



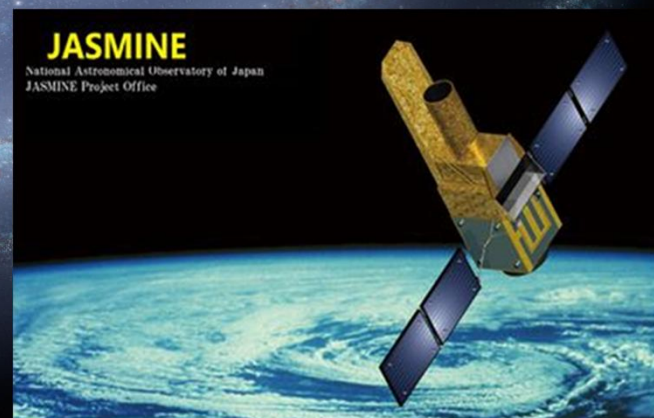
高精度位置天文観測で挑む天の川銀河の謎

副題： 赤外線位置天文観測衛星計画JASMINEの歩みと今後

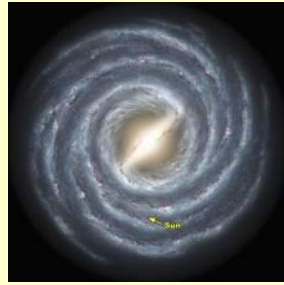
郷田直輝（国立天文台JASMINEプロジェクト）



Credit:NASA



今日のお話し



1. はじめに

- ・解きたい究極の謎とは？

2. いままで、宇宙のどういうことが分かってきたか？

どういう謎が残っているか？

3. 天の川銀河探究

4. 位置天文観測による謎解き

- ・位置天文観測とは？
- ・位置天文観測の歴史
- ・位置天文観測衛星Gaiaの成果

5. 赤外線位置天文観測衛星JASMINE

- ・JASMINEとは？
- ・JASMINEの誕生と歩み
- ・JASMINEへの期待

6. おわりに

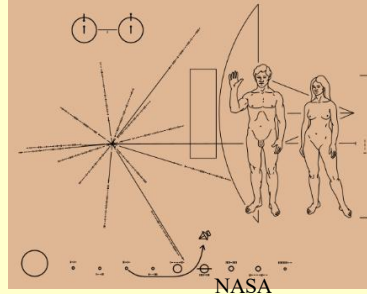
1. はじめに

★解きたい究極の謎とは？

* 人類がなぜ宇宙にいるのか？



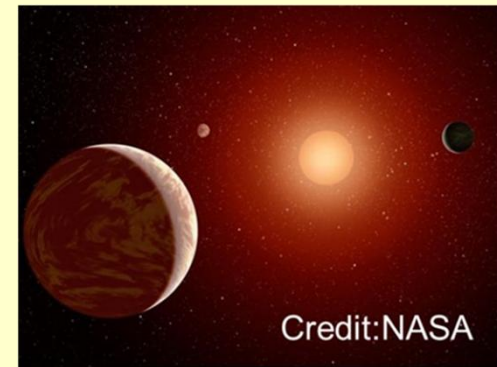
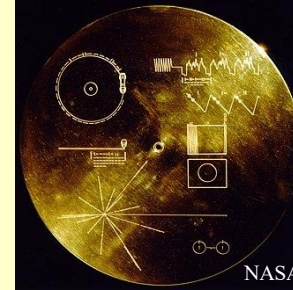
宇宙：銀河、星
→惑星→生命→人類



* 我々は宇宙で孤独なのか？



太陽系外の生命探査



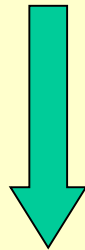
2. いままで、宇宙のどういうことが
分かってきたか？

どういう謎が残っているか？

★宇宙には何(どんな天体)があるの？

★どれぐらい広いの？

宇宙は広大、豊か



宇宙の階層構造(かいそうこうぞう)

星は遠い！！！！

天文学での距離スケール

光は秒速約 30万 km

→ * 1秒間に地球を約7周半 (地球の直径 : 約1万3000km)

* 月まで1秒ちょっとで到着 (月までの距離 : 約38万km)

* 太陽まで約8分で到着 (太陽までの距離 : 約1億 5000万km)

→ 今、見ている太陽は、約8分前の太陽の姿！！

天文学では、光が1年間に進む距離が距離の単位 (たんい) の1つとなる (研究者は、パーセクという単位をよく用いる)。

1光年 (こうねん) = 約 9.5×10^{12} km
(9兆5000億 km)

* 例 : 北極星は約430光年

→ 約430年前の北極星を見ている！！

宇宙の階層構造

だいこうぞう

宇宙の大構造

ぎんがぐん
銀河群

わいしょう ぎんが
矮小銀河

たいようけい
太陽系



ぎんが
銀河



ぎんがだん
銀河団



星団 せいだん



1 10 100 1千 1万 10万 100万 1千万 1億光年
おおよの大きさ(光年)

