
- 太陽系の加速運動を初めて検出(EDR3)
- その他、多数

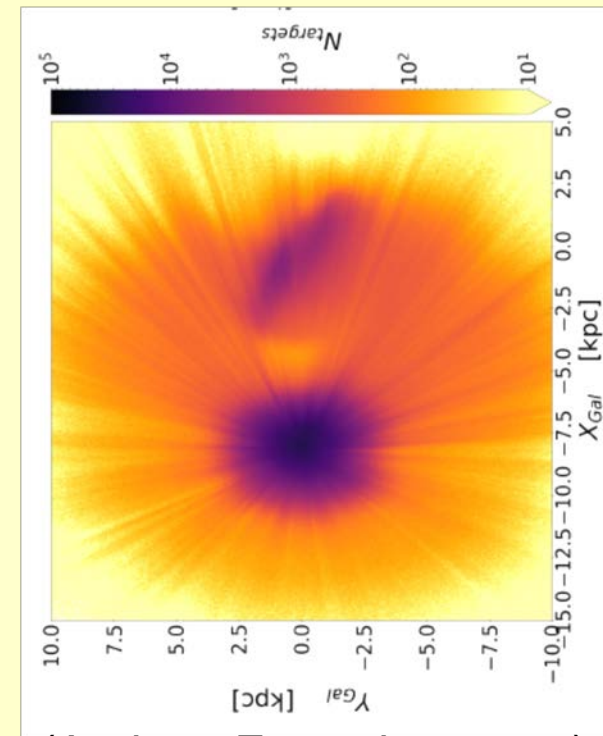


# \* バー構造の実視

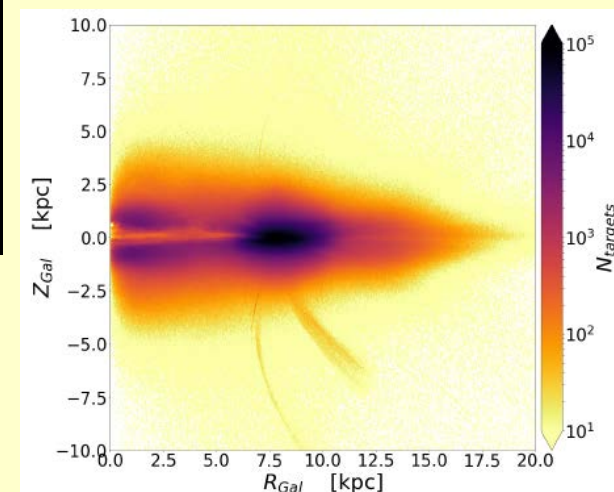
Gaia DR2



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

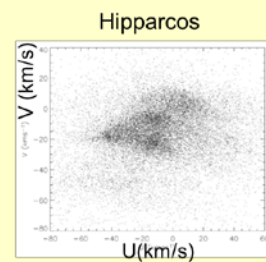
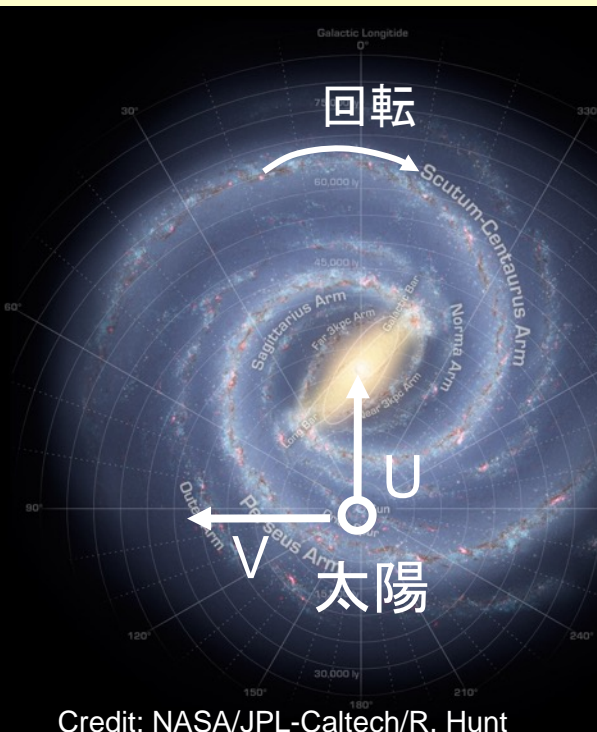


(Anders, F., et al., 2019)



# \* 太陽系近傍の運動星団 ～複雑な速度構造～

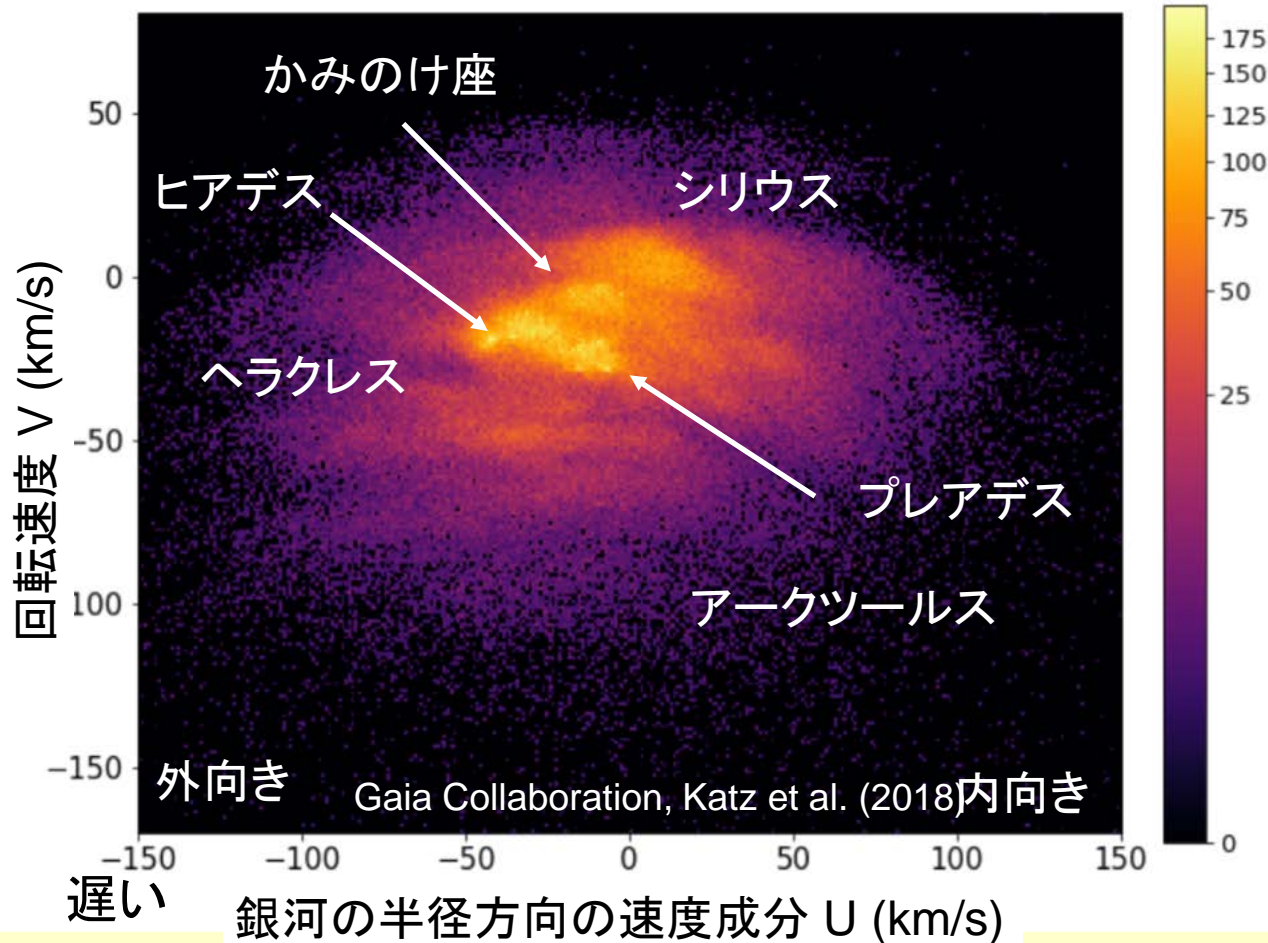
U, Vは局所静止基準系から  
みた速度



Antoja et al. (2008)

