



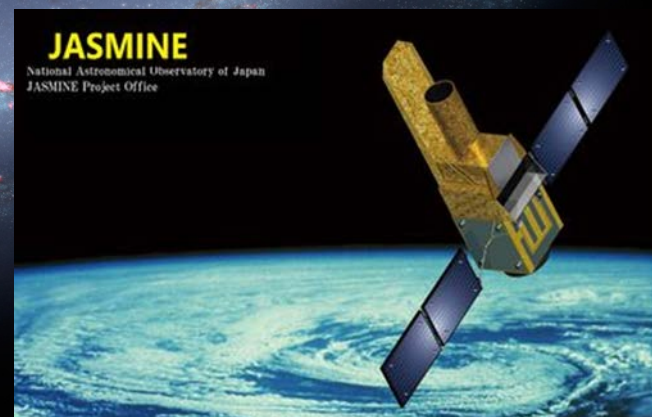
JASMINE(赤外線位置天文観測衛星)

JASMINE : Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration

郷田直輝（国立天文台JASMINEプロジェクト）
JASMINEチーム



JAXA



JASMINE

National Astronomical Observatory of Japan
JASMINE Project Office



1. ミッションコンセプト

JASMINE: Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration 超高精度位置天文観測およびトランジット法による系外惑星探索

- 口径40cm程度 超高安定望遠鏡
- 国産赤外線検出器(InGaAs)
 - ・ 観測波長: 1.1-1.6 μm 、2k $\times$ 2k画素 $\times$ 4(TBD)
- イプシロンSロケットによる打ち上げ(2028年予定)
(JAXA宇宙研の公募型小型計画3号機)
- 衛星重量550kg (wet) 程度
- 太陽同期軌道・高度550km以上、3年間観測

★JASMINEの大目的である位置天文学(アストロメトリ):

○恒星の動きを正確→恒星までの距離や運動(位置天文パラメータ)を決定。観測天文学の基礎となる手段。

○精度の高い測定→大気揺らぎの影響を受けない宇宙軌道上で観測。

○さまざまな種類の天体が密集している銀河中心バルジ方向の探査

→塵やガスによる吸収の影響を受けにくい近赤外線での観測。

○観測装置の安定性とデータ解析の工夫により超高精度を達成

→3年間の軌道上運用によって10万個におよぶ恒星を観測。最高精度25マイクロ秒角の位置天文パラメータを決定。

→天の川銀河が誕生以降、どのような変化を遂げて現在の姿に至ったか、その中で太陽系がどのような経路を辿ってきたか、という人類誕生にも関わる謎を紐解く手がかりを得る。

★JASMINEのもう1つの大目的:トランジット観測による中期M型星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星探査を行う。

→生命が存在する可能性がある惑星候補を見つける。

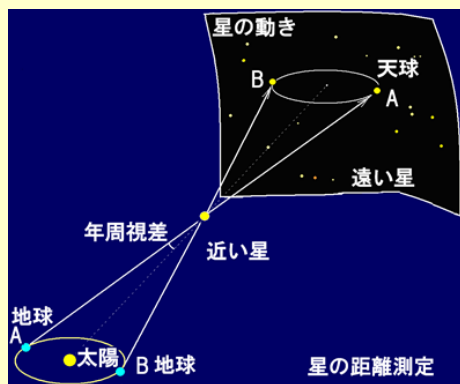
§ 1. 位置天文観測とは？

★位置天文観測(astrometry)

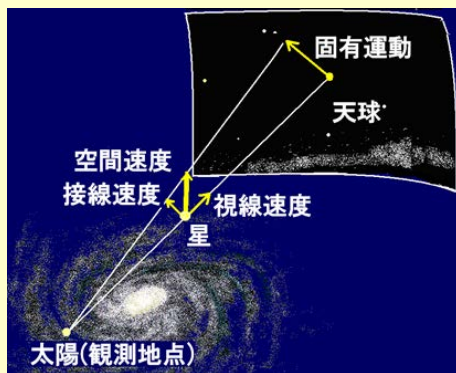
* 星の撮像観測を行い、その観測で得た**天体の天球面上での位置の時間変動**(時系列データ)とそこから導かれる**年周視差**と**固有運動**等の位置天文パラメータを供出する。

* 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



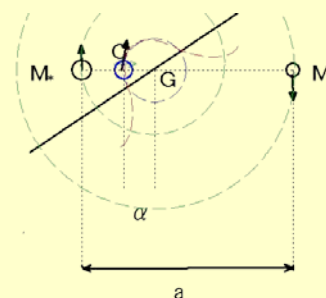
星の接線速度



* 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



位置天文学は何の役に立つのか？

年周視差

距離

星の**本当の明るさ**、放出している**本当のエネルギー**
距離はしごのベース⇒遠方天体の距離の推定

天球上の位置＋距離

星の3次元空間
分布

天の川銀河構造の**サイズ**、**形状**、**構造要素**など
星団の**サイズ**、**形状**など

固有運動＋距離

星の**接線速度**

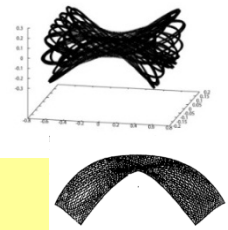
(視線速度に垂直方向)

(視線速度情報を加味して) **星や星団の3次元運動**

星の3次元
空間分布＋運動分布

重力場や位相分布関数の情報

* (観測できていない) 星や**ダークマター**の
力学構造、軌道



星、星団、銀河系構造の形成、進化の痕跡

見えないものが見える！

特殊な運動(らせん運動(年周楕円
＋固有運動からのずれ)

**連星系の軌道、連星の物理情報、系外惑星探査と惑星
の物理情報、重力レンズ天体の物理情報**など

位置天文観測は難しい！

* 実際の星の年周視差の大きさ

もっとも近い恒星であるケンタウルス座プロキシマ・ケンタウリでも、その年周視差は0.77秒角(4.22光年)

$$\begin{aligned} 1 \text{ 秒角 (びょうかく)} &= 1/3600 \text{ 度角} \\ &= 0.00028 \text{ 度角} \end{aligned}$$

* 天の川銀河の中心にある星(約2万6千光年)

$$0.000000035 \text{ 度 } (3.5 \times 10^{-8} \text{ 度}) = 125 \text{ マイクロ秒角}$$

100km離れたところにいる人(例:東京から見て富士山頂にいる人)の髪の毛1本の太さを見込む角度に相当

高精度な精密測定が必要。

観測装置とデータ解析に工夫が必要

→位置天文学

北斗七星

未来へ



Hippliner
野本氏(千葉大)
制作

○位置天文観測の精度の変遷

測定精度

紀元前150年：ヒッパルコス（天文学者） 1000秒角

(1秒角 = 1/3600 度)

↓
1838年：ベッセル（年周視差の発見！！） ~0.1秒角

* 地動説の直接証拠

↓
1988年：FK5 (Fifth Fundamental Catalogue) ~0.03秒角

↓
*地上観測では、大気ゆらぎ等の影響で観測精度に限界。

スペースへ(ヒッパルコス衛星(ESA)：1989年打ち上げ)

1997年：ヒッパルコスカタログ ~0.001秒角

スペースに出て革命的！

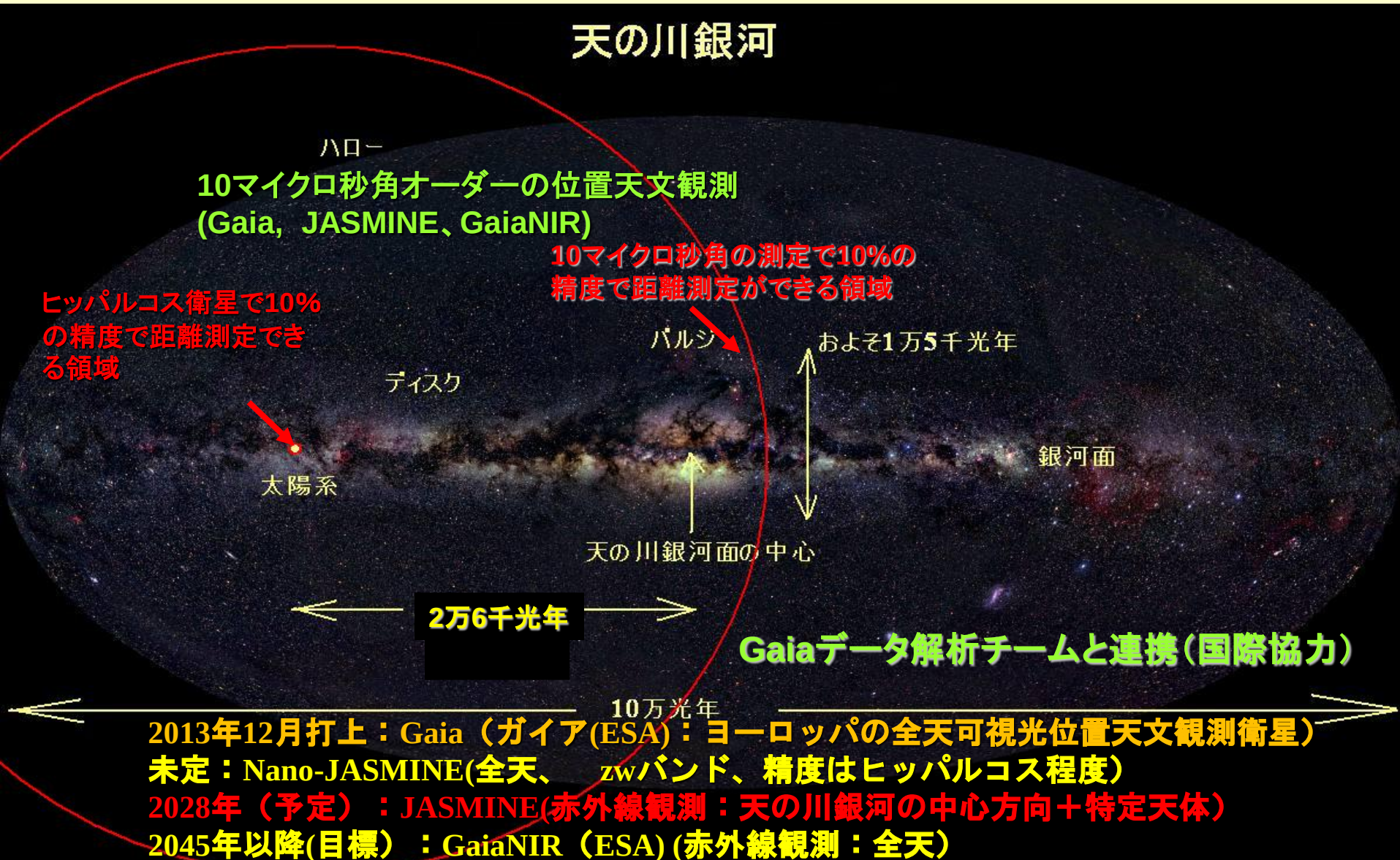
* 1ミリ秒角

ただし、まだ“小さい革命”

注意：以上は、可視光での観測。

電波観測は、VERAが精度を上げて、10万分の1秒角程度を達成(ただし、星自体ではなく、レーザー源とよばれる星の周りのガスを見ている)

ヒッパルコス衛星とその後の位置天文観測衛星



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！



天の川銀河の研究が大進展！！

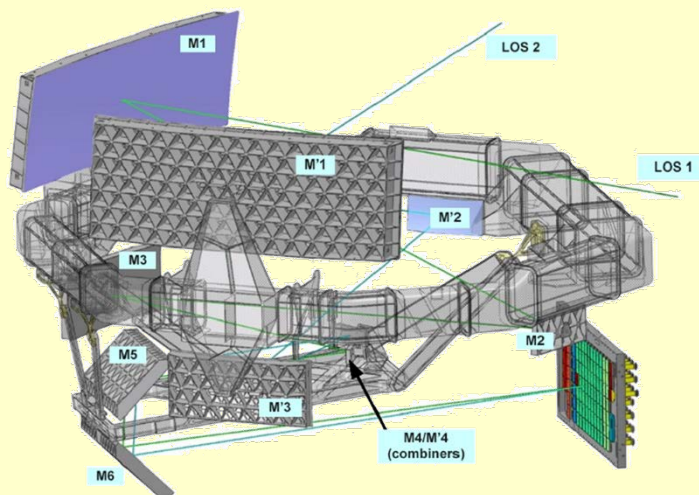
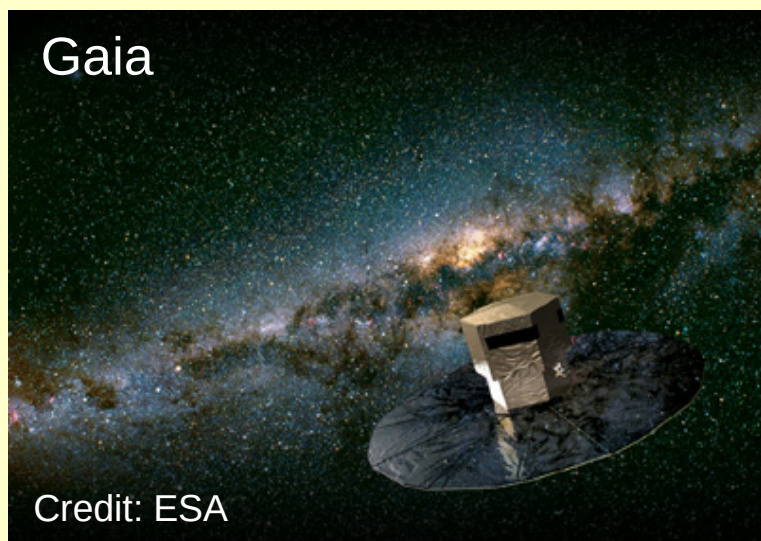


Figure courtesy EADS-Astrium

§ 2. Gaia の概要とこれまでの成果

ESA(ヨーロッパ宇宙機関)によるミッション

- * 2013年12月19日に打上げられた。
- * Orbit: L2 Lissajous orbit
- * the whole sky survey with an optical band(<1.8billion stars)
G-band($0.33\text{-}1.0\mu\text{m}$)、 $3\text{mag} < G < 21\text{mag}$



$$G = V - 0.0257 - 0.0924 \cdot (V-I_C) - 0.1623 \cdot (V-I_C)^2 + 0.0090 \cdot (V-I_C)^3 \quad (\text{fit errorは}0.05\text{mag})$$

★カタログのリリース: ノミナル運用(2019年終了)の**カタログ(DR4):2024年頃(?)**

➡ 運用の延長:2022年末までは正式承認。
2025年末まで延長も示唆

それまでに中間リリース

2016年9月14日に初回(DR1)の公開

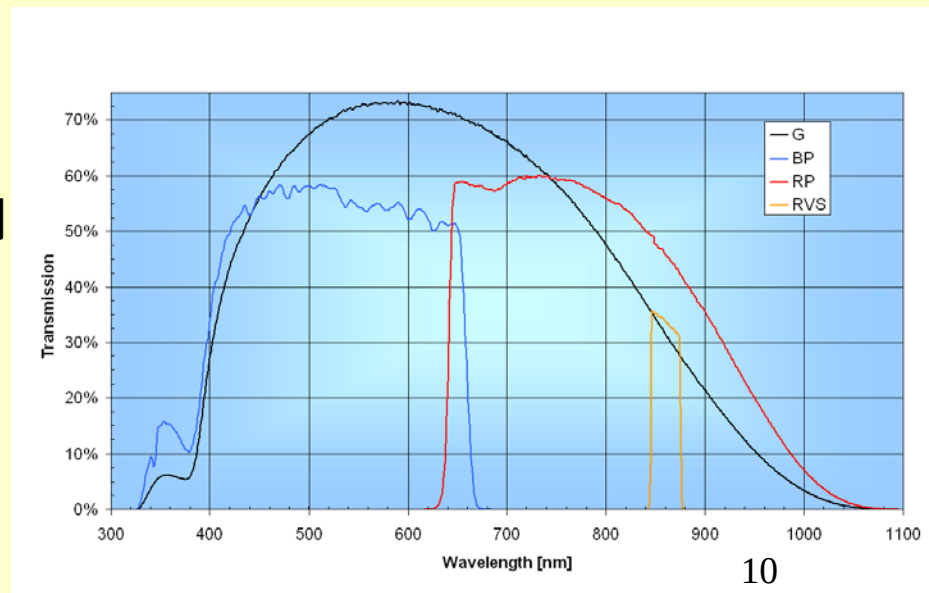
2回目のデータ(DR2):2018年4月25日に公開

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+α)、
DR5(延長含)の公開日は未定(2028年頃)