1光年 = 光の速さ(秒速約30万km)で1年間進む距離
= 約 9.5×10^{12} km(9兆5000億km)

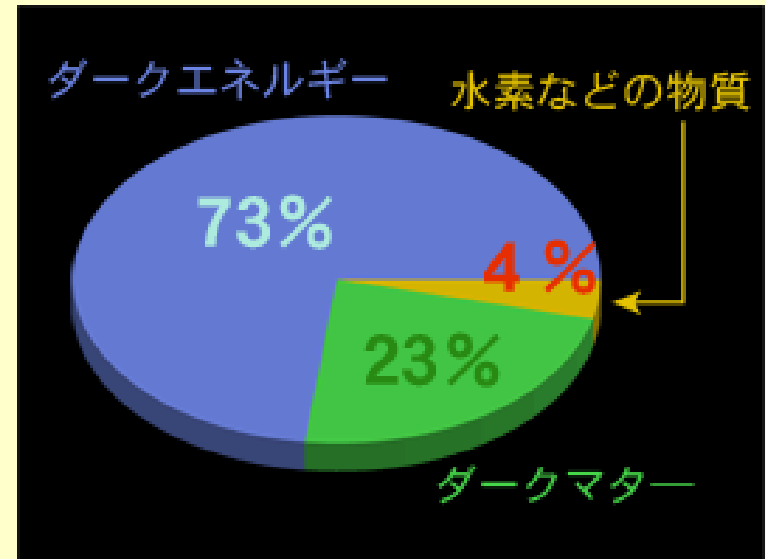
★宇宙にはどんな物(もの)があるの？

◎最近のいくつかの観測事実

しつりょうひ

◎宇宙に含まれる物質の質量比(重さのわりあい):