速い

Gaia DR2



バー構造や渦状腕の

影響の可能性(非軸対称

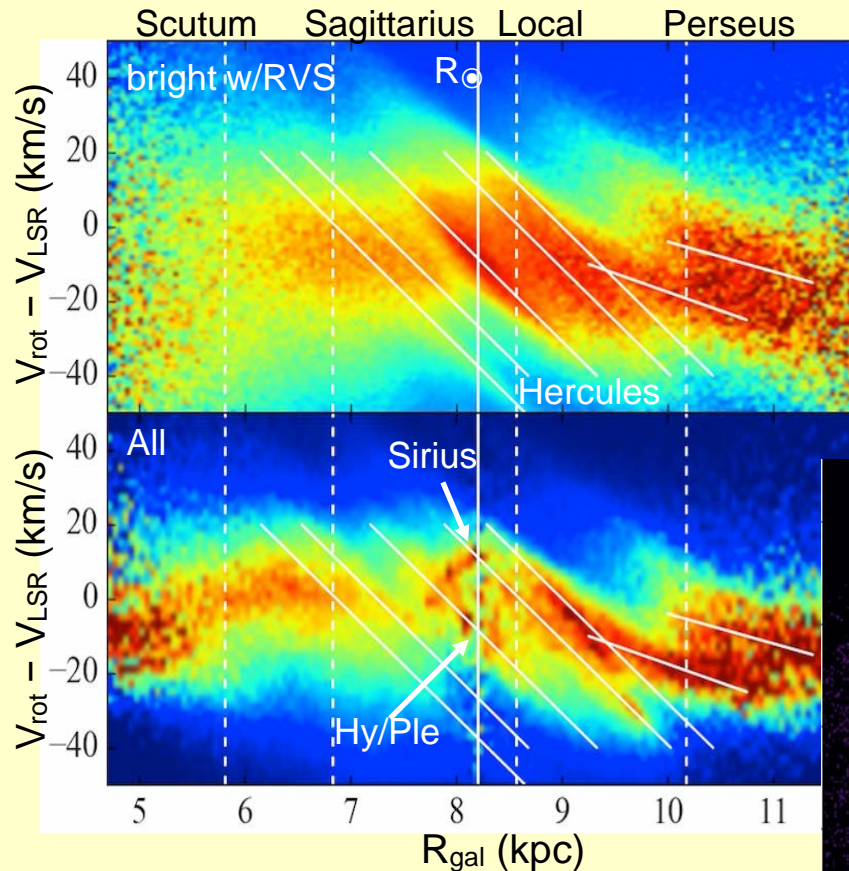
構造による共鳴効果→軌道が分岐し別種類の軌道に分かれる)、

他、矮小銀河の残骸

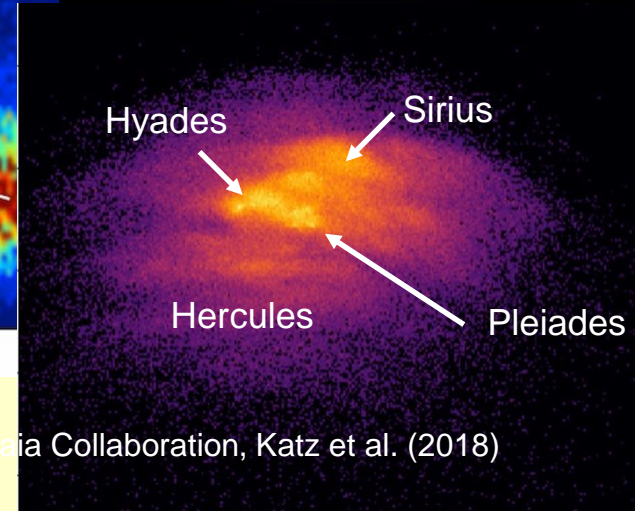
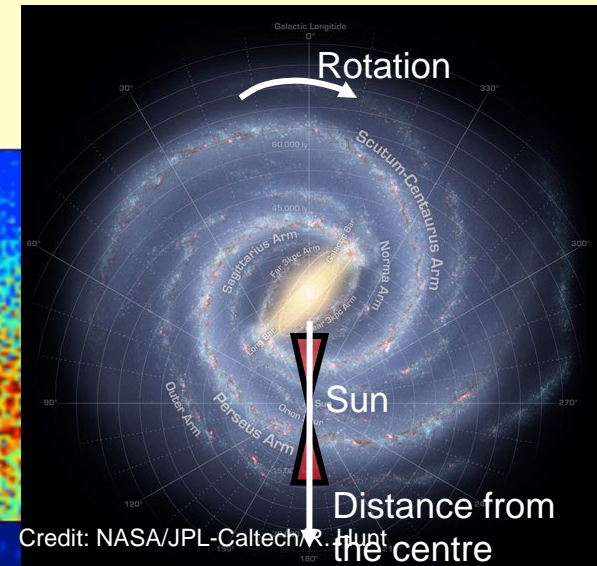