* **JASMINEとGaiaとの協力の一環として、Gaiaの
データアーカイブは、国立天文台天文データセンターに
おいても公開中。**



Credit: ESA

Gaia: 第1回中間リリースされたカタログ(DR1)の概要

○14ヶ月間のデータ(2014/7/25～2015/9/16)

○約11億個の星に対して、星の位置とG-bandでの明るさ

* 位置精度は、10mas程度 **mas: milli arc-second**

○ヒッパルコスカタログやティコカタログと結びつけて解析した星、約200万個に対しては、
年周視差精度: 約0.3mas (ただ、さらに系統誤差 ± 0.3 mas程度あり)

* また、offset (-0.25 mas程度) ありとの指摘。

固有運動精度: 約1mas/year

* ヒッパルコスカタログと結びつけると約0.06mas/year

Gaia: 第2回中間リリースされたカタログ(DR2)の概要

○22ヶ月間のデータ(2014/7/25～2016/5/23)

○約13億個の星($3 < G < 21$)に対して、星の位置(天球面上の座標値)、年周視差、固有運動の5つのパラメータ値を提供。DR1と違って、Gaia単独での測定値。

* 年周視差精度: $40\mu\text{as}$ ($G < 15$), $100\mu\text{as}$ ($G = 17$), $700\mu\text{as}$ ($G = 20$)

* 固有運動精度: $60\mu\text{as/year}$ ($G < 15$), $200\mu\text{as/year}$ ($G = 17$), 1.2mas/year ($G = 20$)

ただし、年周視差精度には、さらに $100\mu\text{as}$ 以下の系統誤差有り、さらに平均的に年周視差のゼロポイントには、 $-30\mu\text{as}$ のオフセットあり)

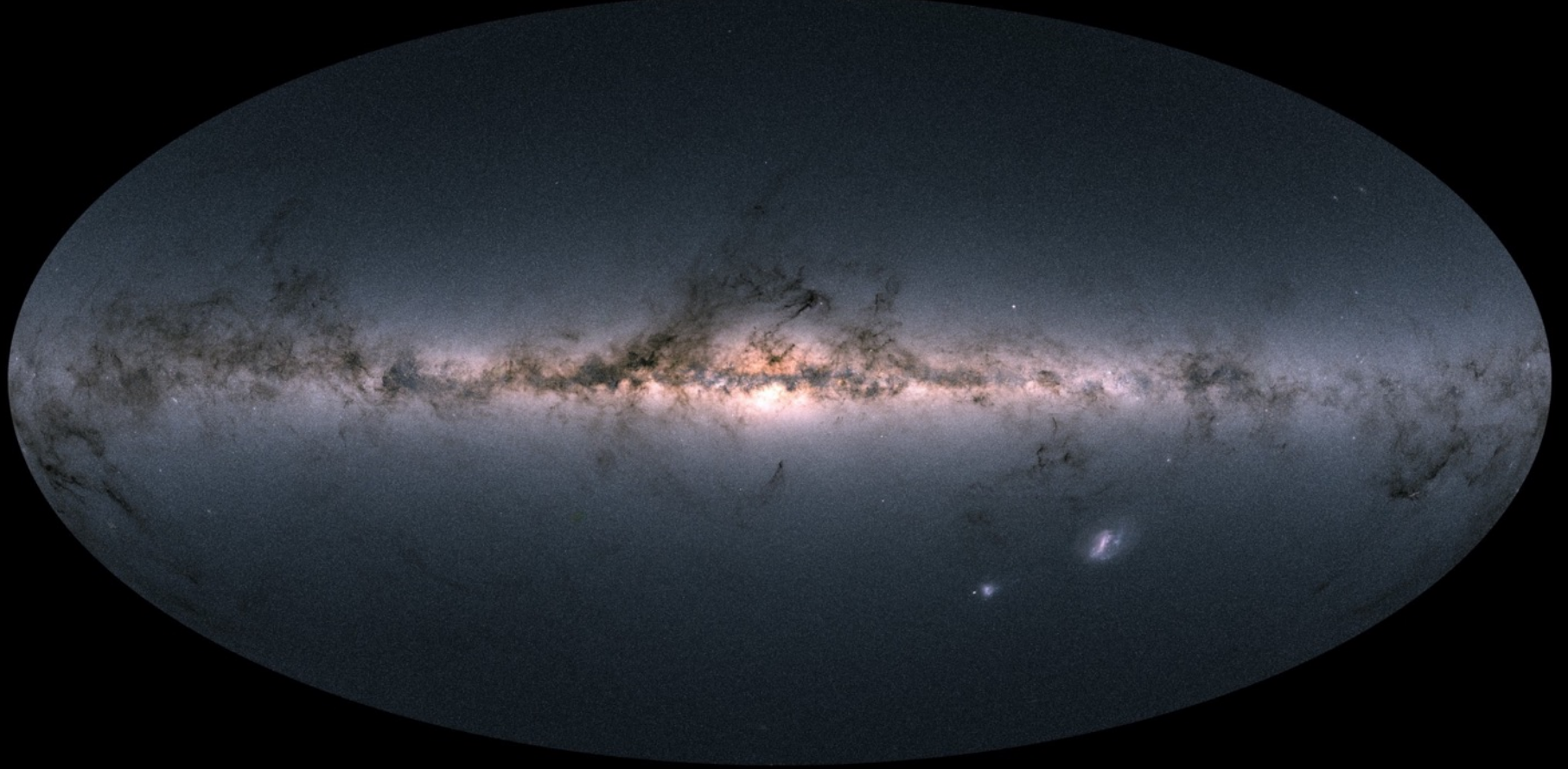
○約720万個の星($4 < G < 13$, $3550\text{K} < T_{\text{eff}} < 6900\text{K}$)に対して、平均視線速度を提供。

精度: $200\text{--}300\text{m/s}$ ($G \sim 4$), 1.2km/s ($T_{\text{eff}} \sim 4750\text{K}$), 2.5km/s ($T_{\text{eff}} \sim 6500\text{K}$)

○約17億個の星に対してGバンド等級を提供。

* 測光精度: 1ミリ等級($G < 13$), 20ミリ等級($G = 20$)

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



Credit:ESA/Gaia/DPAC

Gaia: 第3回中間リリース(早版)されたカタログ(EDR3)の概要

○34ヶ月間のデータ(2014/7/25~2017/5/28)

* Gaia DR2: 22ヶ月間、Gaia DR1: 14ヶ月間

○約14.7億個の星($3 < G < 21$)に対して、星の位置(天球面上の座標値)、年周視差、固有運動の5つのパラメータ値を提供。うち、約5.6億個が星の色情報が得られ補正されている。

* 年周視差精度: $20 - 30 \mu\text{as}$ ($G < 15$), $50 \mu\text{as}$ ($G = 17$), $400 \mu\text{as}$ ($G = 20$), $1300 \mu\text{as}$ ($G = 21$)

* 固有運動精度: $20 - 30 \mu\text{as/year}$ ($G < 15$), $70 \mu\text{as/year}$ ($G = 17$), $500 \mu\text{as/year}$ ($G = 20$), $1400 \mu\text{as/year}$ ($G = 21$)

ただし、年周視差精度には、ゼロポイントに対して、 $-17 \mu\text{as}$ のオフセットあり

○視線速度情報→Gaia DR2と同じ

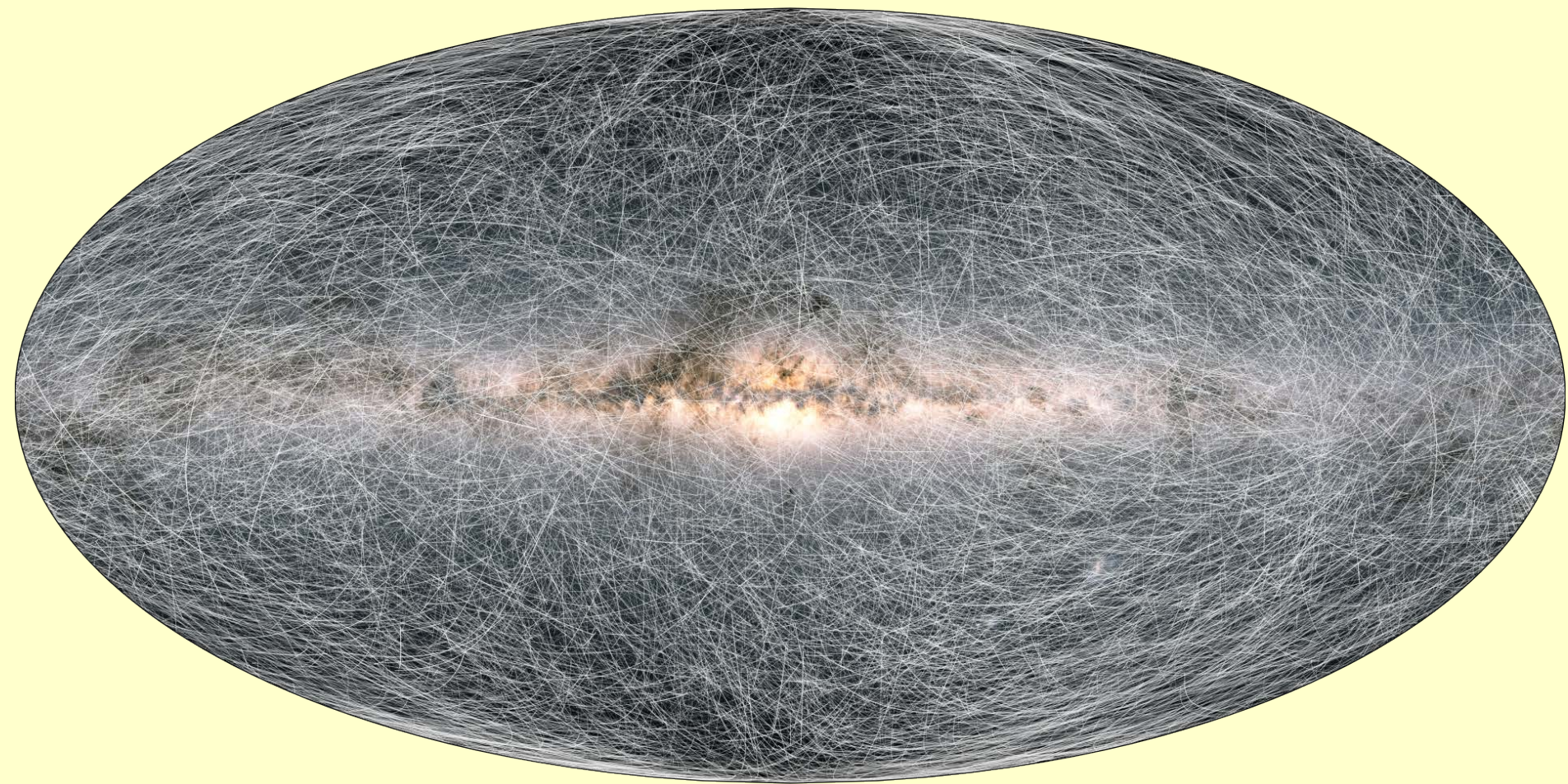
* 約720万個の星($4 < G < 13$, $3550\text{K} < T_{\text{eff}} < 6900\text{K}$)に対して、平均視線速度を提供。

精度: $200 - 300 \text{m/s}$ ($G \sim 4$), 1.2km/s ($T_{\text{eff}} \sim 4750\text{K}$), 2.5km/s ($T_{\text{eff}} \sim 6500\text{K}$)

○約18億個の星に対してGバンド等級を提供。

* 測光精度: 0.3ミリ等級($G < 13$), 20ミリ等級($G = 20$) 20ミリ等級($G = 20$)

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)

The catalogue will be consisting of:

- Full astrometric, photometric, and radial-velocity catalogues.
- All available variable-star and non-single-star solutions.
- Source classifications (probabilities) plus multiple astrophysical parameters (derived from BP/RP, RVS, and astrometry) for stars, unresolved binaries, galaxies, and quasars. Some parameters may not be available for faint(er) stars.
- An exo-planet list.
- All epoch and transit data for all sources.

Pending further approvals of mission extensions additional release(s) will take place (currently extension until the end of 2022 has been approved and an indicative approval until the end of 2025 has been given).

Gaia Home
Page

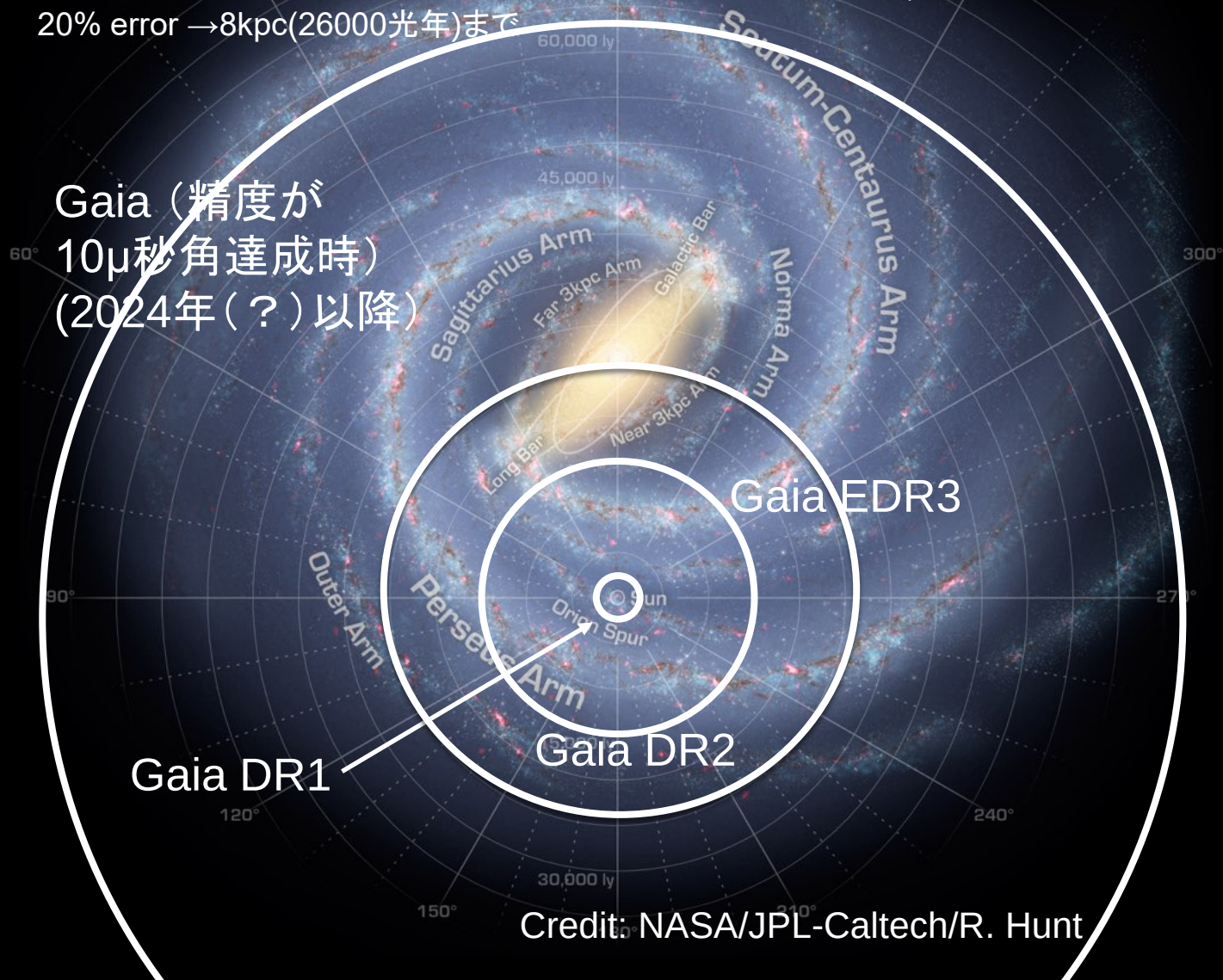
星までの距離の誤差 (3等級<G<15等級)