普通の物質 (バリオン)	+ 暗黒物質(未知) (ダークマター)	+ 暗黒エネルギー(未知) (ダークエネルギー)
~4%	~23%	~73%

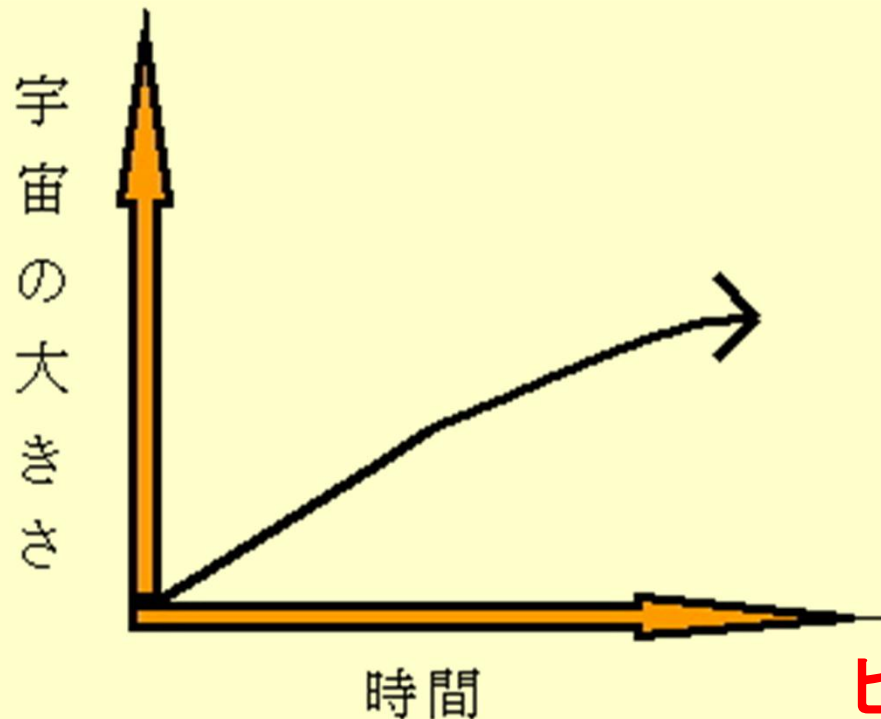


★宇宙全体はどうなっているの？

宇宙はどこも同じ。中心はない。

宇宙空間が^{ぼうちょう}膨張

宇宙の年齢は
約138億年

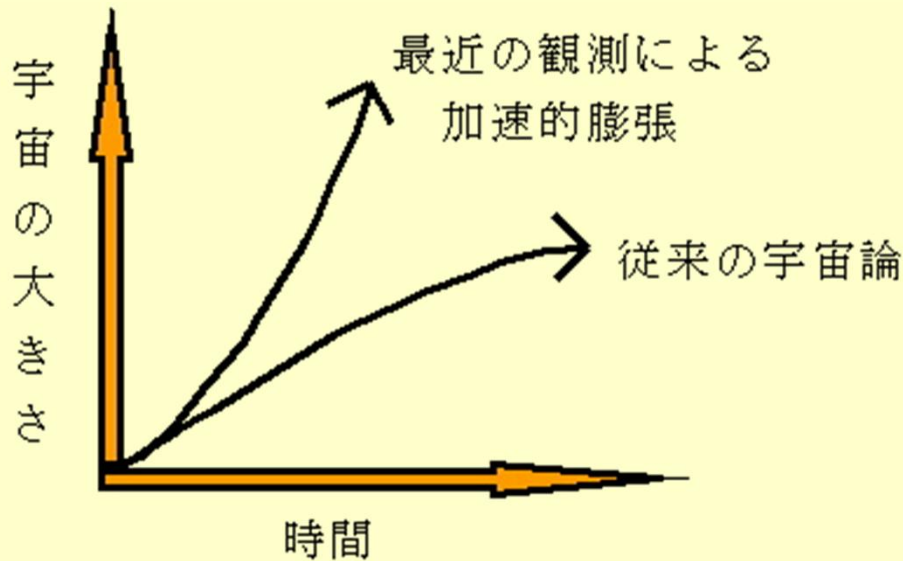


宇宙のごくはじめは
非常に高い
温度で、
高い密度の
状態

ビッグバン(火の玉宇宙)

ダークエネルギー（暗黒エネルギー）とは？

◎現在は加速膨張（“インフレーション”）



空間が膨張する速さが
どんどん大きくなっている



2011年ノーベル物理学賞



ダークエネルギー：反発力（斥力）を及ぼす

ダークエネルギーの正体は全く不明
（何かエネルギーの場？！）

4. 宇宙のはじめは？

～その後、現在までどうなってきたの？～

◎時空の創成(“量子重力理論”) 宇宙とは、時空そのもの。
その時空がまだ存在しない。何か得体の知れぬ“エネルギー”
↓ 時空が実存するものになる。宇宙の創成！

◎インフレーションモデル:空間の急激な膨張:物質が実存するものに転化。

↓ インフレーション場のエネルギーが物質や放射へ移る

◎ビッグバン:物質や放射が高温高密度状態。何の構造も無し。一様・等方、宇宙膨張

膨張により温度、密度とも下がっていった

○物質:“素粒子”——>原子、分子
(水素——>ヘリウムの合成)

○階層構造の形成:重力不安定説

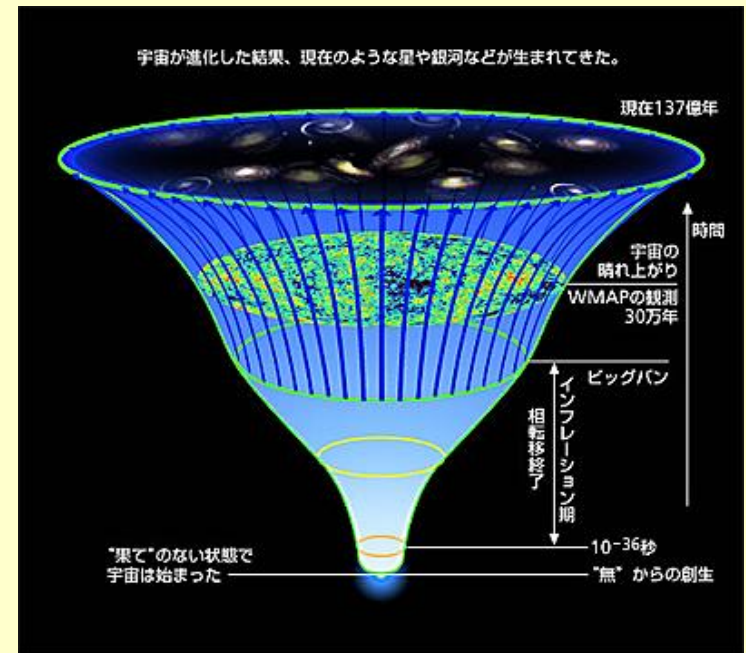
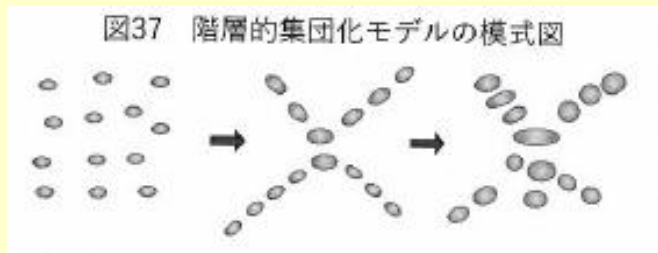
宇宙初期の物質のわずかな密度ゆらぎ