Gaia DR2=>

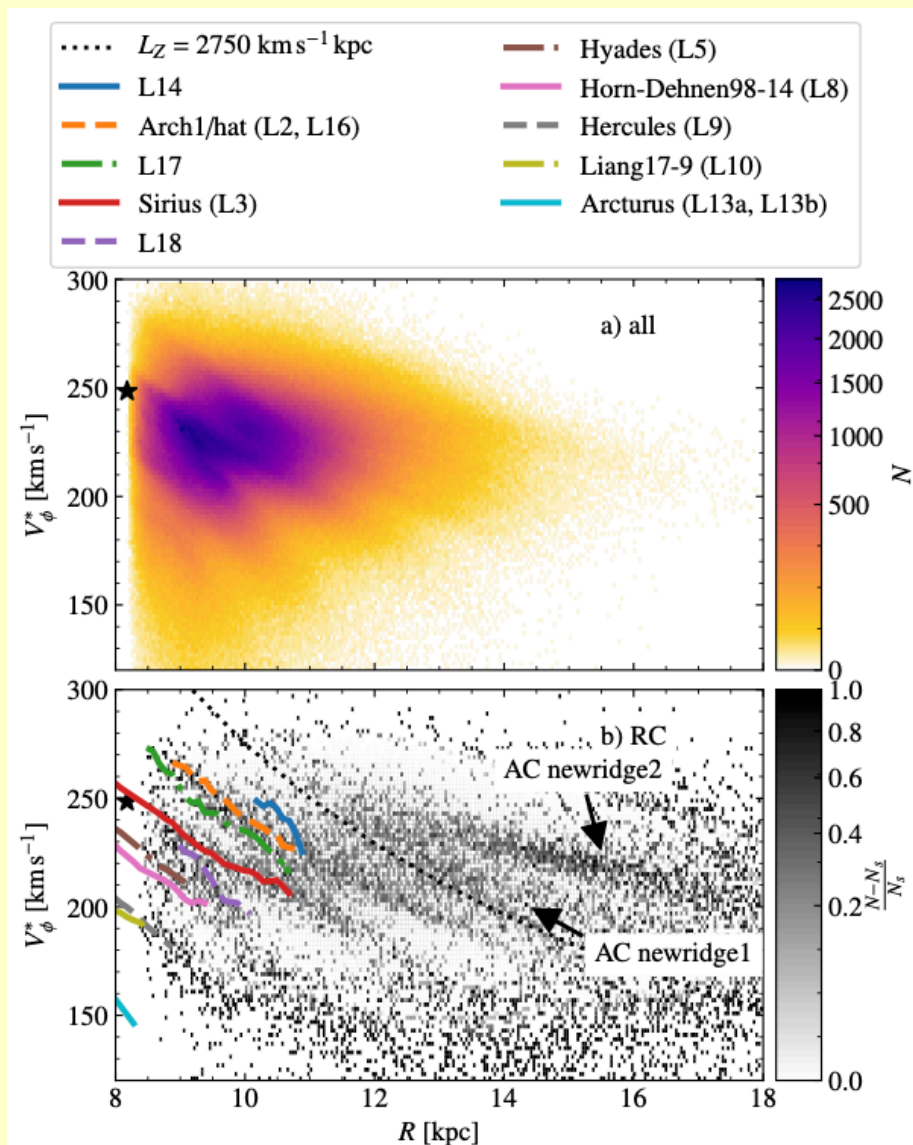
太陽系近傍と同様な運動集団(sub-structure)が  
他の箇所にも拡がって存在している



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



Gaia EDR3 → Anti-center方向にも運動星団が続き、  
新しい運動星団も見つかった。



Gaia Collaboration,  
Antoja et al. (2020)



# \* 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

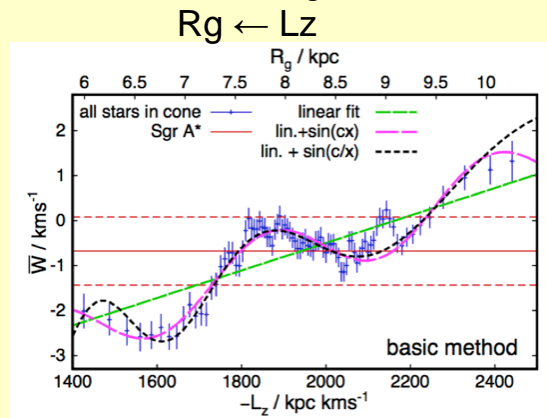
矮小銀河の衝突、バー構造や渦状腕の影響の可能性<sup>3</sup>

# 銀河面に垂直方向の振動と 半径方向の平均速度

## 銀河半径方向の振動

### 垂直方向の平均速度

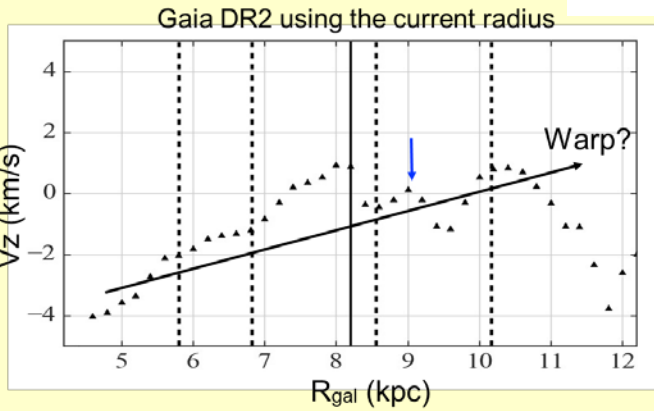
Gaia DR1 solar neighbourhood



Schönrich & Dehnen (2018)

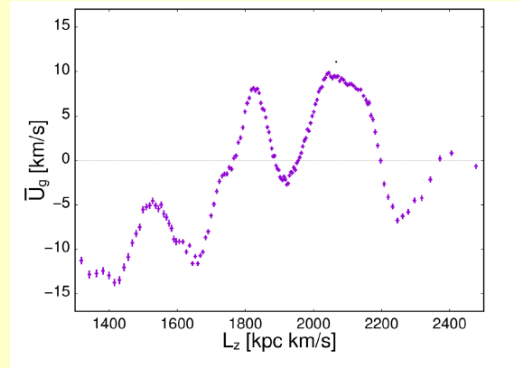
Gaia DR2 => 銀河系ディスクは、滑らかに回転しているのではなく、摂動を受けている。

Gaia EDR3 → anti-center方向にも続いている

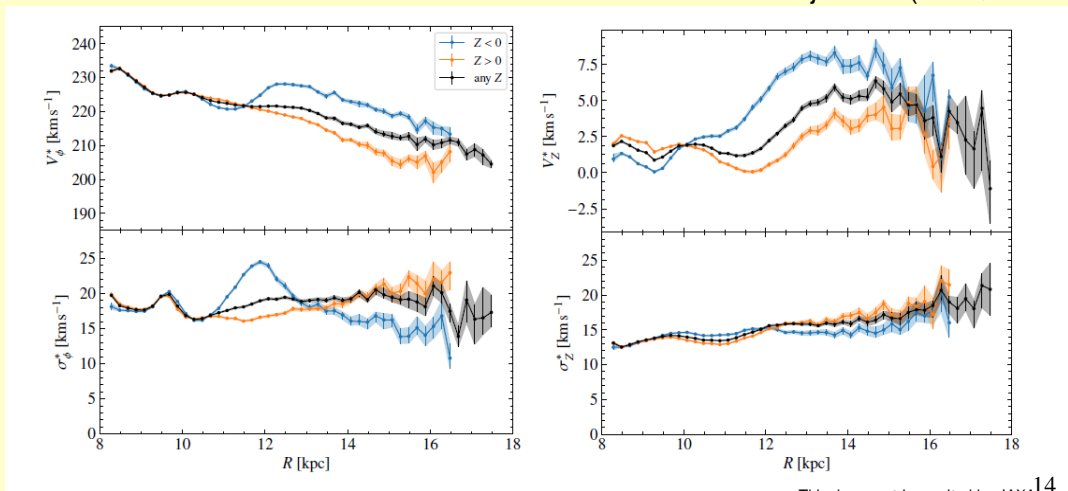


Kawata et al. (2018)

Gaia Collaboration, Antoja et al. (2020)



Friske & Schönrich (2019)