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 μ 秒角達成時)
(2024年(?)以降)



Credit: NASA/JPL-Caltech/R. Hunt

The predicted parallax standard errors σ_{π} , averaged over the sky for a uniform celestial distribution, are:

	Gaia DR4	Gaia DR5
Very bright stars ($G < 3$ mag)	See text	See text
Bright stars ($3 \text{ mag} < G < 13 \text{ mag}$)	See text	See text
$G = 13 \text{ mag}$	10 μas	7 μas
$G = 14 \text{ mag}$	14 μas	10 μas
$G = 15 \text{ mag}$	22 μas	16 μas
$G = 16 \text{ mag}$	35 μas	25 μas
$G = 17 \text{ mag}$	59 μas	42 μas
$G = 18 \text{ mag}$	107 μas	75 μas
$G = 19 \text{ mag}$	211 μas	149 μas
$G = 20 \text{ mag}$	462 μas	325 μas
$G = 20.7 \text{ mag}$	835 μas	588 μas

A simple performance model which reproduces the parallax-standard-error estimates listed above, is:

$$\sigma_{\pi} [\mu\text{as}] = T_{\text{factor}} \cdot (40 + 800 \cdot z + 30 \cdot z^2)^{1/2},$$

where

- $T_{\text{factor}} = 0.749$ for Gaia DR4 and 0.527 for Gaia DR5 represents the temporal improvement factor in the parallax uncertainty allowed by adding more data that span a longer time interval;
- $z = \text{MAX}[10^{0.4 \cdot (13 - 15)}, 10^{0.4 \cdot (G - 15)}]$ is an auxiliary variable representing an inverse G-band photon flux;
- G - in the range 3-20.7 mag - denotes the broad-band, white-light, Gaia magnitude (see below).

For sky-averaged position and proper-motion errors, σ_0 [μas] and σ_{μ} [$\mu\text{as yr}^{-1}$], the following scaling relations can be used:

	Gaia EDR3	Gaia DR4	Gaia DR5
σ_0	$0.75 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.75 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.75 \cdot \sigma_{\pi}$
σ_{α^*}	$0.80 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.80 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.80 \cdot \sigma_{\pi}$
σ_{δ}	$0.70 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.70 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.70 \cdot \sigma_{\pi}$
σ_{μ}	$0.96 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.54 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.27 \cdot \sigma_{\pi}$
$\sigma_{\mu\alpha^*}$	$1.03 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.58 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.29 \cdot \sigma_{\pi}$
$\sigma_{\mu\delta}$	$0.89 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.50 \cdot \sigma_{\pi}$	$0.25 \cdot \sigma_{\pi}$

where the asterisk denotes true arcs on the sky ($\sigma_{\alpha^*} = \sigma_{\alpha} \cdot \cos(\delta)$, etc.).

* Gaiaの成果例

今までに 6000本以上の論文(査読付き)

- 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

Galactic Dynamical Structures

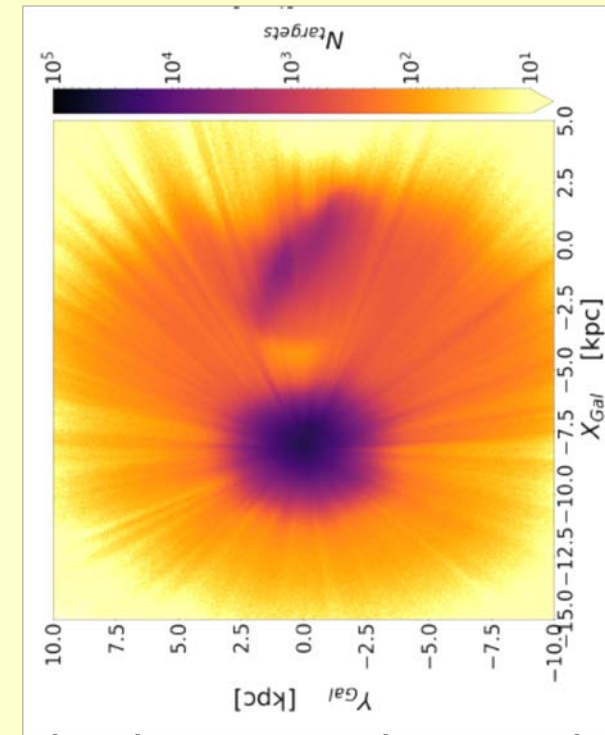


- *complicated structures in velocity spaces of stars
- *non-equilibrium state!!

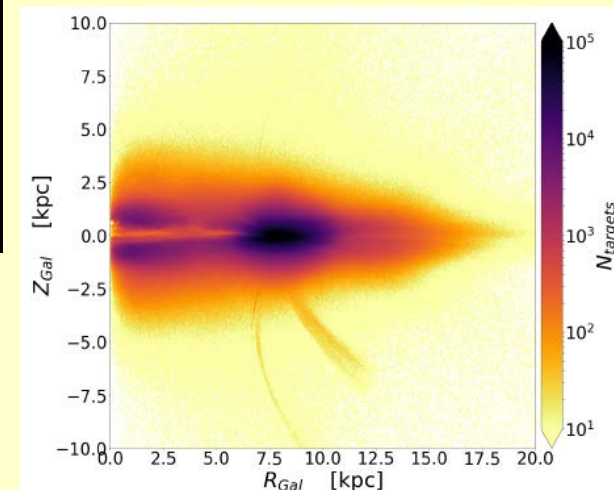
* バー構造の実視



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

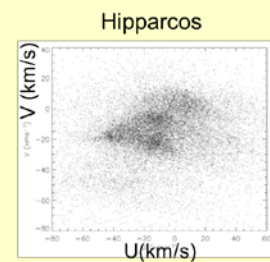
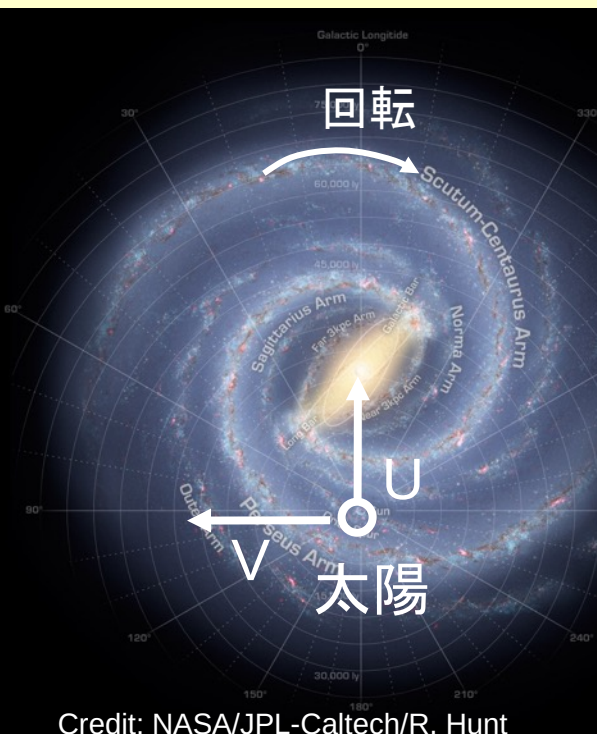


(Anders, F., et al., 2019)



* 太陽系近傍の運動星団 ～複雑な速度構造～

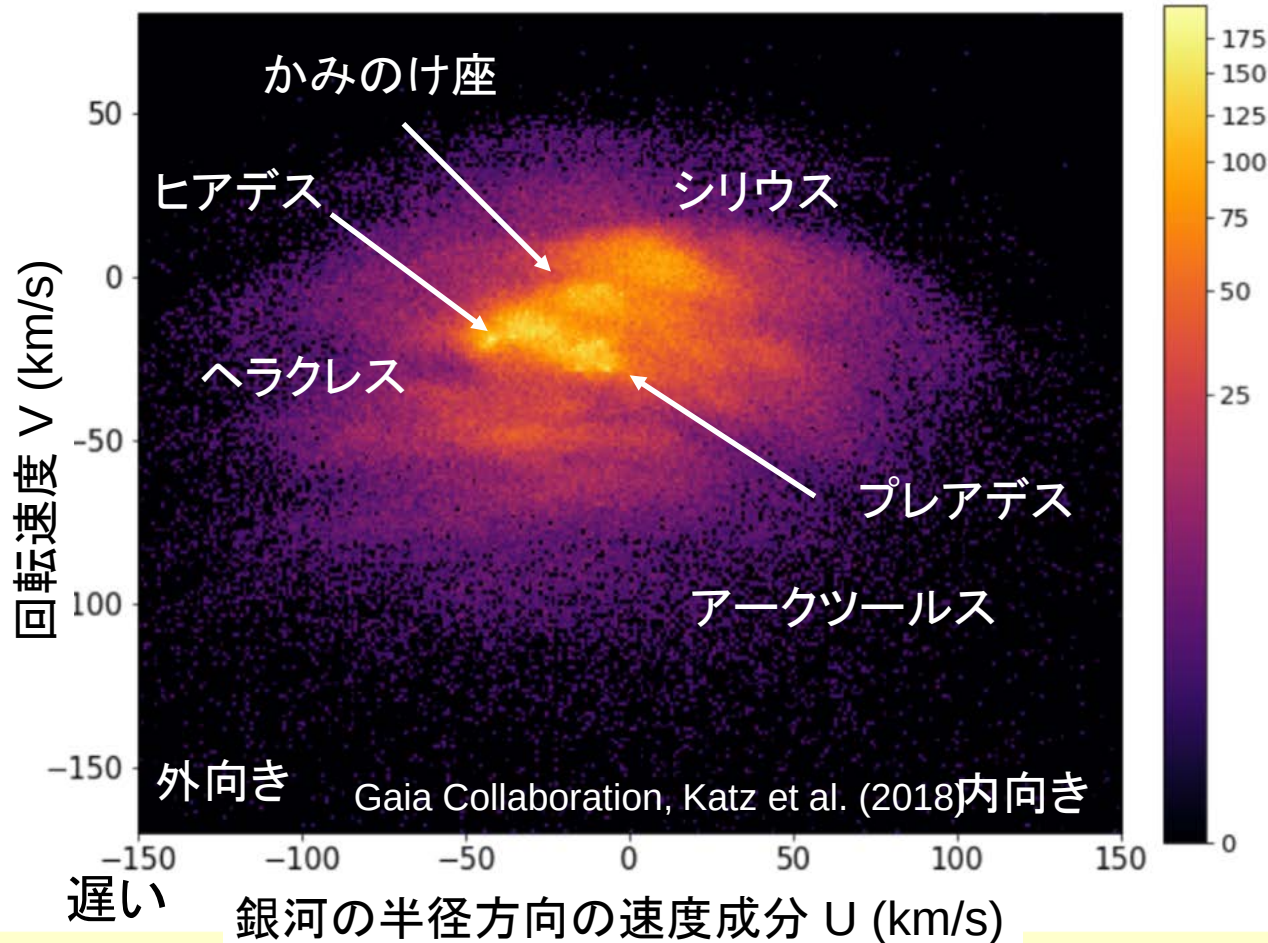
U, Vは局所静止基準系から
みた速度



Antoja et al. (2008)

速い

Gaia DR2



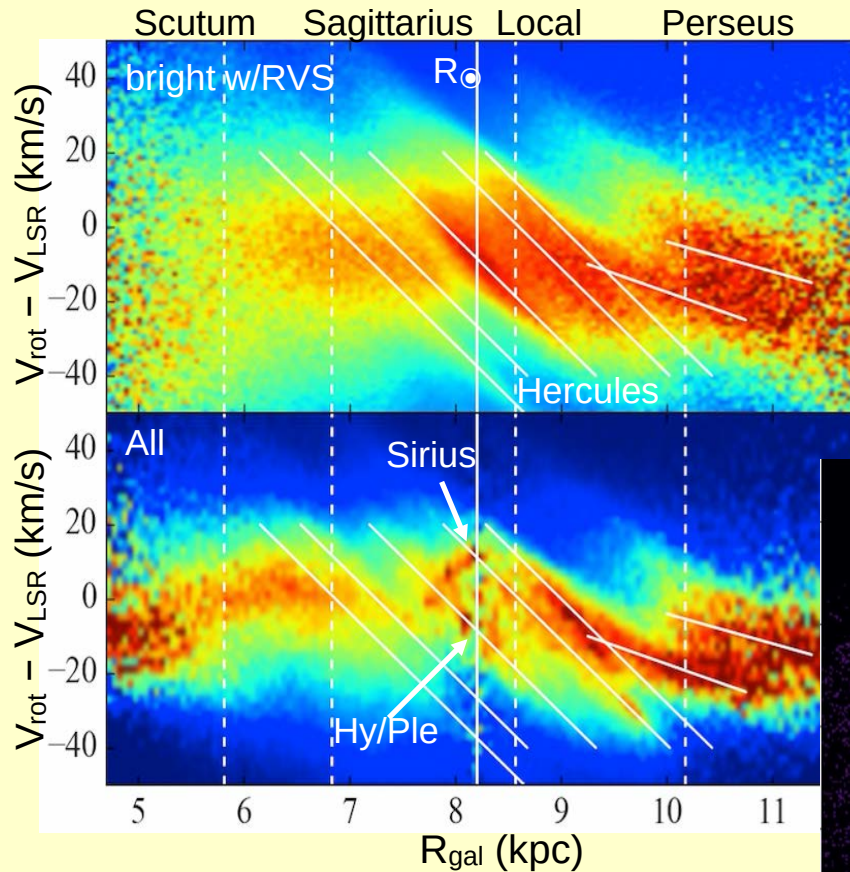
バー構造や渦状腕の
影響の可能性(非軸対称
構造による共鳴効果→軌道が分岐し別種類の軌道に分かれる)、
他、矮小銀河の残骸