=> 自己の重力で密度が高まる

=> 銀河やその中で星が生まれる

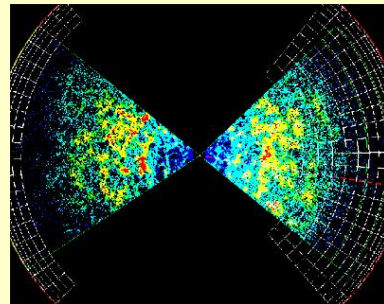
=> 銀河が集団化

=> 銀河団や超銀河団ができてくる。

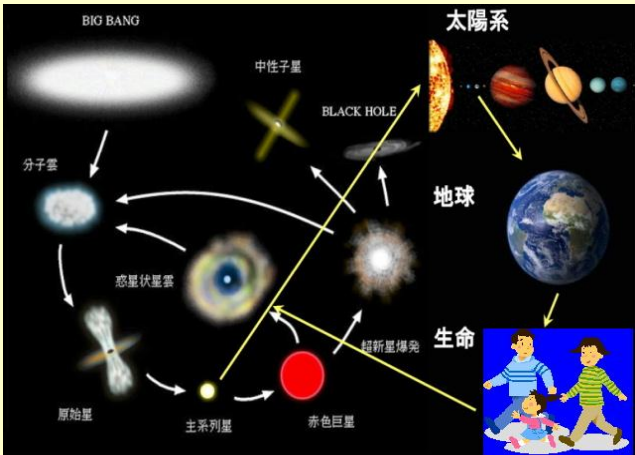
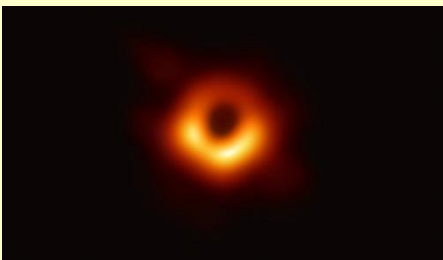


◎宇宙はまだまだ謎だらけ

- 宇宙はどうやって生まれたの？
- ダークマターとダークエネルギーは何？
- 銀河や大構造の形成？
- 星や惑星の形成？
- 星の一生？
- 巨大ブラックホール(BH)の形成？



* 天の川銀河の中心にも太陽の重さの約400万倍のBHが存在！！

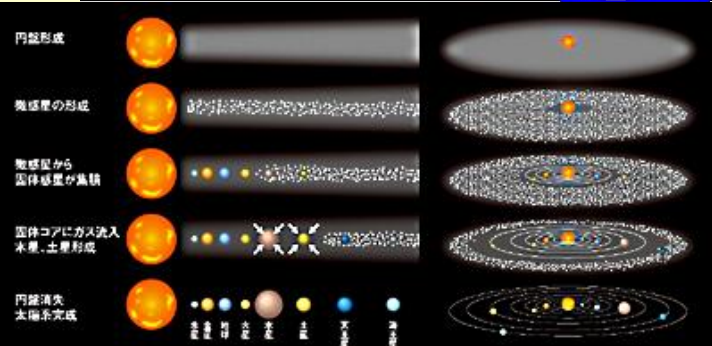


-
-

○宇宙人はいるか？



はやぶさ2:
太陽系の起源や
生命の起源を探る



3. 天の川銀河探究

恒星が
2000億
個以上
の集団



★天の川銀河を研究する意義

我々の宇宙にある銀河：
“見える範囲”でも2兆個以上（！？）



天の川銀河はその中の一個に過ぎない。
=>もっと多くの他の銀河を研究すべきではないか？



最大のメリット

個々の星に分解でき、星の距離、運動速度、年齢、
元素組成などが詳細かつ精密に分かる(近未来
では)唯一の銀河！！

* 天の川銀河=>他の銀河の良い“実験場”

さらに、天の川銀河の意義は…

★ 生命との関係

我々、“生命”が存在する銀河



生命が誕生し、維持できるための条件は？



生命を育む惑星の環境？

銀河の中の**生命居住可能領域**は？

→ ・惑星がある恒星は天の川銀河の中のどこで生まれたのか？

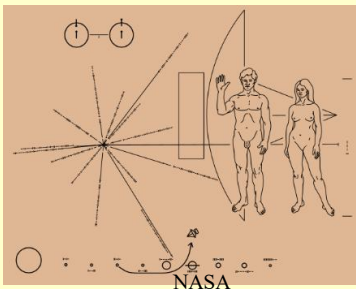
・天の川銀河の中で現在の位置までどのように動いてきたか？ “**宇宙環境の変動**”