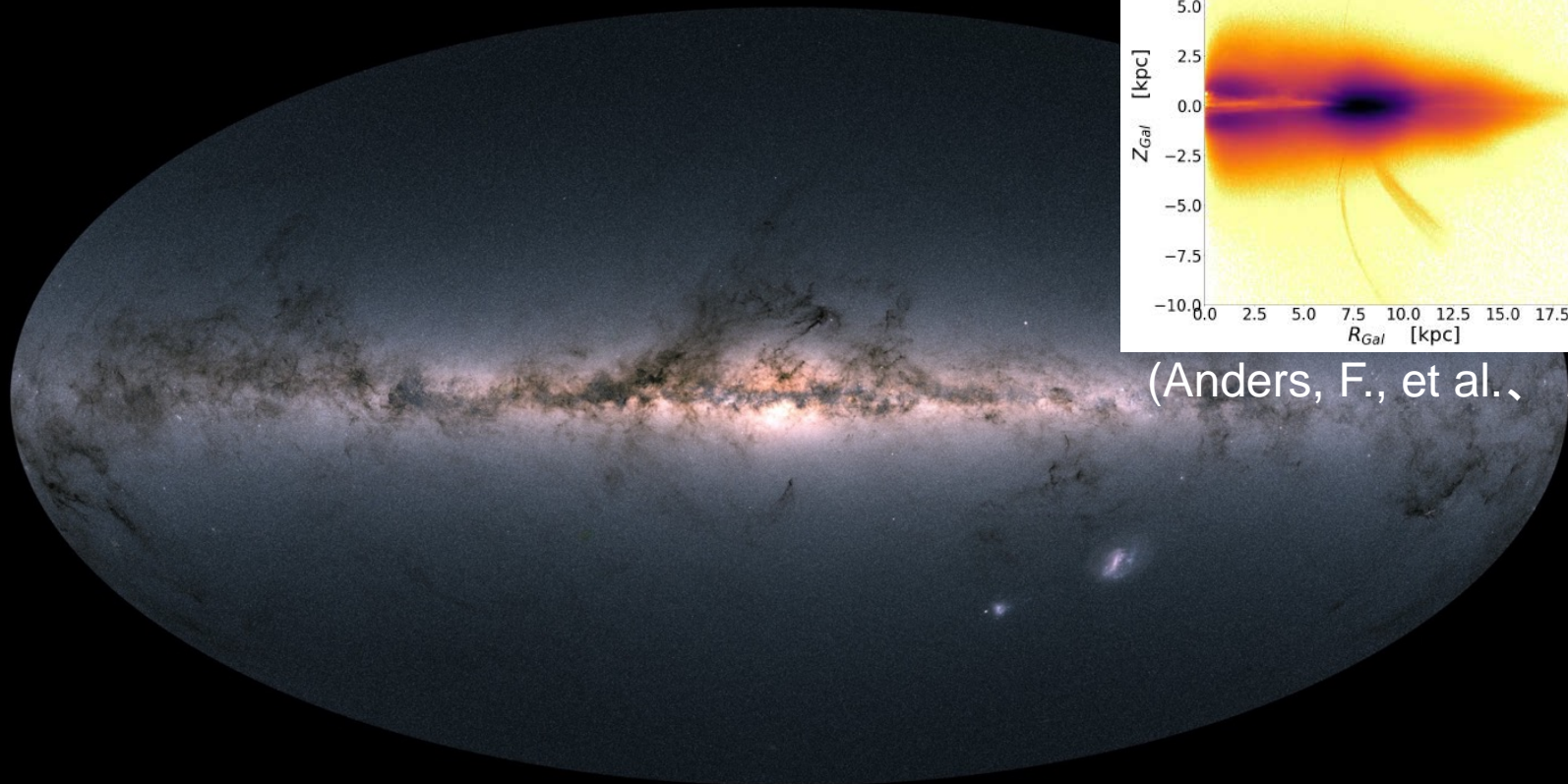
以上のようにGaiaはすでに数々の成果  
今後、ますます期待できる！

- ・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

さらに、天の川銀河の中心方向は測定精度が比較的悪い



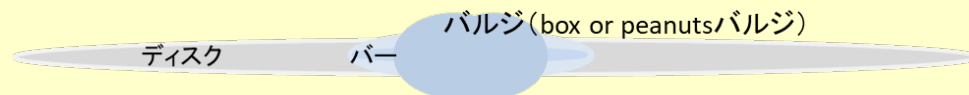
(Anders, F., et al., 2019)

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

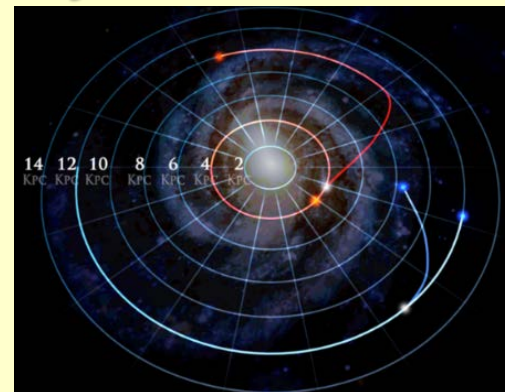
# \* 天の川銀河の中心部は“歴史”の宝庫

例：**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? 軌道の共鳴現象?)
- ・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



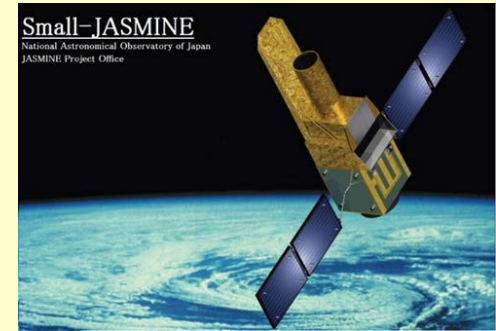
バー構造が本当に原因か? (渦巻き構造や矮小銀河の衝突効果との比較)  
その影響はどの程度か?

バーの形成時期、パターンの回転速度とその時間変化が  
重要な物理情報

→ **天の川銀河の中心部(中心核バルジ)に解答が  
隠されている!!**



# 2. JASMINE計画

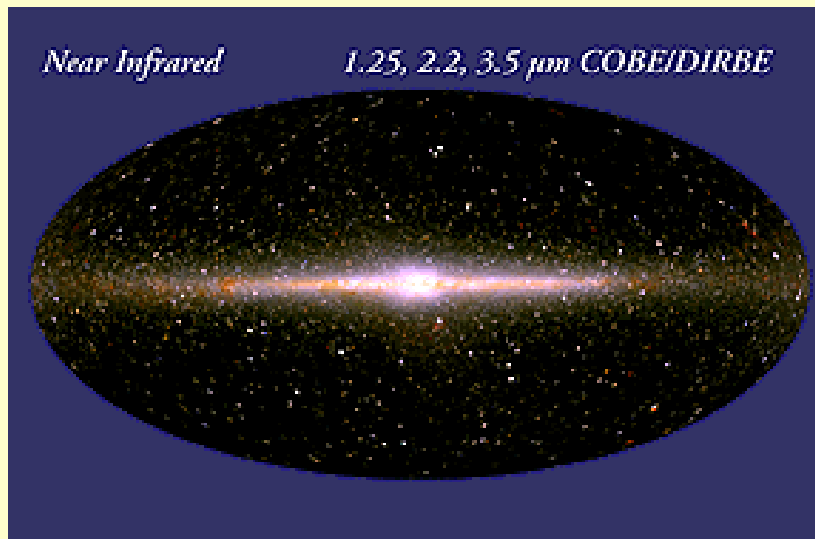


## 赤外線位置天文観測衛星計画



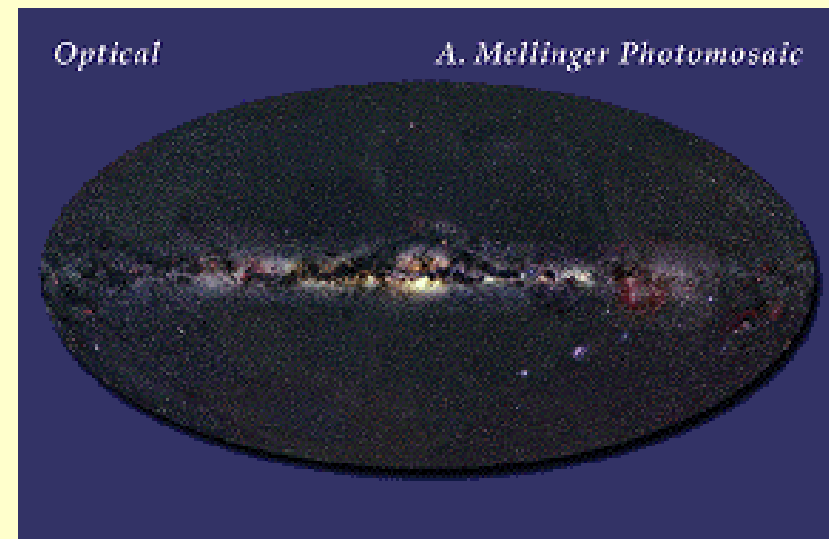
### 近赤外線による観測

(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ミッション」(JASMINEと記す)