運動星団の理解

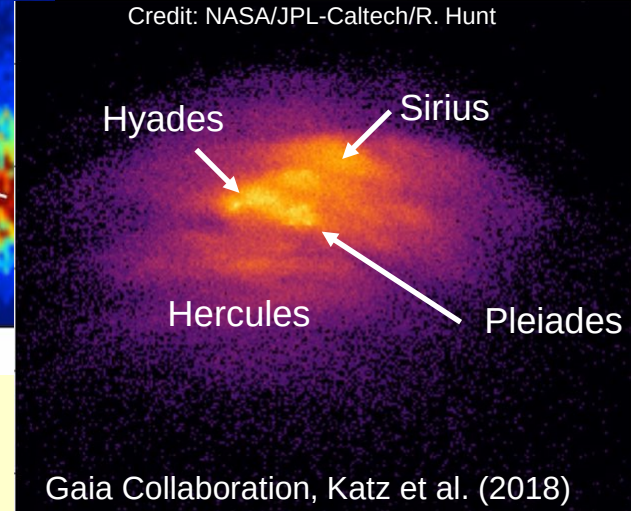
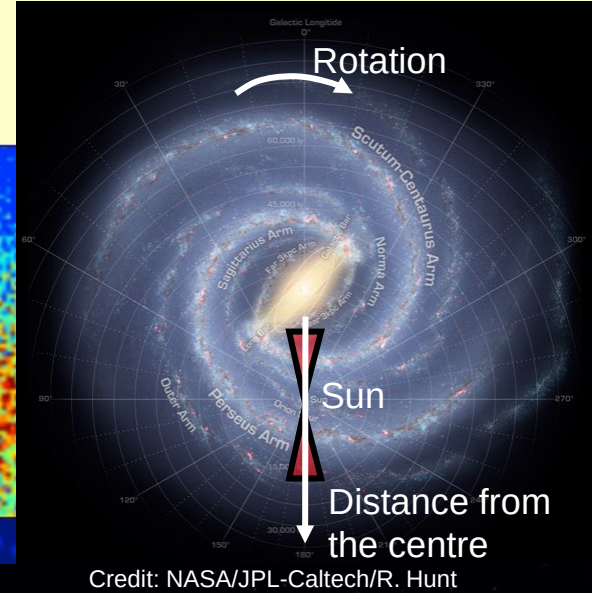


バー構造 and/or 渦巻き構造の物理的特徴
(パターンの回転速度等)の解明につながる

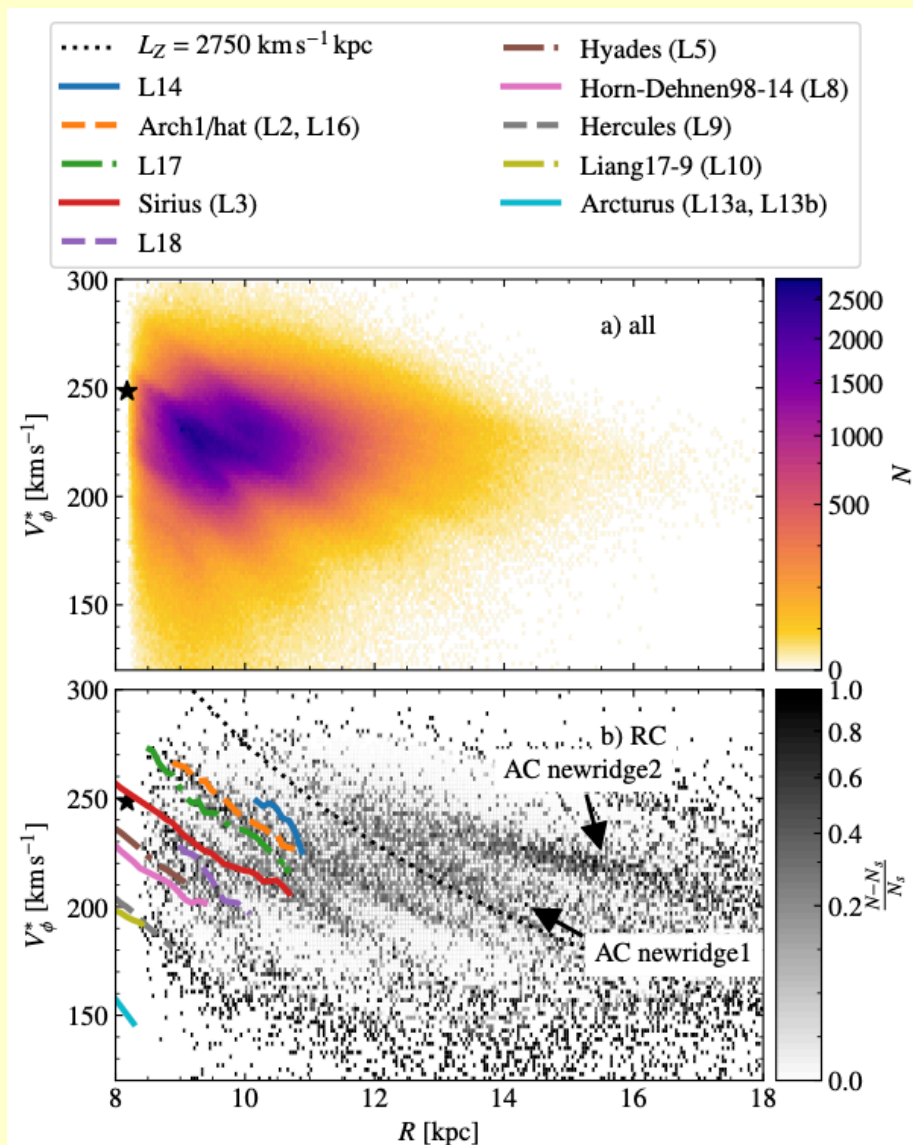
太陽系近傍と同様な運動集団 (sub-structure) が
他の箇所にも拡がって存在している



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～

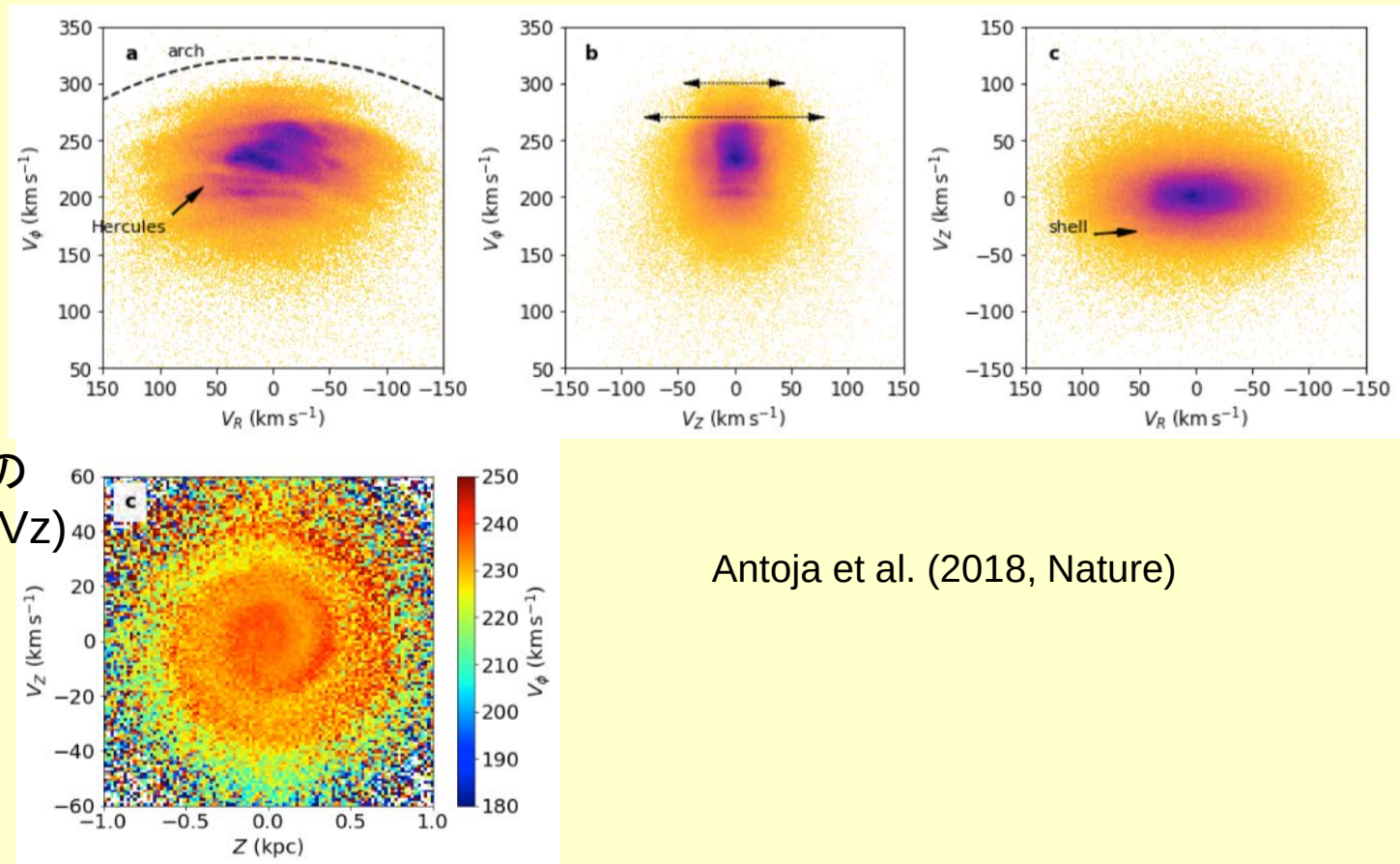


矮小銀河の衝突、バー構造や渦状腕の影響の可能性

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
起こしていなくて非平衡状態



摂動が比較的最近に加わっていきそう

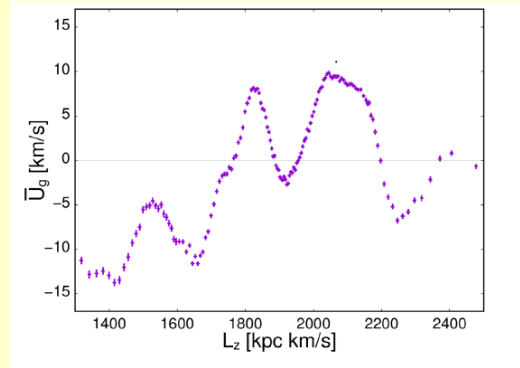


Antoja et al. (2018, Nature)

銀河面に垂直方向は軸(z軸) の座標₂₆

銀河面に垂直方向の振動と 銀河半径方向の振動

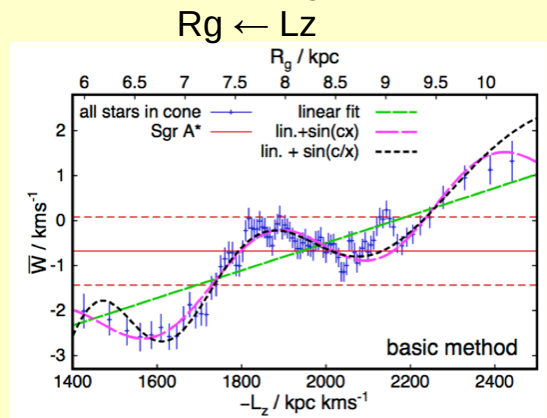
半径方向の平均速度



Friske & Schönrich (2019)

垂直方向の平均速度

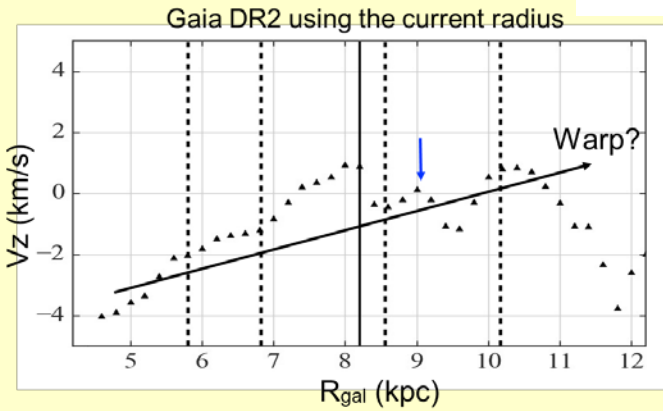
Gaia DR1 solar neighbourhood



Schönrich & Dehnen (2018)

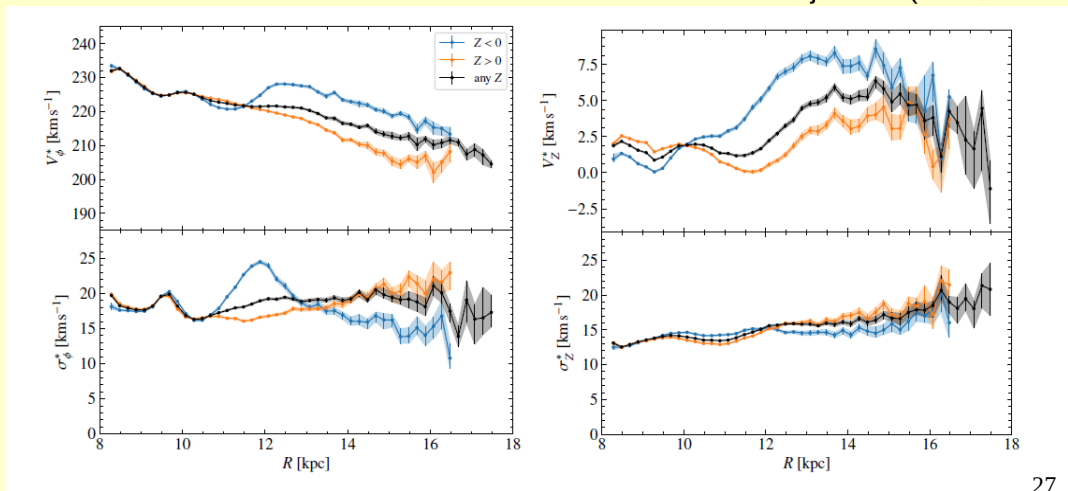
Gaia DR2 => 銀河系ディスクは、滑らかに回転しているのではなく、摂動を受けている。

Gaia EDR3->anti-center方向にも続いている



Kawata et al. (2018)

Gaia Collaboration, Antoja et al. (2020)