★究極の科学目的

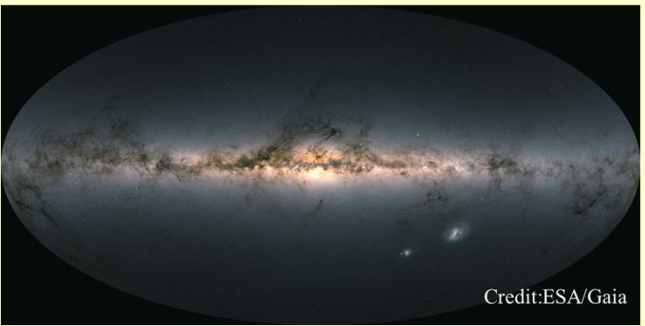
* 人類がなぜ宇宙にいるのか？



宇宙：銀河、星
→惑星→生命→人類



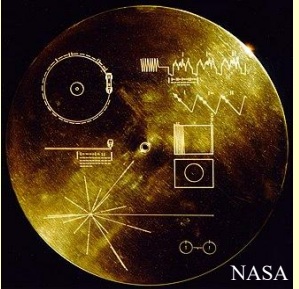
天の川銀河を“知る”！



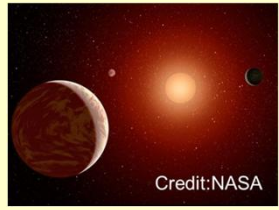
* 我々は宇宙で孤独なのか？



太陽系外の生命探査



天の川銀河内(特に太陽系
近く)の惑星探査



★天の川銀河の謎

まだまだ分からないことばかり

★天の川銀河の“正しい”形は誰も知らない

★どのように誕生して、現在のようになってきたかも不明（形成と進化の問題）

★構成天体（ダークマターなど）とその分布も不明

★中心にある巨大ブラックホールとの関係

さらに、最近の観測結果により、想像以上に複雑で躍動的である天の川銀河の姿が浮かび上がってきている！！

4. 位置天文観測による謎解き

★天の川銀河の“正しい”形

→星の“**立体地図(3次元空間分布)**”

★形成と進化の問題

→星の**立体地図**と**運動分布**

★構成天体(ダークマターなど)とその分布

→場所ごとの**重力の強さ**

→**星の立体地図**と**運動分布**

★中心にある巨大ブラックホールとの関係

→周りの星の**立体地図**と**運動分布**

★位置天文観測とは

天の川銀河内の**星の方向と距離** **星の運動**
“**立体地図**”

星の基本情報

天文学、宇宙物理学の様々な分野の研究に関わるデータ

* 他の銀河は遠すぎて、個々の星の距離や運動速度は観測できない

位置天文学 天文学の中で最も古い天文学の観測分野

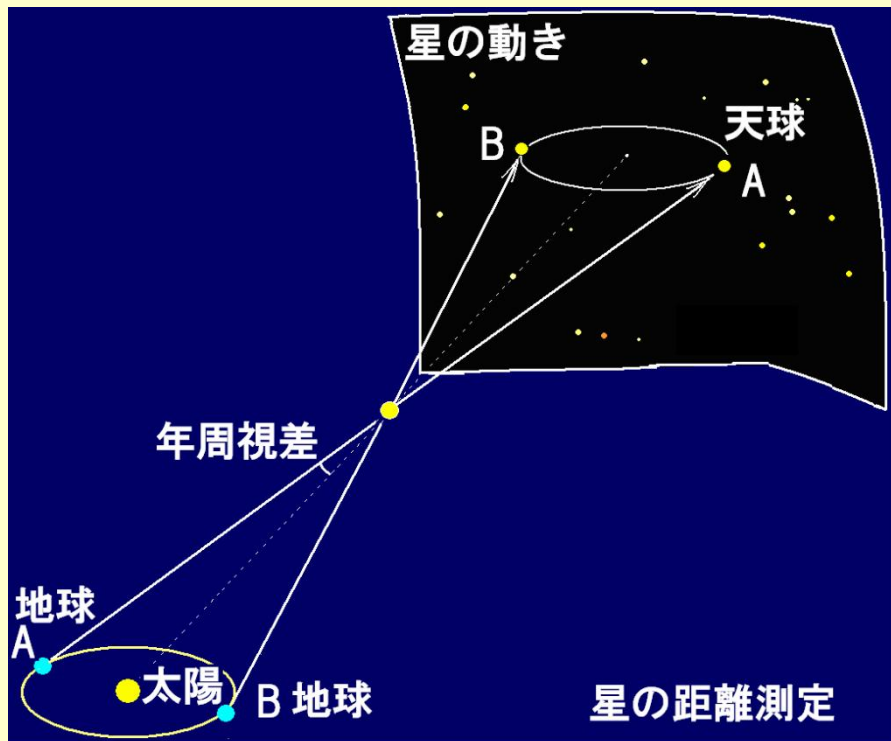


恒星は、天球面上(夜空)で一般的には、らせん運動をしている
* らせん運動 =
(年周)楕円運動
+ 直線運動(固有運動)

位置天文観測から何が分かるのか？

星のらせん運動:

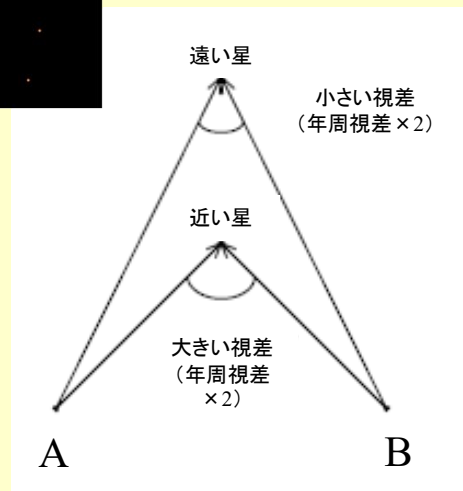
星がまるくまわっているように見えるのは、地球が太陽のまわりを回っている見かけの運動