◎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。



Credit:JAXA

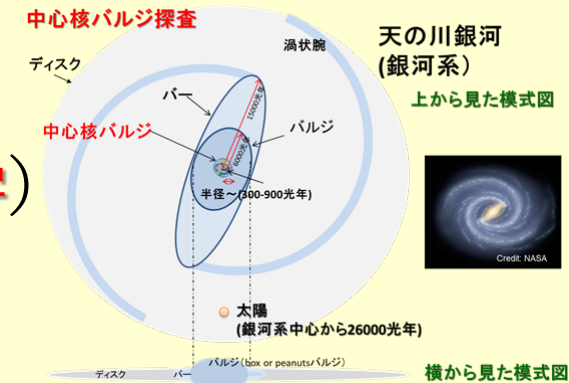
現在、Pre-Phase A2段階  
Phase Aへのステップアップを目指して  
概念検討を進行中。

イプシロンロケットでの打ち上げ(内之浦)

## 2-2 JASMINEの科学目標と期待される成果

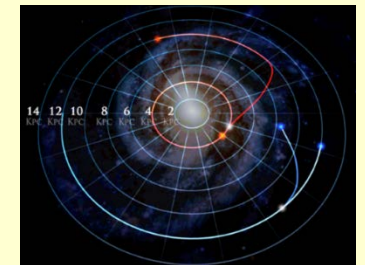
1. 赤外線による超高精度位置天文観測により、距離2万6千光年に位置する星の距離と運動を測定し、天の川銀河の中心核構造と形成史を明らかにする。

➡ 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**）



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究する。

➡ 中心核ディスクの形成時期、内部ディスクの物理情報  
➔ 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。

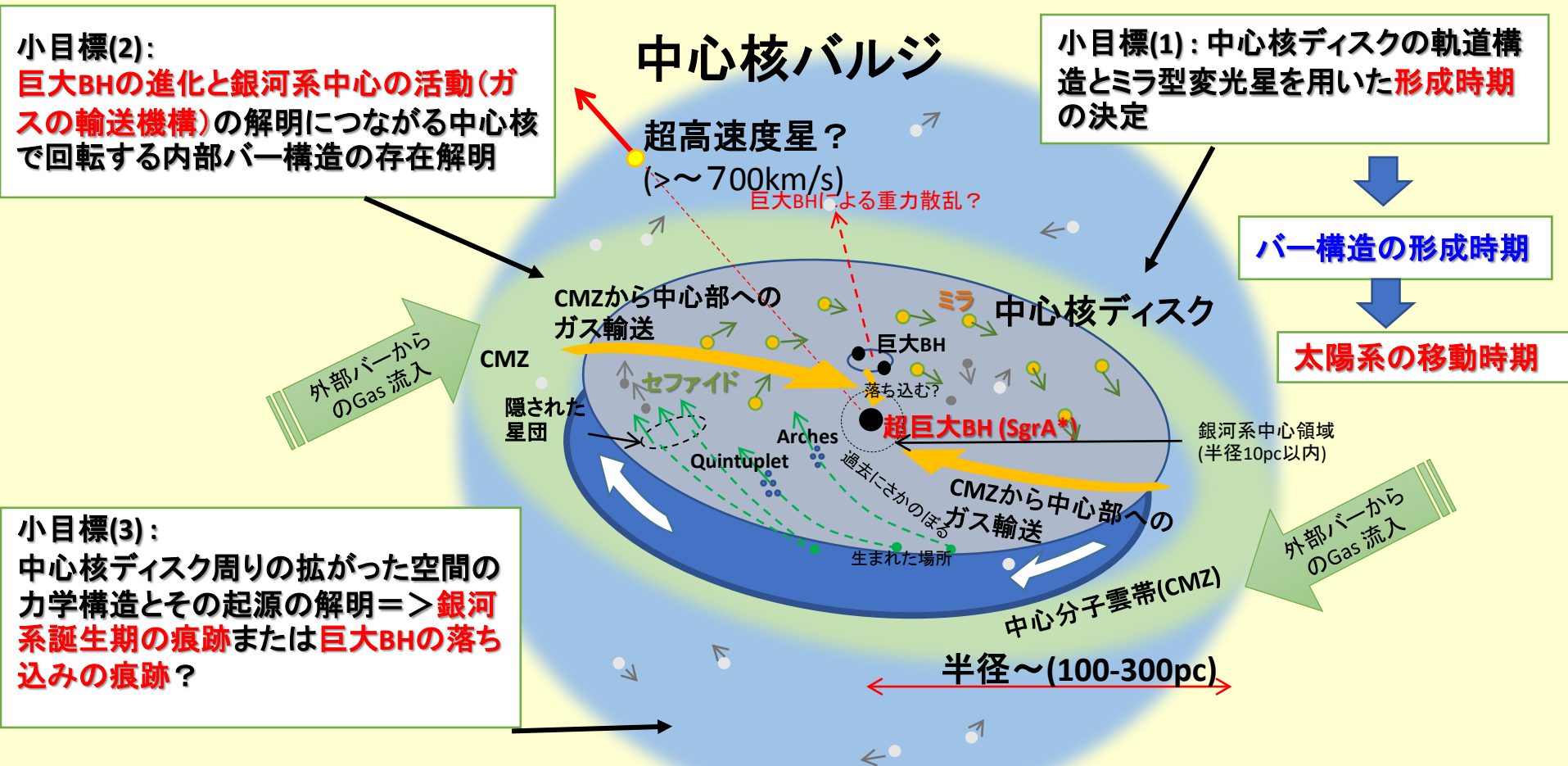


3. 赤外線位置天文観測で達成される高精度な測光能力を活かした時間軸天文観測により、**生命居住可能領域にある地球に似た惑星**を探索する。



# ★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 \*\*\*

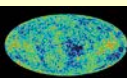
隠された星団の同定  
 $\Rightarrow$  星の形成史  
(ディスクからのガスの流入史)