* 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

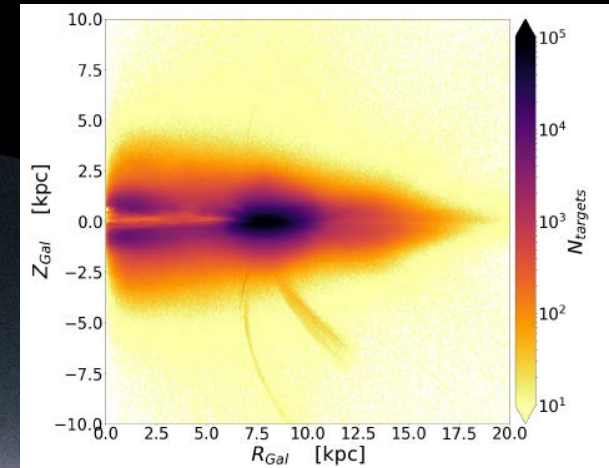
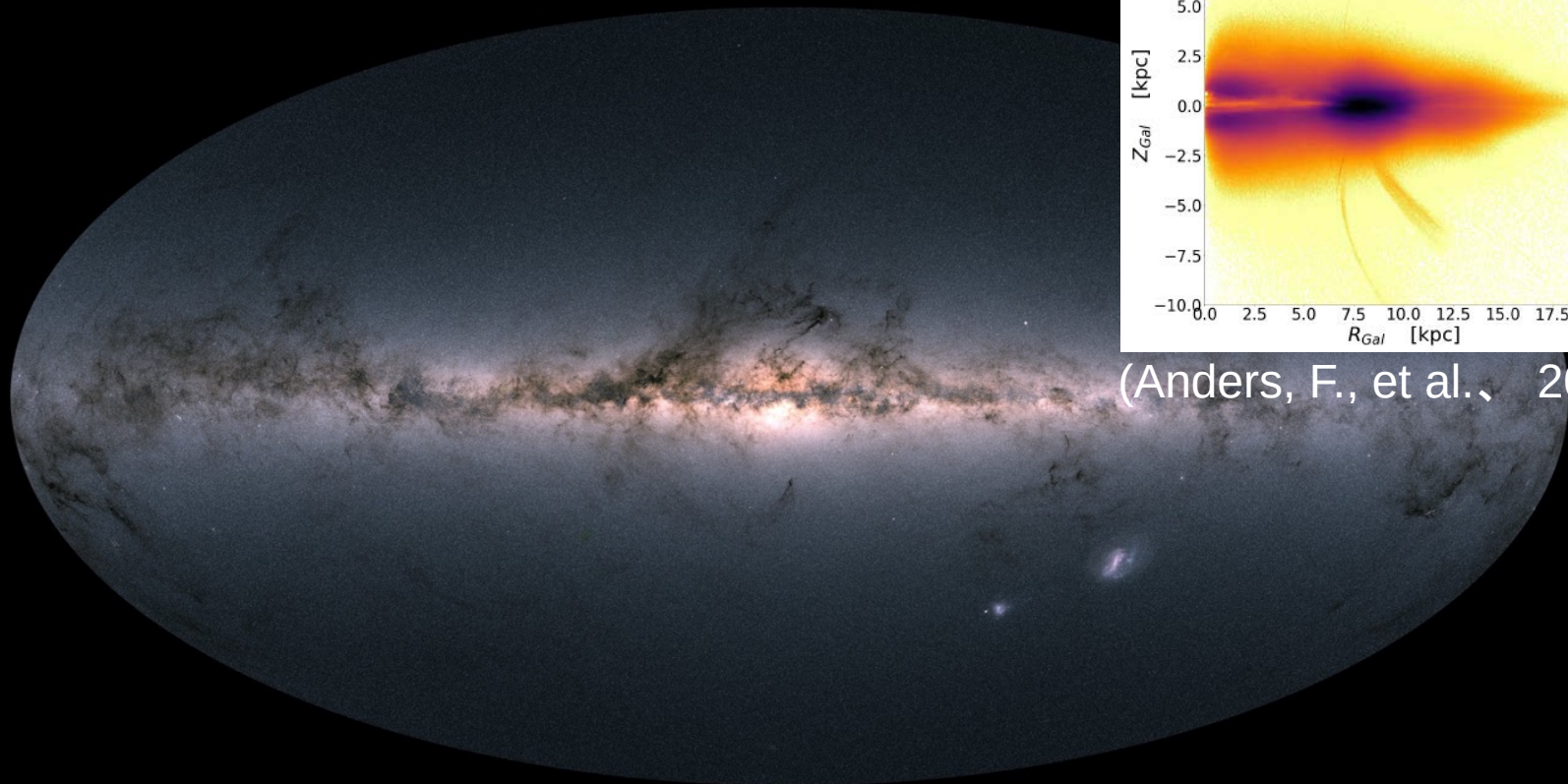
- ・バルジの形成、進化(バーによるbuckling instability?)
- ・太陽系近傍の運動星団の起源
- ・銀河面の振動
- ・銀河ディスクのガスを中心領域へ提供
- ・太陽や恒星の誕生場所やその軌跡

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

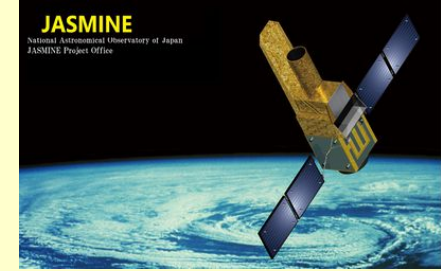


(Anders, F., et al., 2019)

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

§ 3. JASMINE計画

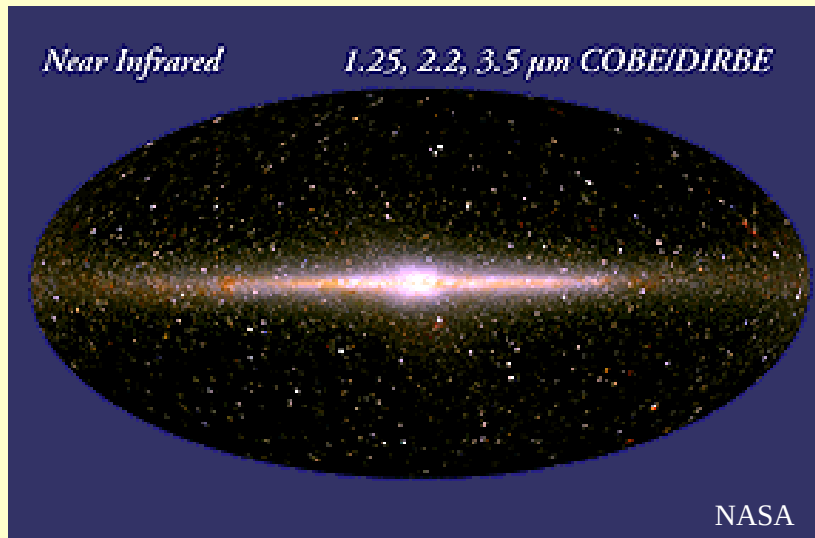


赤外線位置天文観測衛星計画



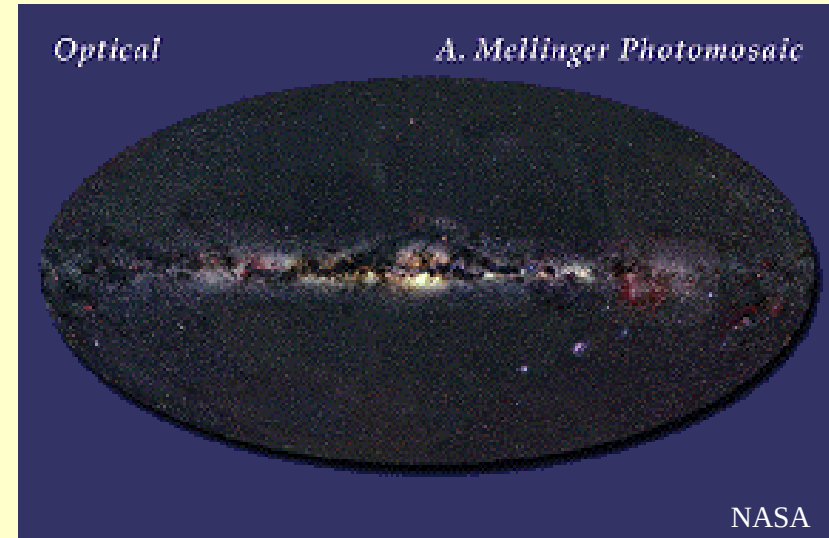
近赤外線による観測

(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)

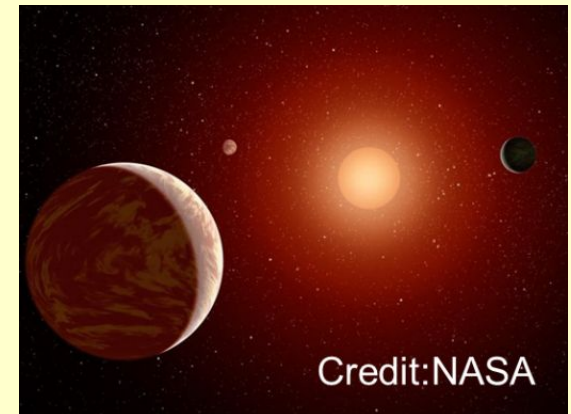
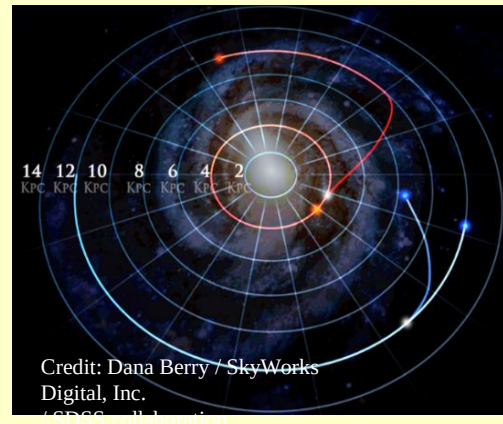




3-1. 科学目標と意義

1-1.科学目標とアウトプット

- 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。 **銀河中心考古学**
- 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**を探求する。
- 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查**する。

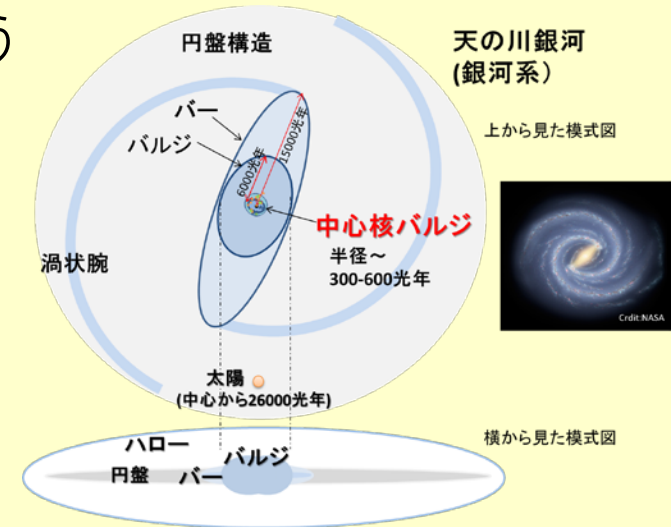


JASMINEによる銀河中心考古学

近赤外線(1.1~1.6ミクロン)で、Gaiaが苦手な**天の川銀河中心部(中心核バルジ)**の位置天文観測を行う

中心核バルジは“**歴史の宝庫**”
様々な年齢をもつ星が、年代に応じて、
異なった空間構造と系統的な運動分布
をして今も存在していると
考えられている。

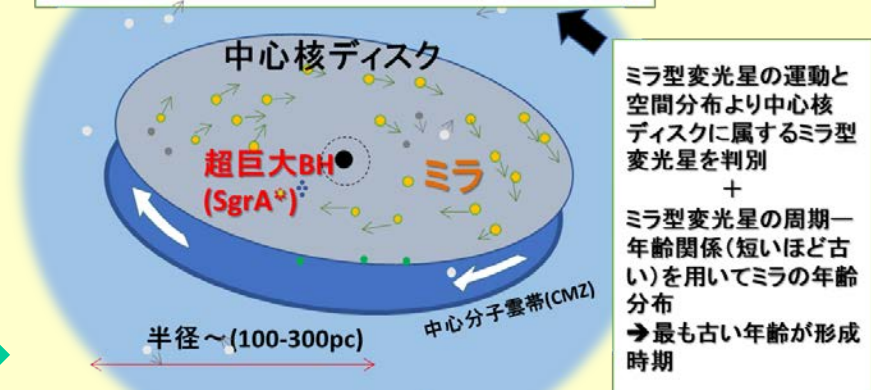
天の川銀河誕生から
現在までの様々な年代の
地層が潜んでいるイメージ！



中心核バルジ

ミラ型変光星を用いた**中心核ディスクの形成時期の決定**

Baba & Kawata (2020)



例: ミラ型変光星を用いた
**中心核ディスクの
形成時期の決定**

太陽系の起源とJASMINE

太陽系は天の川銀河内のどこで誕生したのか？

太陽系の重元素量（金属量）は、太陽系周辺の重元素量より有意に多い。

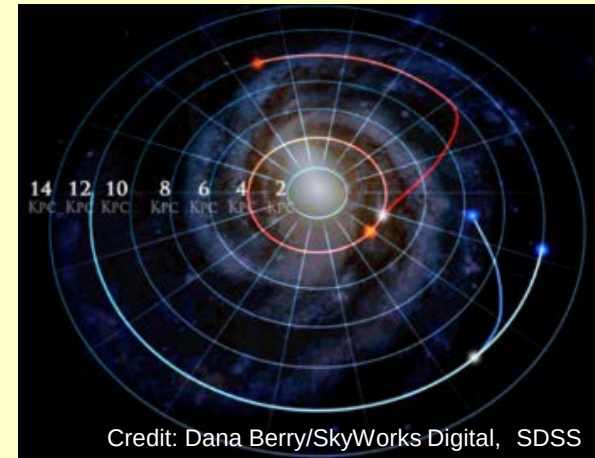
一方、重元素量は銀河半径に依存し、天の川銀河の中心に行くほど重元素量は多い。

→ 太陽は今よりも内部で誕生した可能性が高い

（例えば、Tsujimoto & Baba 2020）

具体的にはどこで誕生したのか？まだ、決定していない

→ 力学的な探求も必要



何によって現在の位置まで移動してきたのか？

天の川銀河の **バー構造**（半径1万5千光年程度）が、星の動径（半径）方向の移動に、とても重要な役割を果たすと考えられている。

（注：バー構造といった非軸対称構造による、恒星軌道への力学的影響による（軌道の共鳴現象による不安定化））

いつ、どの程度移動したのか？

バー構造が、太陽系の誕生（46億年前）より先に出来たのか、それとも、太陽系誕生より後に出来たのか、によって太陽の動径方向の移動の歴史が異なる。

→ 太陽系の天の川銀河内での軌道移動の解明には、バー構造の形成時期が鍵

バー構造の形成時期を決めるのがJASMINEの主な科学目標の1つ

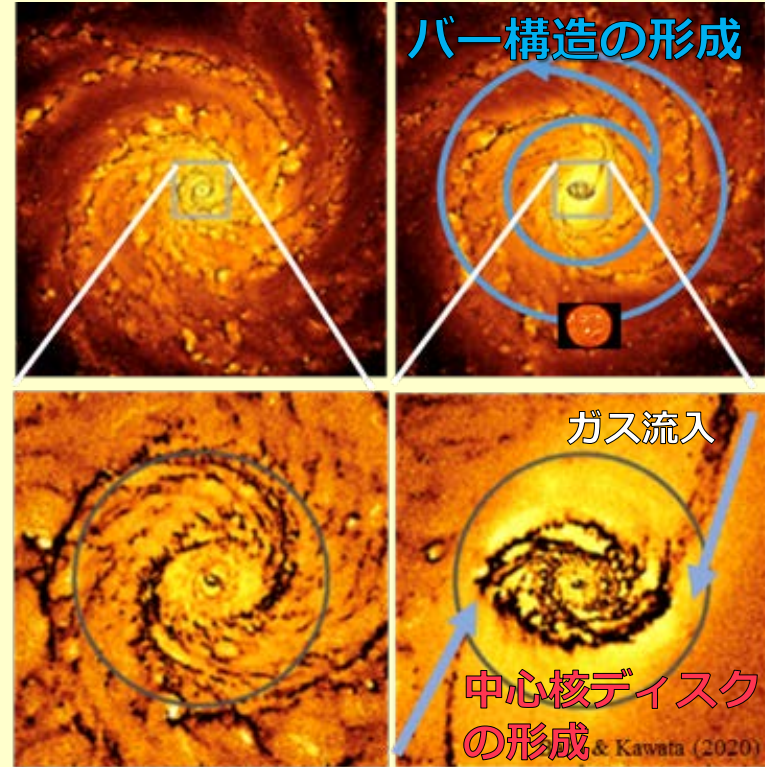
どうやってバー構造の形成時期が分かるのか？

JASMINEにより

中心核バルジにある小さいディスク（円盤）構造
（中心核ディスク）が出来た時期を解明

中心核ディスクの形成時期は、
外側の大きなバー構造が形成
された時期と**ほぼ等しい**。

（解説）バー構造ができれば、そのトルクにより、銀河円盤（外側の大きなディスク）のガスが銀河系中心領域に流入し、中心核で星形成が起こり、中心核ディスク（小さいディスク）が新たに形成されることが、数値シミュレーションから示唆されている。形成までの時間は10億年以内であり、天の川銀河進化の時間尺度では、ほぼ“同時”と見なして良い。