距離を決める方法のしくみ

=>

三角測量



1. 星までの距離(奥行き)

2. 星の天球面上でのある時刻での位置
(2次元的位置)

3次元空間
での
星の位置



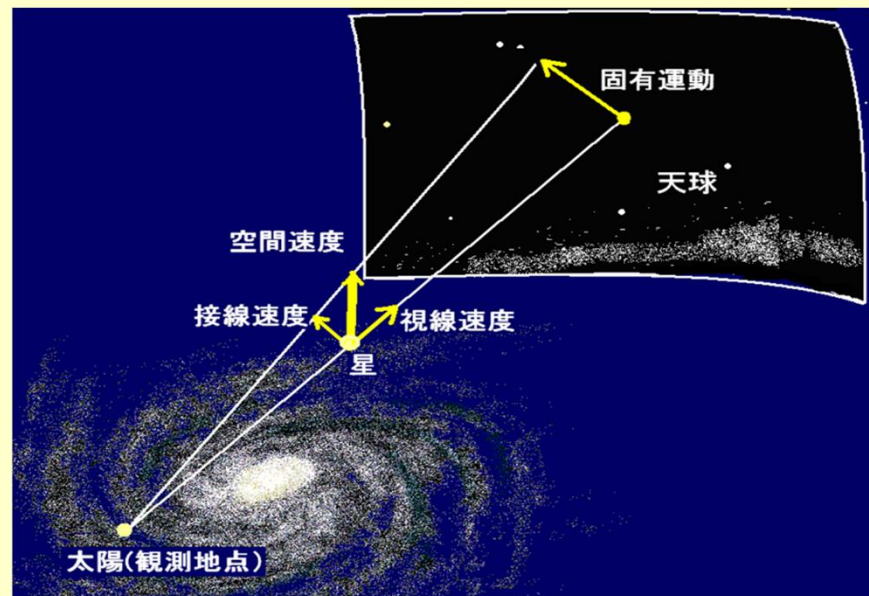
★ 星座を形作る星(恒星)も動いている！

まっすぐな運動

星は独自に運動

(秒速で数km~100km以上)

弾丸の速さ以上



星は、非常に遠くにあるので、地球からみると天球上(夜空)での動きは、ゆっくり。



しかし、何万年以上もたつとその変化に気づく

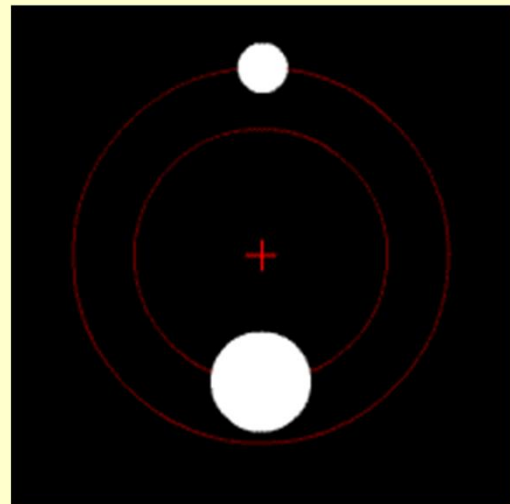
北斗七星

未来へ



HippLinerより:
野本(千葉大)制作

らせん運動からずれる星がある！



複雑(ふくざつ)な運動(うんどう)から
わかる謎(なぞ)