星の位置運動情報から星団の誕生した領域を探る。

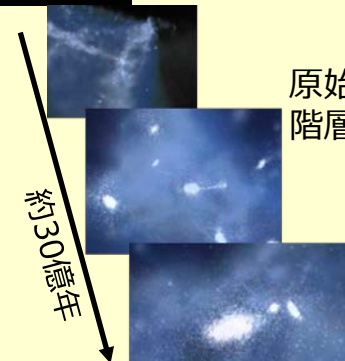
超高速度星はどうして存在するのか？

多様な天体の探求:  
重力レンズ天体、  
コンパクト天体等

## 天の川銀河の種が誕生

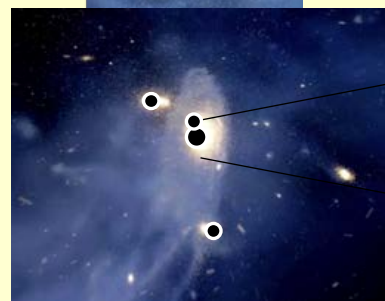


インフレーション  
ビッグバン



原始銀河の  
階層的合体成長

約30億年

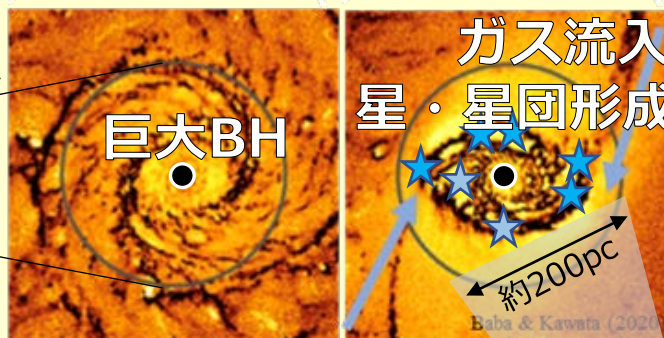
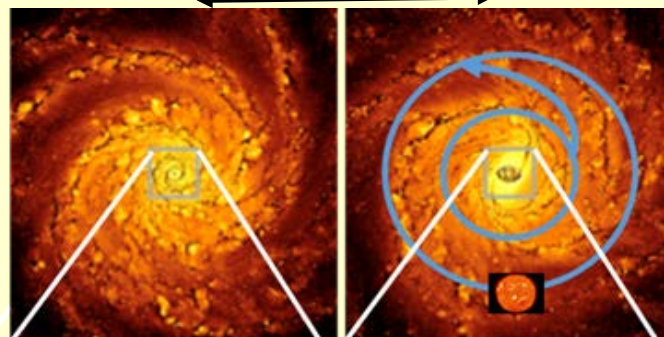


銀河中心考古学イベント①

古典的  
バルジ

## バー構造の出現

出現前 約10億年 出現後



銀河中心考古学イベント②

## 天の川銀河全体への影響

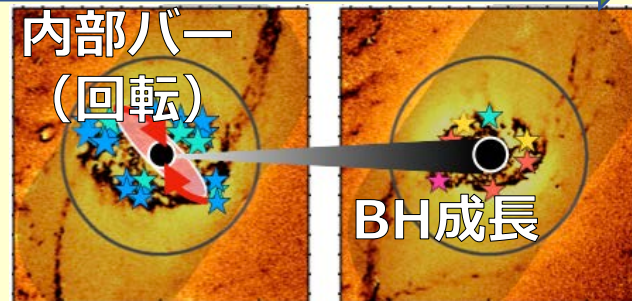
太陽は内部で誕生(!?)→ 惑星形成  
内部から外側に大きく 影響!  
移動を開始 (!?)

気候変動?  
生命進化?  
人類誕生?



→ 分野横断型  
学際研究へ発展

内部バー形成⇒巨大BH成長⇒内部バー消失?



銀河中心考古学イベント③

中心核ディスクの不安定性

→ 内部バー形成

→ 巨大BHへのガス供給

→ 内部バーの破壊? (共進化?)

小目標(2)

バー形成による急激なガス流入

→ 爆発的星形成 (スターバースト)

→ 中心核ディスク形成

(バーの年齢 ≒ 中心核ディスク年齢)

小目標(1)

中心部での最初の星形成

→ 古典的バルジ形成

(現在も中心部に残存?)

巨大BHの合体成長?

小目標(3)

中心核バルジの星の位置・速度の観測から  
3大イベントの解明を目指す。



オリジナル版  
馬場淳一作

This document is provided by JAXA.

# ★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  $\mu\text{m}$ )の波長域における撮像観測(→ 国産赤外線検出器を搭載の場合は変更)
- ・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

## ○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)

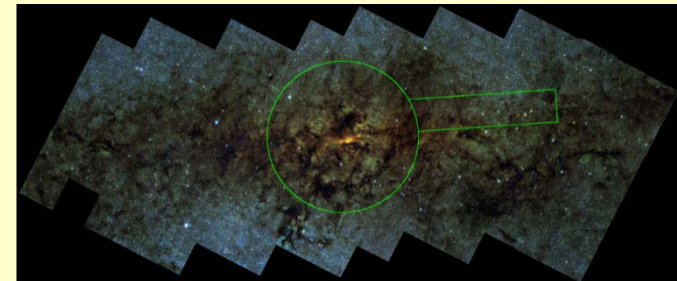
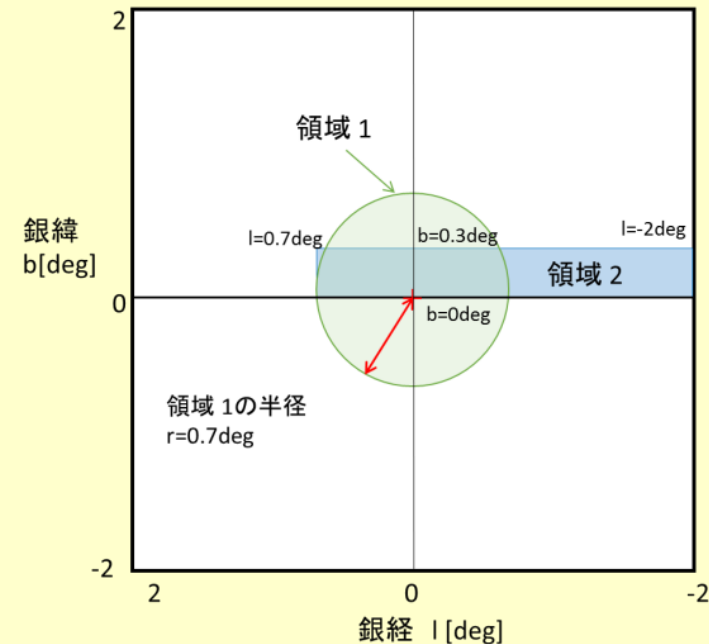
**12.5等級<Hw<15等級の星**

**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)**



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.



科学目標3と期待される成果 参照:河原氏のポスター講演(g04-09)

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索する。

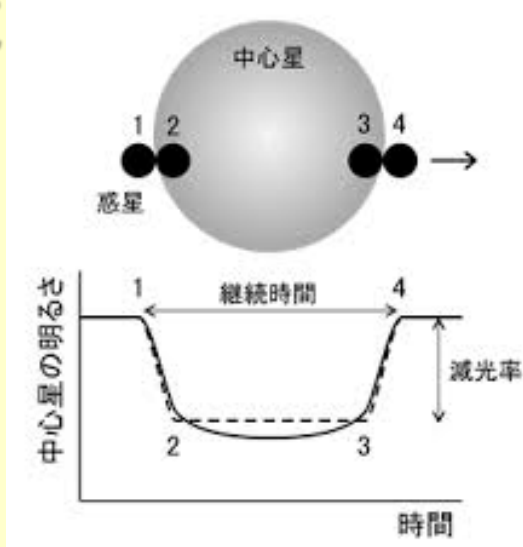
**トランジット観測によるM型星周りの  
ハビタブルゾーンにある地球型惑星の探索**

JASMINEチームと**独立なサイエンス検討チームの立ち上げ**  
(データ解析ソフトウェアの開発は協同で行っている)