Baba & Kawata (2020)

バー構造の形成時期が解明できる

注：バー構造に属する古い星の年齢は、星がもともと属していた大きなディスクで出来た時の年齢であり、バー構造の形成時期とは異なるため、バー構造に属する星の年齢だけではバー構造の形成時期は決定できない。

太陽系の移動探求で広がるサイエンス

バー構造が形成された時期



バー構造が太陽系より**先**に形成
→ 太陽形成後、太陽は**ゆっくりと外側**
に移動

or

バー構造が太陽系より**後**に形成
→ 太陽系はしばらく銀河系内部に滞在後、
バーができてから外側に移動

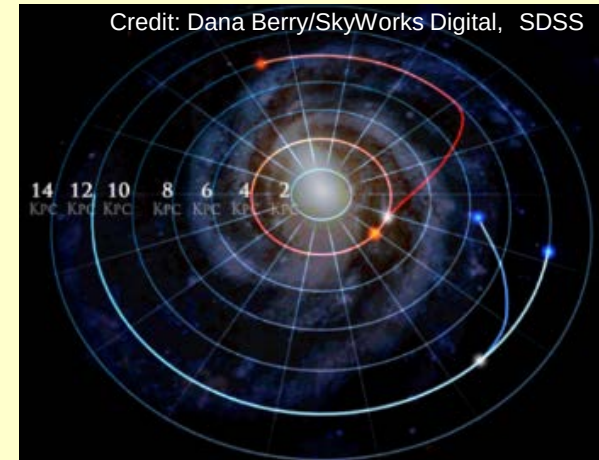
天の川銀河内での**太陽系の**
軌跡の探求へ進展



太陽系の**周辺宇宙環境の変動史**



惑星系のハビタビリティに影響
地球生命の誕生や進化に影響！？

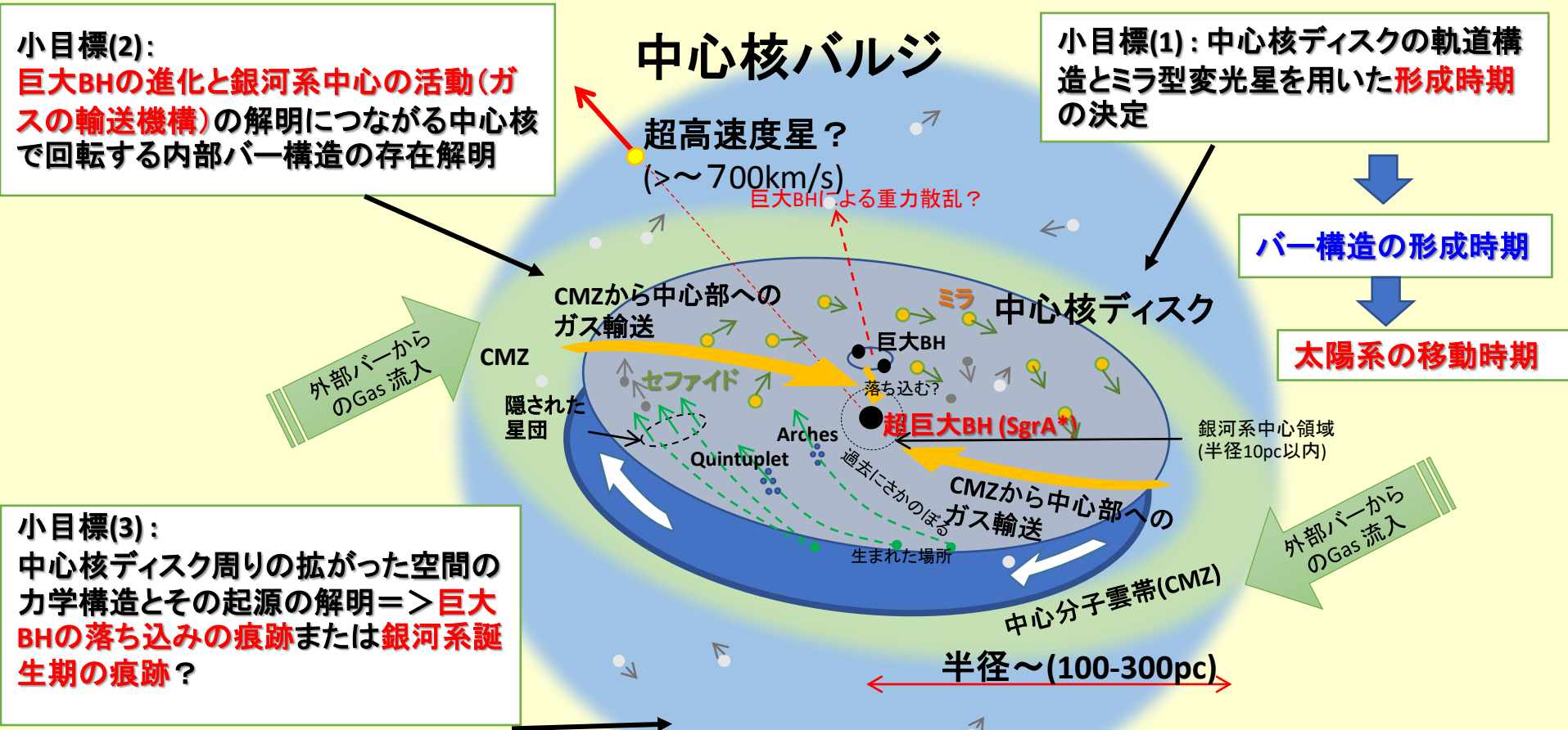


太陽は内部で誕生した可能性が高い。
いつ、どのように現在の位置まで移動
してきたのか？

(例えば、Tsujiimoto & Baba 2020)

★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
=> 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

JASMINEによる天の川銀河の歴史探究

>100億年前

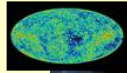
時期???

→ 現在

天の川銀河の種が誕生

バー構造の出現

天の川銀河全体への影響



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

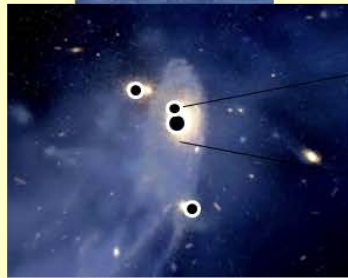
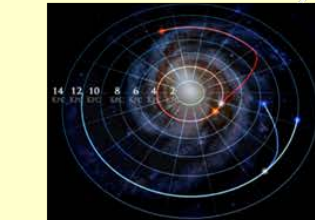
約30億年

出現前

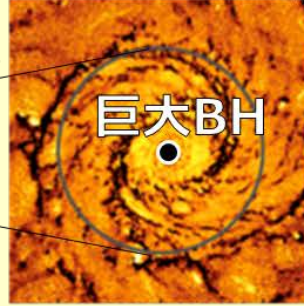
約10億年

出現後

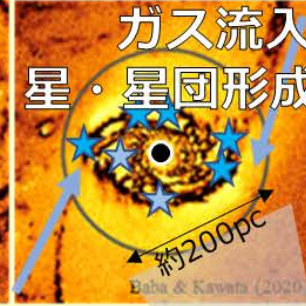
太陽は内部で誕生(!?) → 惑星形成
に影響!
気候変動?
生命進化?
人類誕生?



古典的
バルジ

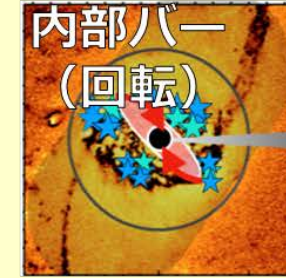


巨大BH

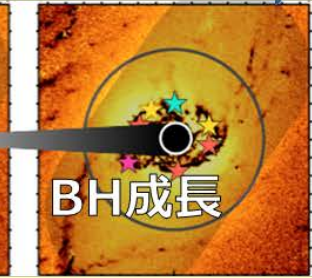


ガス流入
星・星団形成

約200pc
Baba & Kawata (2020)



内部バー
(回転)



BH成長

銀河中心考古学イベント①

銀河中心考古学イベント②

銀河中心考古学イベント③

1. 中心部での最初の星形成

→ 現在も中心部に残存!?

中心核ディスク形成時期

→ 2. バー構造の形成時期

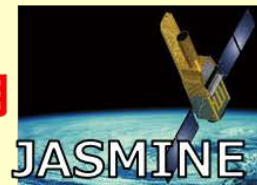
巨大BHが中心部に落ち
込んできた痕跡?

内部バー形成

→ 中心の超巨大BHへの
ガス供給

→ 3. 超巨大BHの成長
(質量増加)

JASMINEは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。



2020年ノーベル物理学賞
天の川中心における
超巨大BHの存在!

Gaia

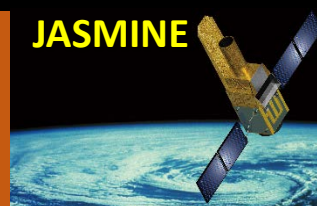


- ・太陽系近傍
- ・広域のハロー星
- ・バルジ/バー構造の上層部
- ・銀河円盤上層部

相補的

Gaiaでは
測定困難な
領域あり！

JASMINE



- ・中心核バルジ
- ・中心近くの銀河円盤
- ・星間ガスに覆われた
星形成領域

JASMINEのユニーク性！

- ・全天サーベイ
- ・3回目公開(2020.12)の
中間データでは、
約15億個の星の
位置天文情報。
年周視差精度は
明るい星で20~30 μ as

画期的！天の川銀河
研究の大革命が
起こって
きている！！

1. ハローの構造・形成史
(銀河考古学)
2. 太陽系近傍や
反中心方向の
銀河円盤の速度構造
3. バー構造のサイズ・
回転速度

中心核バルジは“**歴史の宝庫**”
様々な年齢をもつ星が年代に
応じて、異なった空間構造と
系統的な運動分布をして
今も存在している。

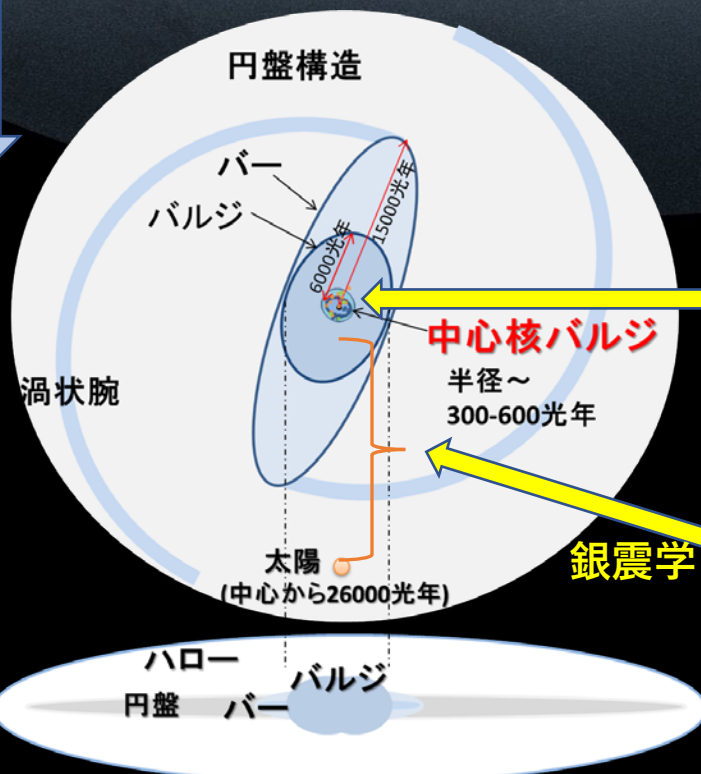
銀河中心考古学

1. 中心核バルジの構造
(天の川銀河誕生時の構造の痕跡?)
2. 中心核バルジ内の円盤構造の形成時期
→バー構造の形成時期を決定
→太陽系が銀河内部から移動を開始
する時期
→地球誕生や人類の誕生にも影響
3. 超巨大ブラックホールの質量成長
4. 内部円盤の振動

銀震学

中心方向以外：低質量星周りの
生命居住可能領域にある地球型惑星探査

高頻度長時間モニター可能

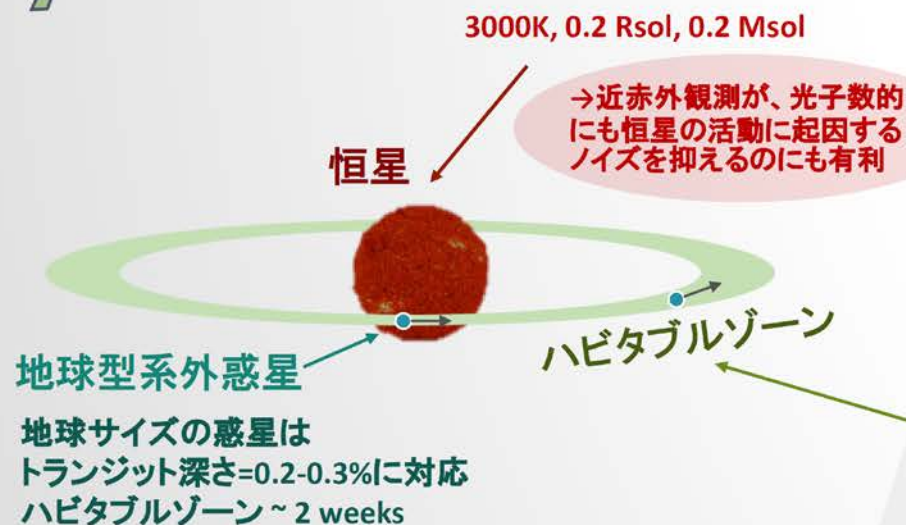


トランジット観測による中期M型星周りの生命居住可能領域 (ハビタブルゾーン)にある地球型惑星の探査

JASMINEの位置天文観測に要する性能があれば、生命探査に適した惑星発見の可能性あり！
日本で衛星による系外惑星探査観測は初めて！
(JASMINEでのみ狙えるターゲットであり、他の衛星プロジェクトに対し有利)

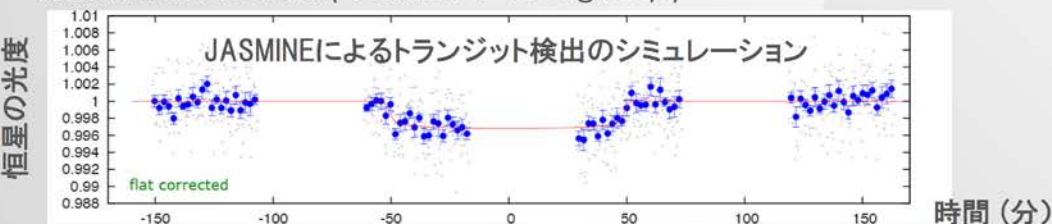


精密測光によるハビタブルゾーン地球型惑星検出

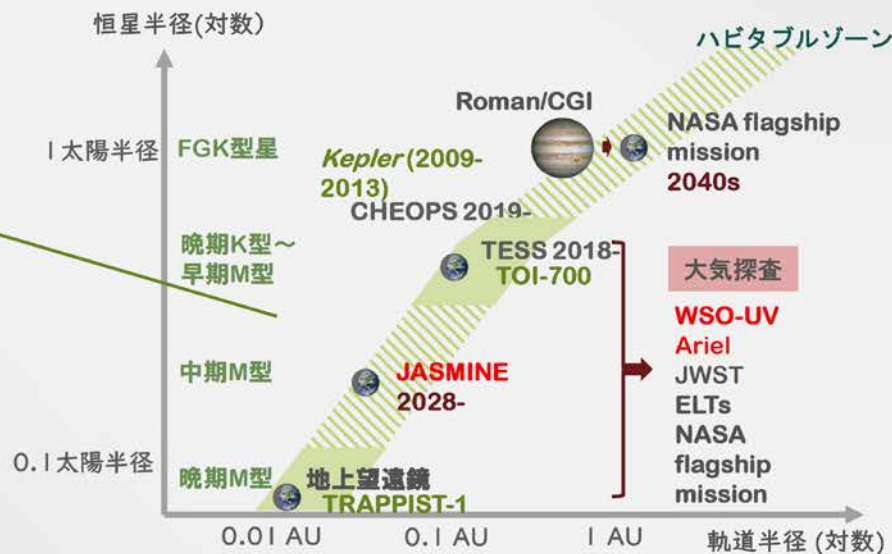


→宇宙からの連続精密測光の必要性

精密測光手法の開発(平野照幸、e2e group)