例1: 連星(れんせい)や

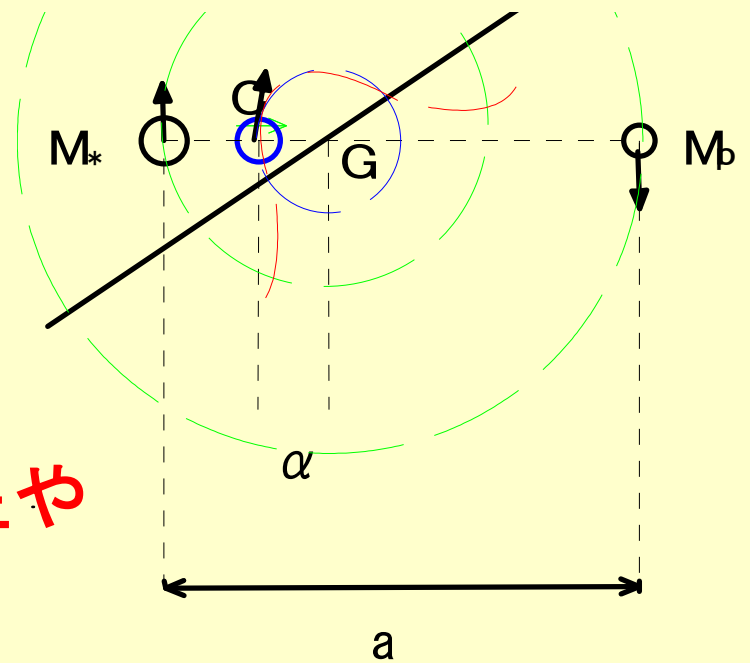
系外惑星(けいがいわくせい)がある場合



星の周期的(しゅうきてき)な
ふらつきが起(お)こる



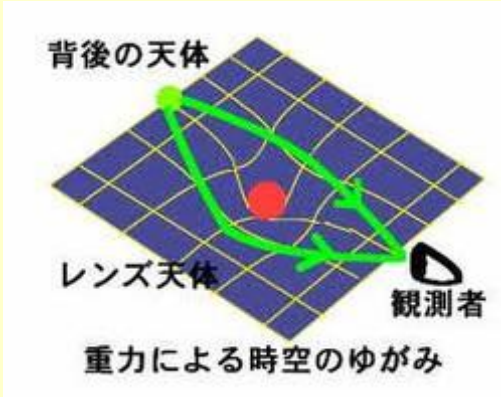
ふらつきの特徴(とくちょう)から連星や
系外惑星の質量(しつりょう)などが
予測(よそく)できる



例2: 重力(じゅうりょく)レンズ効果(こうか)による星の動(うご)き

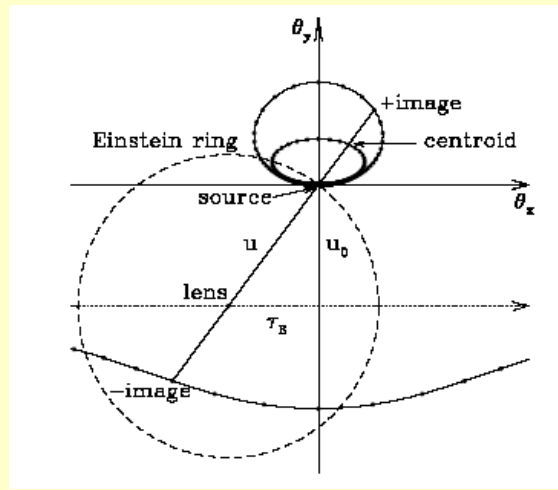
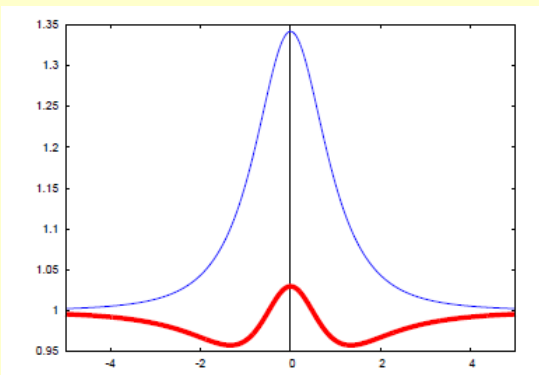
重力レンズ効果とは？

重力物質があると、
一般相対論的効果(時空のゆがみ)により
そばを通る光は曲げられる。



一時的な増光現象(ぞうこうげんしょう)

星の楕円運動(だえんうんどう)
(年周視差楕円とは、周期も形も異なる)な増光現象



重力レンズ天体の質量、速度、距離が分かる

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)

$$0.000000035 \text{ 度} = 125 \text{ マイクロ秒角}$$

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(ふとさ)を見込む(みこむ)角度(かくど)にひとしい。かみのけ

どのようにして、観測の精度を良くするか？

→これ自体が研究

→位置天文学

○位置天文観測の精度 (せいど) のうつりかわり

古代ギリシア、古代エジプト

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

↓
1980年代：地上にある望遠鏡での観測 ~0.03秒角

↓
*地上での観測では、空気のゆらぎなどで精度があまり良くない。
宇宙空間へ(ヒッパルコス衛星(ヨーロッパ宇宙機関ESA)：1989年打ち上げ)