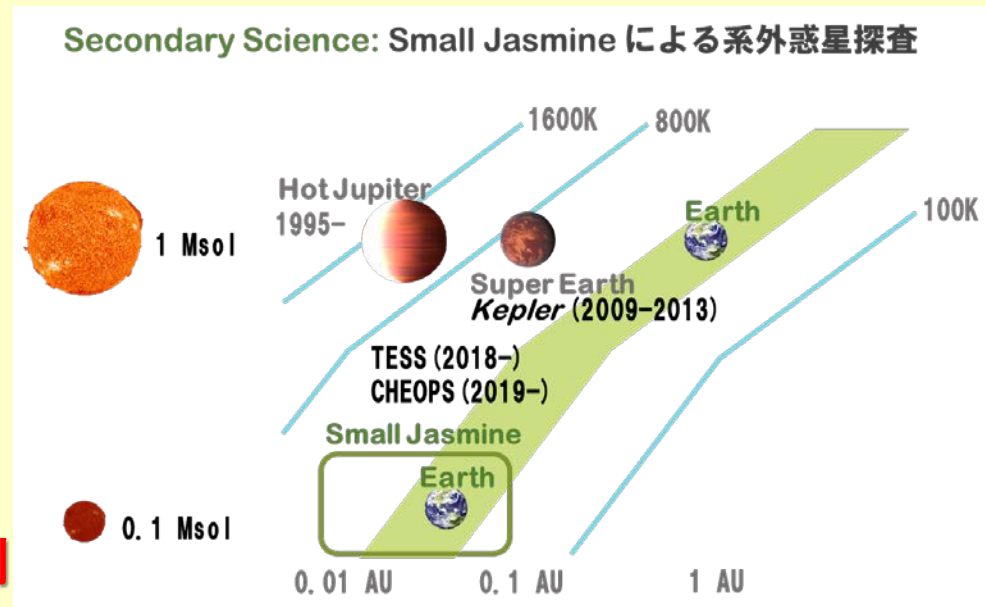
河原 創(東大) + **Exo JASMINE検討チーム**  
(増田賢人(阪大)、小玉貴則(東大)、  
葛原昌行、大宮正士、  
小谷隆行(ABC/NAOJ)、平野 照幸(東工大)  
福井暁彦(東大)、山田亨(ISAS) (敬称略))

\* 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索観測  
は初めて!



Credit:天文普及研究会



## 2-3 JASMINEで成果が期待できる、 その他の様々なサイエンスケース

国内外の多数の研究者の協力を  
得て、White Paperの投稿準備中  
(河田氏(UCL)を中心に取りまとめ中)

1. 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
2. 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
3. 系外惑星の探査  
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
4. 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
5. 星間吸収物質と磁場構造の3次元分布
6. 高エネルギー天体連星(X線連星系や $\gamma$ 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、公転面軌道等の決定
7. 恒星表面活動の探求 黒点、フレアの表面活動現象の時間的変化、星震学
8. 高速度星の起源とSgrA\*周りのS-starsの起源  
超高速度星の発見と軌跡を遡ることによる起源の探求、S-starsの起源の研究
9. その他: 崩壊した球状星団探査、近傍の矮小銀河、太陽系内天体、重力波等

# 天の川銀河の“探査”時代

天の川銀河サーベイデータが2020年代に出揃い、  
天の川銀河天文学が黄金期をむかえる！！

JASMINEは、高精度位置天文  
観測で、天の川銀河の中心核に  
世界で初めて“乗り込む”！！



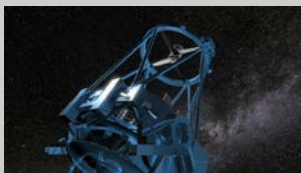
Gaia  
(2013-25?)



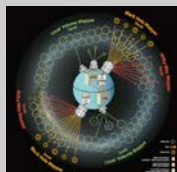
JASMINE

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)



SDSS-V Milky Way Mapper  
(2020-25)

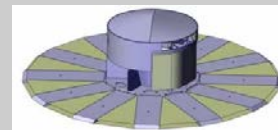
地上NIR-MOSによる銀河中心領域の  
視線速度、金属量情報などが出そう。  
固有運動情報を黄金期のコミュニティー  
に提供。



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

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

JASMINEは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



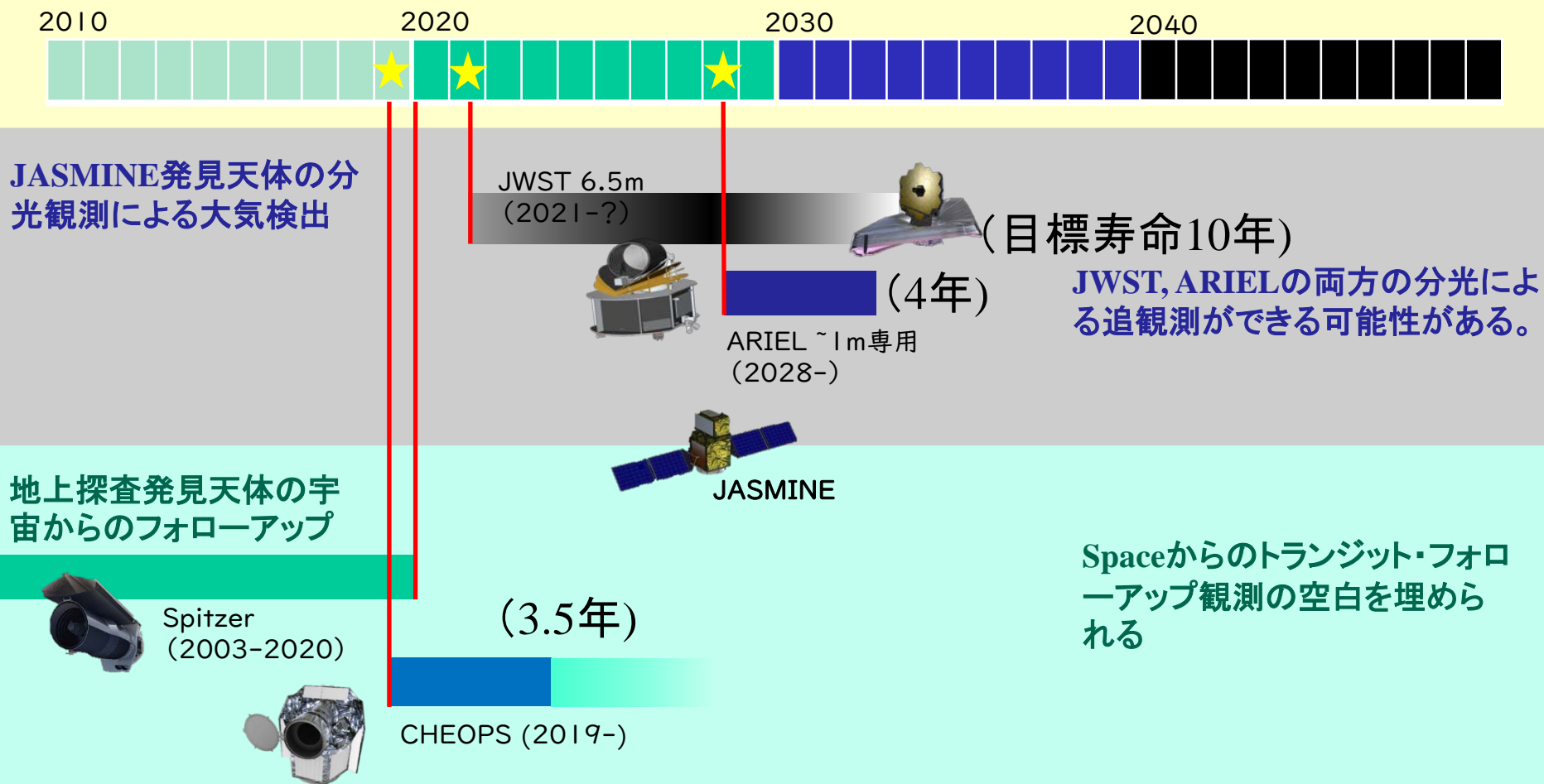
GaiaNIR(2045?-)

This document is provided by JAXA.