下図:恒星の大きさによりハビタブルゾーンの位置が異なる. 斜線部は未探査領域



→JASMINEで他のミッションでは難しい領域を探る

スライドオリジナル 河原氏(東大)作

■ JASMINEのアウトプット

(プロジェクトチームとしてのアウトプット目標)

1. 銀河中心バルジ方向において観測した星の天球面上の位置変動の時系列データおよびそこから導出される星の年周視差、固有運動等をカタログとして作成し、世界の研究者へ恒久的に公開する。 *** 世界同時公開**
2. 系外惑星探査を目的としたターゲット天体の時系列測光データを提供する。

1. 銀河系中心のプロジェクトサーベイ(春・秋期)カタログ

銀河系中心核バルジ方向の領域サーベイ 春と秋に観測

*領域1 => 中心核バルジ全体(半径~100pc程度に相当)

*領域2 => 中心核ディスクに沿った一部 *** 変更を検討中**

9等級<H_W(1.1~1.6μm)<14.5等級の星(TBD)をダウンロード

$$*H_W \sim 0.78J + 0.22H - 0.03(J-H)^2$$

約10万個の星を地上にダウンロード

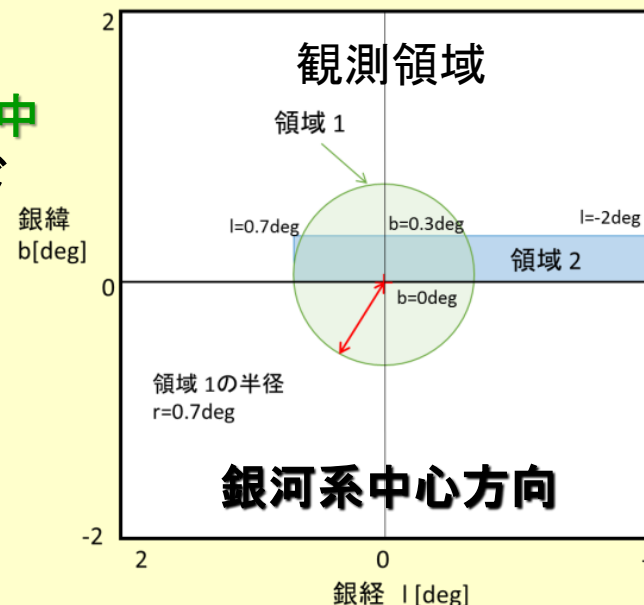
*** 何十回かに1回の割合で全画面もダウンロード(見込み)**

年周視差精度: 25マイクロ秒角~125マイクロ秒角

(25μ秒角=> 銀河中心での距離の誤差が20%に相当)

固有運動精度: 25マイクロ秒角/年~125マイクロ秒角/年

(銀河中心での接線速度の誤差が1km/s~5km/s)



2. 銀河系中心以外の特定天体観測(夏・冬期)

○中期M型星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星探査

○その他(JASMINEコンソーシアムで議論)

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

* 固有運動等の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

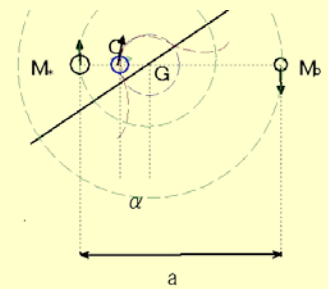
(4)バルジ内の**共生星x線連星**や**x線点源**の解明

(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—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)

3-2. JASMINEの ミッション概要

○JASMINEの仕様案(今までのベースライン)

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

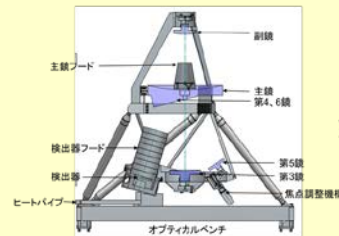
アストロメトリ用観測波長: 1.1~1.7ミクロン

衛星重量: 約550kg(RCS込み)

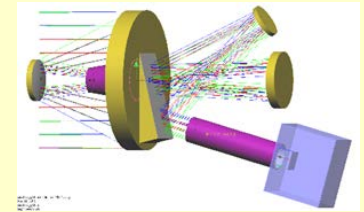
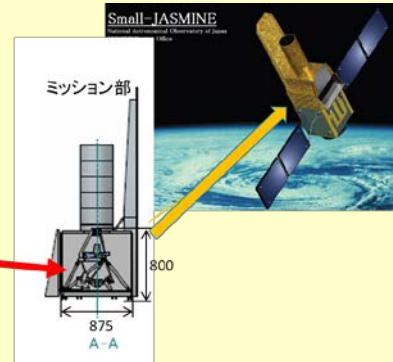
→ベースラインの変更を検討中

H4RG(Teledyne社)

国産赤外線センサーの宇宙用化開発へ切り替え



望遠鏡



○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。

○軌道: 太陽同期軌道(高度約550km以上)(tentative)

○観測期間: 3年間程度

○時系列データは、約50分間の連続撮像、その後

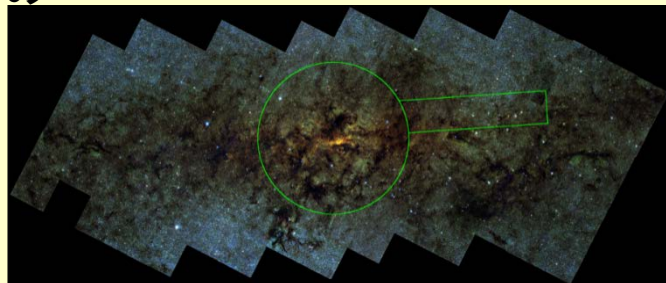
約50分間の非観測時間、**銀河中心方向の観測領域**

そして再度 約50分間の

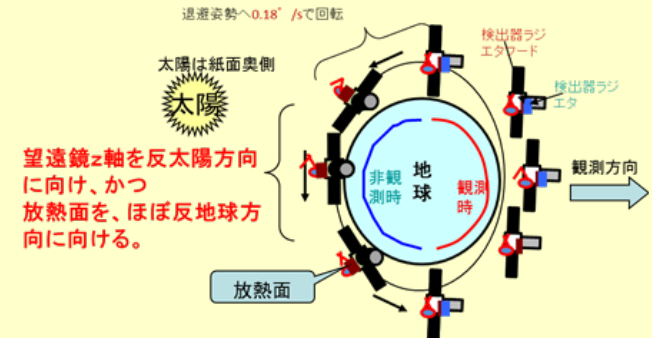
連続撮像データ。

観測の総時間まで

それが繰り返される。



イプシロンSロケットでは打上能力がアップされるため、高度は再検討中



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.

■ 赤外線検出器の宇宙用化開発

- 地上用に開発された天文観測に適する高性能な**国産赤外線検出器(InGaAs)の宇宙用化**を進め、JASMINEにも搭載する方針に変更。
*この検出器のスペック→JASMINEへの搭載可能性を確認
(望遠鏡の一部の仕様は変更)
- 国産検出器の特性を最大限に活かすため、光学系要求事項を含む**衛星検討ベースラインを変更**した。

メリット

- 検出器の一部の性能(低ノイズ性など)は、米国製の検出器に勝るところもあり、天文観測に大変有効。また、もしこれが宇宙用化されれば、JASMINEはもとより、**今後の天文観測衛星等にも有効活用**でき多くの需要が期待できる。
- 価格や情報入手の面でも米国製よりメリットが大きい。
- 国産技術の強化につながる。

★ 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5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。

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!**

- * 短時間(50分程度)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

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
モデル化することが必要



システムに工夫が必要
⇒ 熱構造安定、指向安定性など

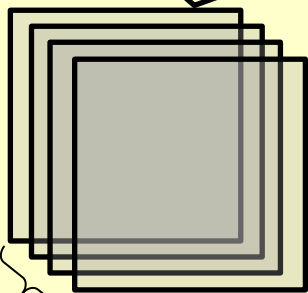
- * モデル残差をホワイトノイズ化。多数回観測で誤差の減少
⇒ 適切な誤差配分とモデル化、データ解析により、 $\sqrt{N}$ 則で達成

★観測手法・データ解析の概要

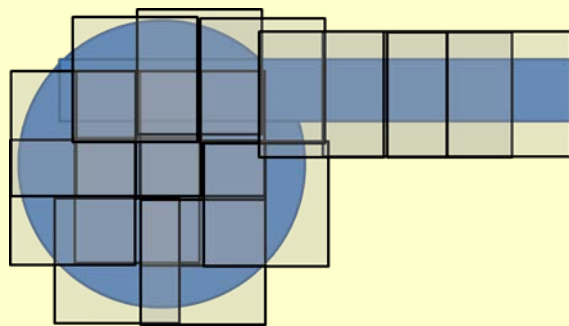
* 変更を検討中

単位フレーム(10 秒間撮像した視野サイズの画像):

(A) 星像中心位置の推定



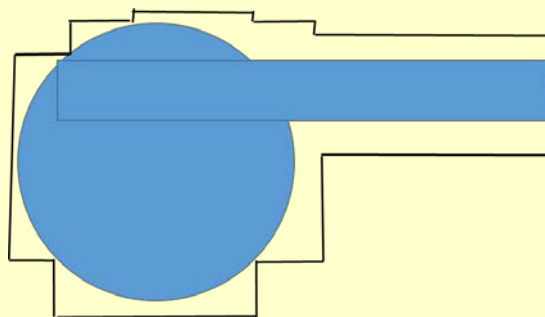
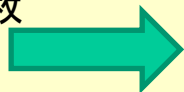
(ほぼ同一視野の)単位フレーム約20枚
=小フレーム



小フレーム(視野サイズ)

(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



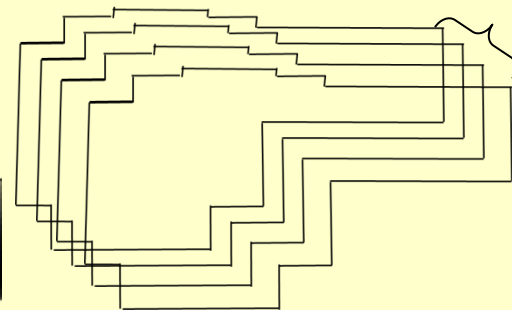
大フレーム

(銀河系中心方向の観測領域全域)

約3年間の運用期間
(1年のうち、春と秋の約半年観測)



大フレーム約8000枚



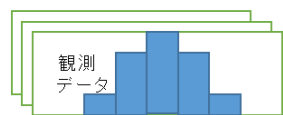
(C):

系統誤差補正

年周視差・固有運動導出

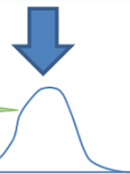
★実証方法

A ePSFによる星像中心位置決定



観測データからePSF作成

ePSF : effective PSF



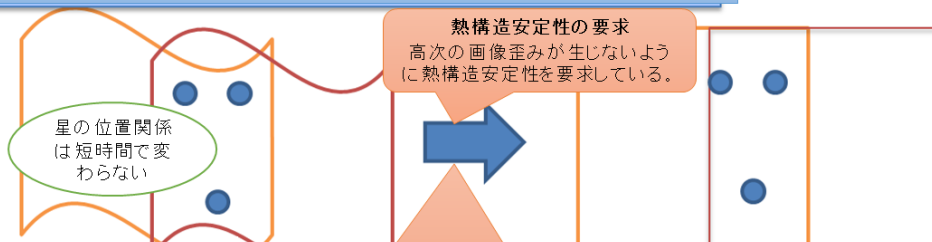
達成精度

(相対的) 星の位置精度
1/130ピクセル
(4ミリ秒角相当)

○数値シミュレーション(2次元)

○HSTデータを用いた解析

B 画像歪み補正された大フレームの作成



共通する星を頼りに光学歪みと検出器ピクセルの不均一などによる歪みを補正

達成精度

(相対的) 星の位置精度
0.001ピクセル
(0.5ミリ秒角相当)

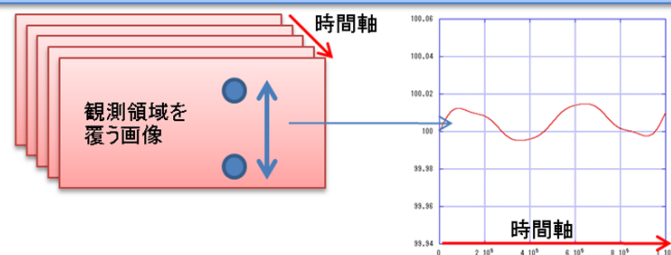
(1つの星につき100回
弱の観測で得られる)
誤差

○地上実験と実験を模擬した
数値シミュレーション(1次元)

○数値シミュレーション(2次元)

○HSTデータを用いた解析

C 多数枚画像での系統誤差補正と星の運動導出



星の運動導出

達成精度

年周視差の精度
20マイクロ秒角

系統誤差の分離

○地上実験と実験を模擬した
数値シミュレーション(1次元)

○数値シミュレーション(2次元)

系統誤差は、なるべく簡単な関数形でモデル化できるのが望ましい
(パラメータが少ないなど) → システムへの要求(熱構造安定性等)

○星像の“質が良い”撮像データ

星像中心の高精度推定→

- ・鮮明な星像(光学系)、望遠鏡の低擾乱、**低ノイズセンサー**、
- ・十分な光子量の獲得(**高感度センサー**、口径が大きな望遠鏡)

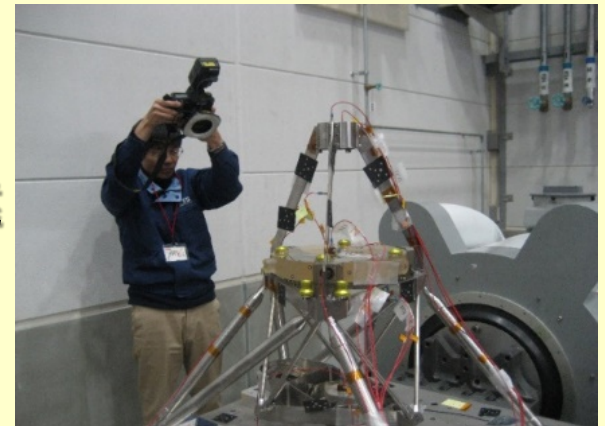
○限られた観測期間中での観測領域の拡大(**広視野**)

→**大画素数**

○高精度な年周視差や固有運動→

観測装置の**熱構造安定性**

熱構造安定な望遠鏡構造案：我々が企業と一緒に開発した**熱膨張率が $0 \pm 5 \times 10^{-8}/K$ の超スーパーインバー**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。





3-3. スケジュール

★JAXA宇宙研での審査状況、開発フェーズ

- * JAXA/宇宙研での国際審査を含むいくつかの審査を経て、「小型JASMINEミッション」(通常、JASMINEと記す)は、
2019年5月、JAXA宇宙研により公募型小型3号機に選定していただいた。

★宇宙基本計画工程表(令和3年度改定)

内閣府宇宙政策委員会→
内閣府宇宙開発戦略本部(首相が本部長)
で決定(2021.12.28)

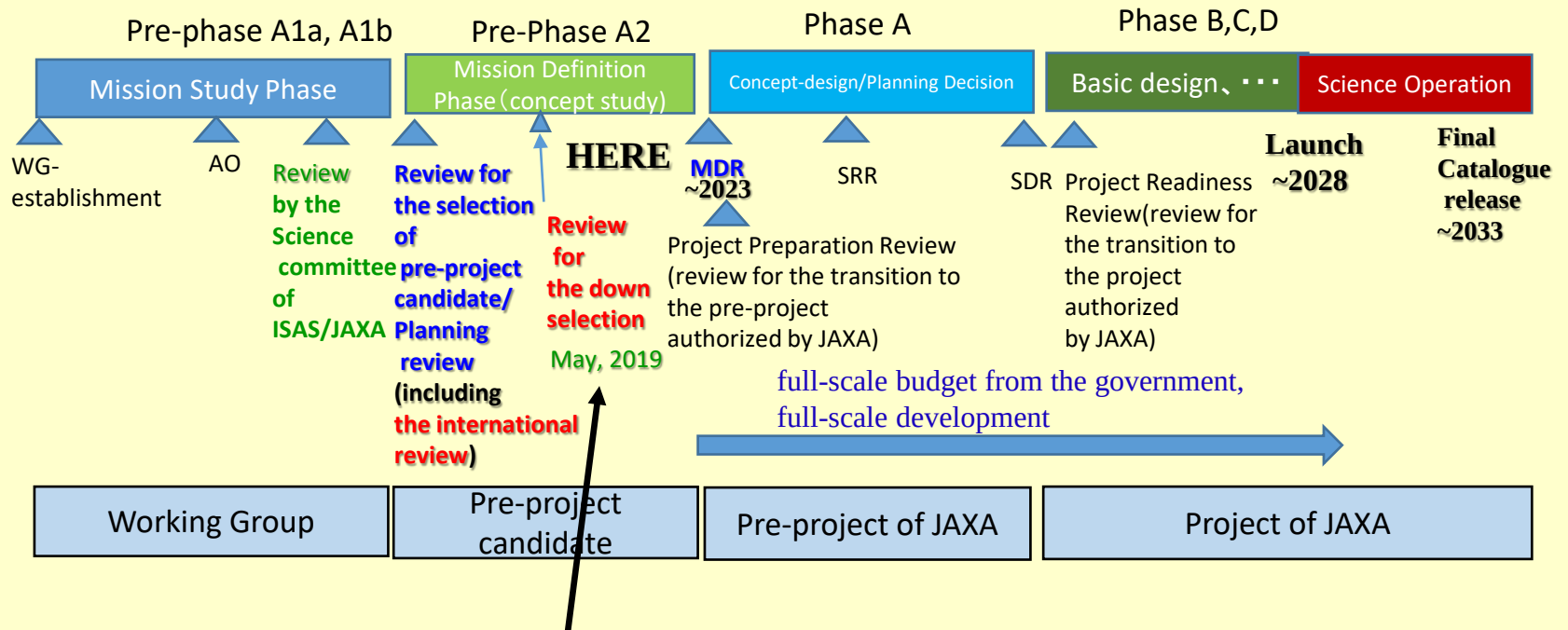
JASMINEの打上げは、**2028年**に位置づけられている

* 現在は、Pre-Phase A2の段階。

次は、MDR(ミッション定義審査:2023年春)とプロジェクト準備審査を経て、Phase Aへ進むこと(JAXAのプリプロジェクト化)を目指している。

★ Present status of JASMINE and Plan

～ Multiple steps of reviews by JAXA ～



**ISAS/JAXA selected (Small-) JASMINE
as the unique candidate for the 3rd M-class
science satellite mission in May 2019!!**

赤外線位置天文観測衛星「JASMINE」

世界的位置付け（他のプロジェクトとの連携）：タイムリーな打上



位置天文観測

- 銀河系サーベイデータが出揃う2020年代に、位置天文観測による銀河中心領域の基礎データを提供する。
- 多波長での分光観測等を行う地上観測とは相補的な関係にある。一方、スペース位置天文として競合するミッションは存在せず、JASMINEのサイエンス価値は高く評価されている。JASMINEの成果はESAの将来計画であるGaiaNIRへと繋がる。

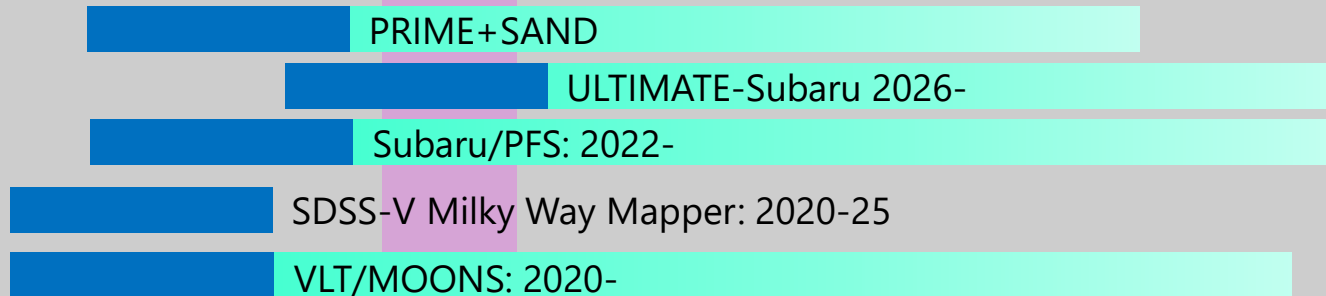


Gaia: 2013-25(?)

Gaia Final Full Data Release: 2028(?)

GaiaNIR: 2045(?)

地上観測とのシナジー
(可視光・赤外線)



系外惑星探査



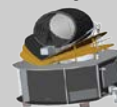
JWST: 2021-2031(?)

ARIEL: 2028-2032(?)



WSO-UV: 2025(?)

- JASMINEで発見した地球型惑星に対して宇宙望遠鏡(JWST、WSO-UV、ARIEL)による大気観測を実施予定
⇒JWST等が稼働中の打上げ、観測が必須。





4. 全体の進捗状況

*地上用に開発された国産赤外線検出器の宇宙用化開発

この検出器開発はJASMINEに限らず今後の宇宙科学ミッションの共通の技術領域の一環として宇宙研における技術開発の中で位置づけ、開発を進めている。

- センサチップ開発、エレキ開発、熱構造検討に関して、JAXAを中心として、国立天文台JASMINEプロジェクト&先端技術センターが協力して各々の担当メーカーと共に開発を進めていく体制が構築された。
- 検出器試作品に対して**放射線照射試験を段階的に実施**。
(i)Co⁶⁰ 照射試験@東工大(2020年9月)、(ii)陽子照射試験@高崎量子応用研究所(2021年6月)

★進捗状況(続き)

＊衛星システムの成立性検討：

- 国産検出器の特性を最大限に活かす
→光学系要求事項を含む**衛星検討ベースライン案を変更**
- 衛星システムの実現可能性、光学系の実現可能性の見通しの**feasibility study**を複数の衛星メーカー候補と実施。

最大の課題はリスク削減を行い、コスト削減の目処をつけること。

＊ 目処はつきはじめてきたが、今後、さらに精度をあげていく

＊地上系の検討：

地上系：衛星の運用 (計画立案・コマンド作成を含む)、データ受信・利用・アーカイブ等に関連する地上設備・インフラ (ソフトウェアを含む)

JAXA宇宙研のC-SODA(科学衛星運用・データ利用ユニット)が、JASMINEに対して対応・調整をして頂くことになり、検討が開始。

★進捗状況(続き)

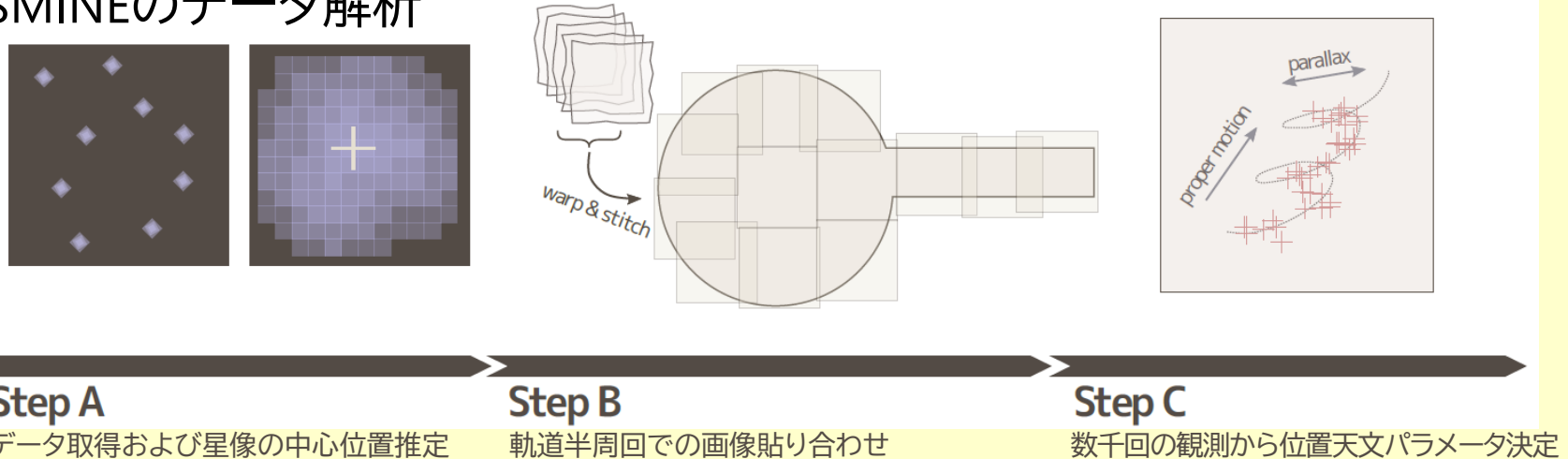
*データ解析の検討:

End-to-End simulation: e2eシミュレーショングループの活動
(JASMINE Consortiumのデータ解析WG)

- ・データ解析ソフトウェアの実装を進め、想定されるノイズ源を反映させた
End-to-End simulationを行うための開発を若手を中心とした十数名程度のメンバーで精力的に行っている。
- ・Heidelberg大学との国際協力の進展
 - * astrometryのデータ解析に関して定期的な会合
 - * 4日間連続のオンラインワークショップ開催(2021年10月)
 - * JASMINEの検討のための旅費をHeidelberg大学で獲得。
 - * Heidelberg大学から、ドイツ宇宙機関(DLR)へJASMINEのデータ解析のためのポスドク2名の雇用経費を申請。→**予算申請が採択された！！**
- ・Barcelona大学との国際協力の開始
 - * 連携して測光精度評価の検討を進めていくことになった。

データ解析・End-to-End simulation(E2E)の進捗

■ JASMINEのデータ解析



① 理想的な観測装置を仮定した評価: アルゴリズムの成立性確認 (～2021/12)

- 光学歪、一様なWavefront Error(WFE)、検出器のノイズ特性(仕様書)、指向擾乱(ガウス分布)
 - ✓ Image Simulatorを開発、星像中心位置推定方法を確立した。
 - ✓ 理想的な条件において光学歪補正を行った。
 - ✓ 位置天文パラメータ決定方法を確立した。現実的な状況での評価を進めている。
 - ✓ E2Eチームとして、国内外の大学研究機関から約20名が開発に参加。

② 主な擾乱源を取り入れた成立性の評価: データ解析による達成検証 (～2023/2)

- 複数の検出器、非一様WFE、光学歪の時間変化、検出器のノイズ・放射線特性(文献値)、フラット、指向擾乱(パワースペクトルから生成)

③ 考えられうる最悪のケースにおける評価 (～2028: 打ち上げまで継続)

- 連星系、星のカラー、光行差、pixel形状の不均一、現実的な撮像数・星の数、検出器のノイズ・放射線特性(測定値)、その他

④ 実データによるノイズの推定 (打ち上げ後の実際の観測データ)



6. 実施体制

推進体制

JAXA宇宙科学研究所 准教授公募選考中

片坐宏一(プリプロジェクト候補チーム長)
臼井文彦、磯部直樹、和田武彦(検出器開発)

国立天文台 JASMINEプロジェクト

プロジェクト長: 郷田直輝

助教公募選考中

鹿野良平、上田暁俊、小宮山裕(併任)、辰巳大輔、辻本拓司、馬場淳一、三好真、矢野太平、鹿島伸悟、宇都宮真、間瀬一郎

E2Eシミュレーショングループ(データ解析WG)

グループ長: 山田良透(京都大学)

河原創、上塚貴史、大澤亮、福井暁彦(東京大学)、平野照幸、大宮正士(ABC)、逢澤正嵩(SJTU)、鈴木大介(阪大)、
泉浦秀行、津久井尊史(国立天文台)、服部公平(統数研)、
立川崇之(高知工専)、吉岡諭(東京海洋大)

国立天文台 先端技術センター

センター長: 鵜澤佳徳

技師長: 平林誠之、

満田和久(技術主幹)、

末松芳法(光学)、中屋秀彦(検出器)、大淵喜之 & 浦口史寛 & 清水 莉沙(熱構造)

系外惑星探査プログラム チーム(トランジット観測による地球型惑星探査等)

河原 創(チーム長: 東大)、増田賢人(阪大)、小玉貴則、福井暁彦(東大)、葛原昌行、大宮正士、小谷隆行、平野 照幸(ABC/NAOJ)、山田亨(ISAS)、他

JASMINE Consortium

WG-A(Data Analysis)、WG-B(Science Validation and Preparation)、WG-C(Outreach)

リーダー: 河田大介 (MSSL/UCL)、国内外60名の研究者(2021年4月現在)

2人の 研究員雇用 (2022.春～)

ESA

国際協力

ARI Heidelberg University

Michael Biermman, Wolfgang Löffler

University of Barcelona

C.Jordi, JM.Carrasco, X.Luri

U.S. Naval Observatory

Bryan Dorland, Nathan Secrest



国際協力(サイエンス関連)

1. APOGEE-2(分光観測:視線速度、元素組成)と

JASMINEはサイエンス協力でMOUを締結済み

→APOGEE-2のPI(S. Majewski)がJASMINEのWP執筆に協力

2. VVVとGALACTICNUCLEOUS(測光観測:
固有運動など)

PIと直接会った折に今後協力していくことに。

3. Romanとの連携(赤外線位置天文観測) 担当者と相談

4. Milky Way Mapper & Moons

(分光観測:視線速度、元素組成)

今後、連携を希望

5. 将来の国際的位置天文観測衛星への橋渡し
(TheiaとGaiaNIR)

TheiaとはMOU締結。GaiaNIRのWP作成に参加(河田、郷田)

★JASMINE Consortium (JC)の設置

(代表:河田(UCL): 60名程度(2021.4現在)の研究者)

サイエンス検討(様々な分野)

コミュニティ: 光赤外、理論、X線天文学、電波天文学、重力波...

研究対象: 銀河系力学・進化、巨大BH、星団・星形成、
BH・ダークマター探査、...

+ 他の観測
プロジェクト
との連携

WG-A: Data Analysis

データ解析手法の確立とソフトウェア開発

* ビッグデータを扱う光赤外観測プロジェクト、系外惑星観測、...

* Gaiaのデータ解析チームとの国際協力

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
(模擬カタログ)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

* 公開のJC meetingを毎年度開催。Science Workshopも兼ねる。

* JCへのご参加も是非、よろしくお願いします。

今後もしっかり御願ひします

Jasmine