# Exo-JASMINEと他のプロジェクトとの連携

## Exo-JASMINE: ハビタブルゾーンにある地球型惑星の“探査”！！



# 2-4 JASMINEのミッション概要

参照: 片坐氏、宇都宮氏、鹿島氏、間瀬氏、上田氏の  
ポスター講演(g04-01~g04-05)

○JASMINEの仕様案(今までのベースライン) → 今までの検討に加えて、国産赤外線検出器  
搭載を視野にいれて詳細検討を開始

主鏡口径: 30cm、焦点距離: 3.9m

視野面積: 0.6度 × 0.6度

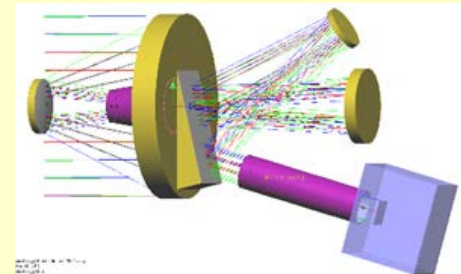
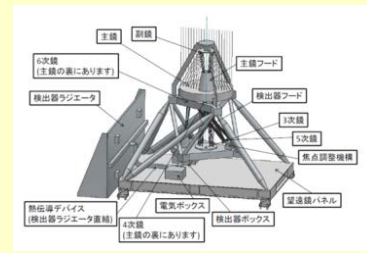
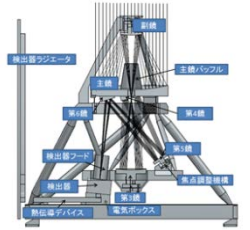
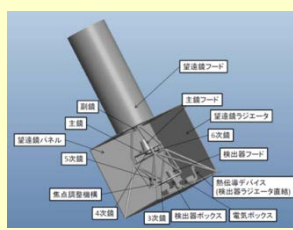
アストロメトリ用検出器: HgCdTe (4k × 4k) 1個 H4RG (Teledyne社)

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

衛星重量:  
約550kg

\* H4RGの搭載は米国での予算獲得が条件

\* 国産赤外線検出器に関する  
参照:  
中屋氏のポスター講演(Pa.19)



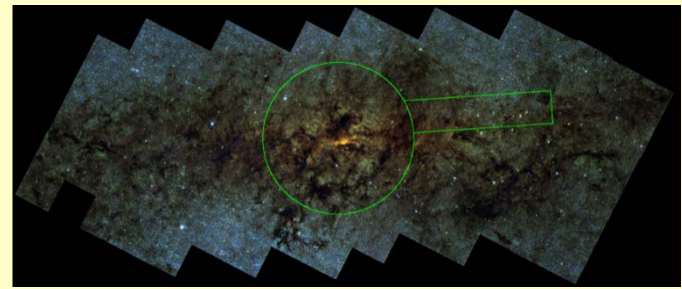
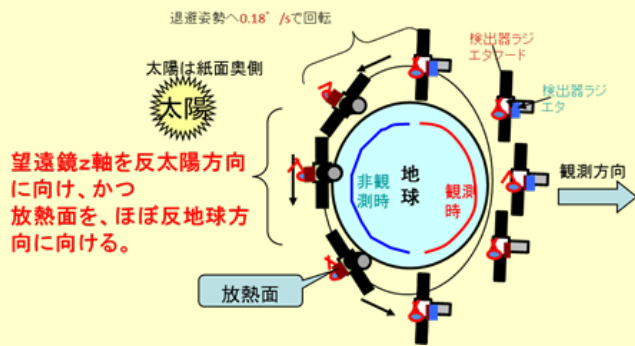
○観測データは、天体の天球面上での位置および測光の時系列データ、およびそれを解析  
した、天体毎の年周視差、固有運動なども提供。

○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)

銀河中心方向の観測領域



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

## 2-5 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0.15倍を見込む角度

参照：矢野氏、辰巳氏、山田氏のポスター講演  
(g04-06～g04-08)



### ★データ解析の工夫と安定な装置の開発

研究者コミュニティ(JASMINE consortium)のデータ解析WG)によりEnd-to-end simulatorが開発中！！

キー：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。



### 統計誤差の減少

JASMINEの場合：  
同じ星に対して約15～60万回の測定

### 系統誤差の“推定”：Self-Calibration!

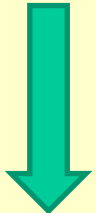
\* 検出器上の様々な場所での星像

⇒ 短時間(50分程度)では星の相対距離は“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)

\* Gaiaで、らせん運動が既知な星も用いて校正



\* モデル残差をホワイトノイズ化。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、√N則で達成

しかし、星の観測情報は“有限”⇒ 誤差が複雑な関数形だと精度良くフィットできない

誤差はなるべく簡単な関数形でモデル化できることが必要



システムに工夫が必要

⇒ 熱構造安定、指向安定性など



# ★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参加意思表明の正式レター  
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) 米国チームとのサイエンス、データ解析(＋検出器ユニット開発)に関する協力

**\*米国の研究者チームとのサイエンス協力、データ解析の協力。もしも米国で予算が獲得できた場合は、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)の製作、試験の協力。**

## (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。

## (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)**

# ★ JASMINE Consortium (JC)

\* 河田氏(UCL)が代表

研究者有志により組織され、科学目標達成に向けてのシミュレーションデータなどを使ってのサイエンス準備、データ解析開発、アウトリーチ活動が目的

## Working Group

- **WG-A: Data Analysis**  
ミッション目標に向けたより多くのサイエンスに有益なカタログ作りの準備
- **WG-B: Science Validation and Preparation**  
科学目標達成に向けてのシミュレーションデータなどを使っての準備
- **WG-C: Outreach**  
JASMINEの成果を広く社会に還元するためのアウトリーチ活動

## 打ち上げ前の準備:

シミュレーションデータや、Gaia などのすでに存在するデータを使って科学的検証を行う。また、論文発表を行う。

## 衛星打ち上げ後

準備した体制を元に、データ公開に向けて、データカタログ、Science Validation の論文などの作成を行う。

アーリーキャリアの方達にも多く参加して頂いて、衛星プロジェクトへの貢献を通して、キャリア形成に繋げていただきたい。また、その支援もコンソーシアムとして、行なっていきたい。

## 第2回の公開JCミーティング2020年11月24,25日 @zoomを開催

➔ 多分野(太陽系内天体から重力波検出)にわたるサイエンス発表が行われた。

# ★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。

天の川銀河の詳細かつ精密な“探査”時代

JASMINE: 中心核へ“突入”

Exo-JASMINE: 生命居住可能地帯にある  
地球型惑星の発見  
→生命探査へ



# ***Jasmine***

**JASMINEへのご支援をよろしくお願いします！**