人工衛星に望遠鏡をのせて宇宙空間から観測→位置天文観測衛星

1997年：ヒッパルコスカタログ
~0.001秒角

* 1ミリ秒角

2013年~2025年：ガイア(Gaia)衛星 (ESA)
~0.00001秒角



★ガイア (Gaia)の成果：位置天文観測の

大革命時代がやってきた！！ ヨーロッパ宇宙機関

大型の位置天文観測衛星Gaia(ESA)は革命的：

質（10マイクロ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なってきた！



天の川銀河の研究が大進展！！

Gaia

Credit: ESA

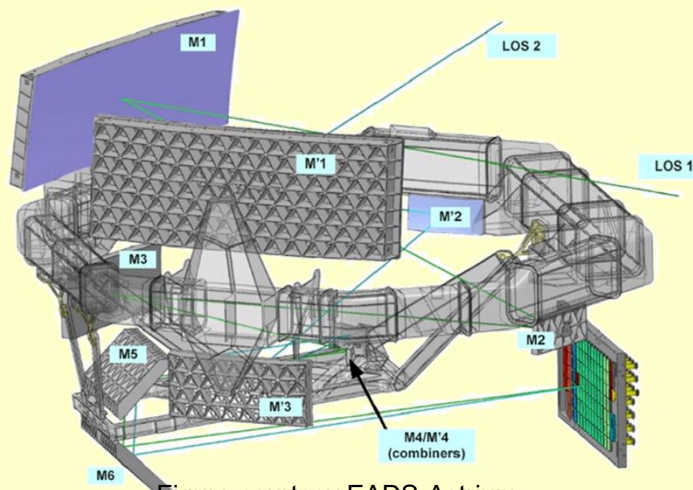


Figure courtesy EADS-Astrium

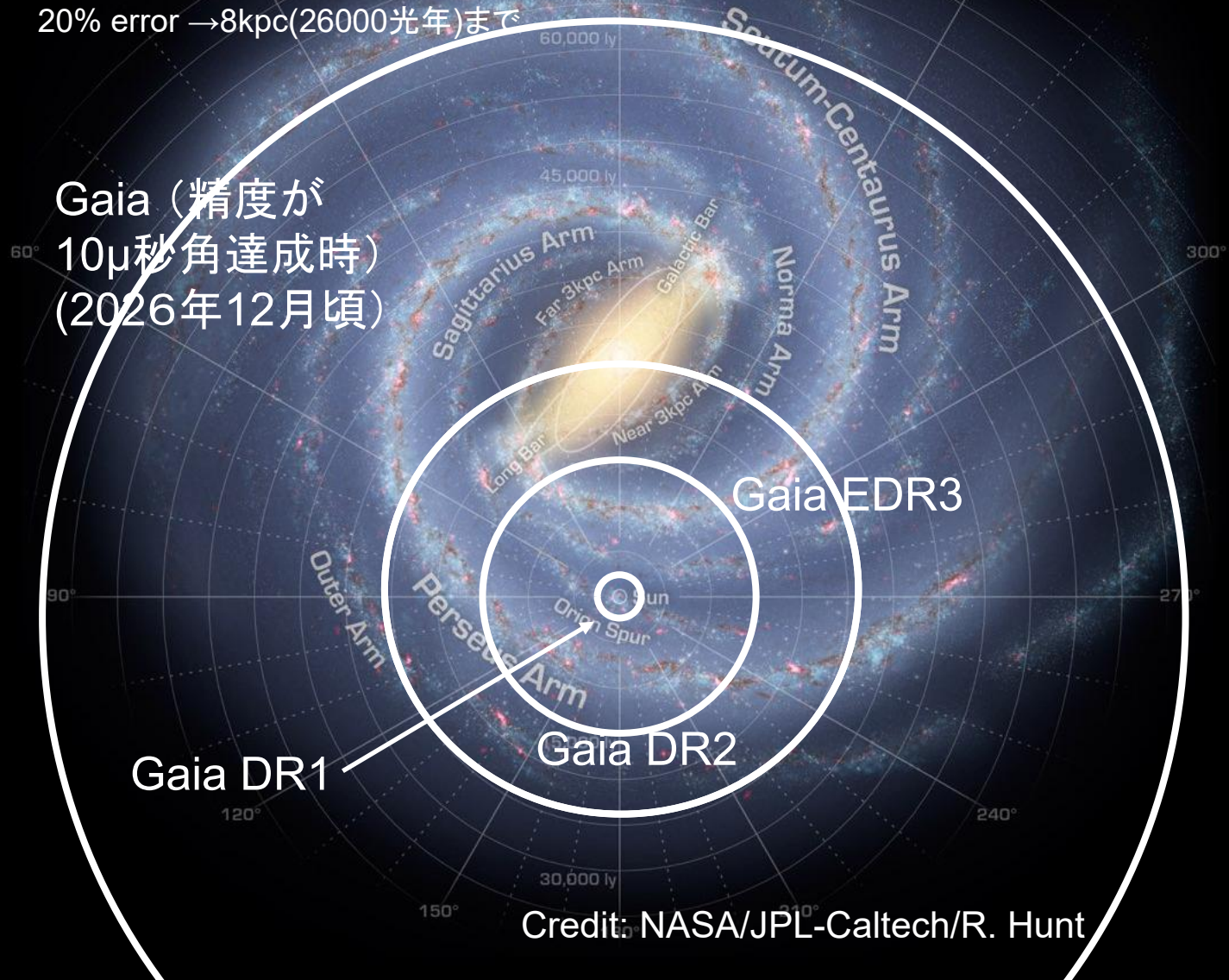
星までの距離の誤差 (3等級<G<15等級)

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)
(2026年12月頃)



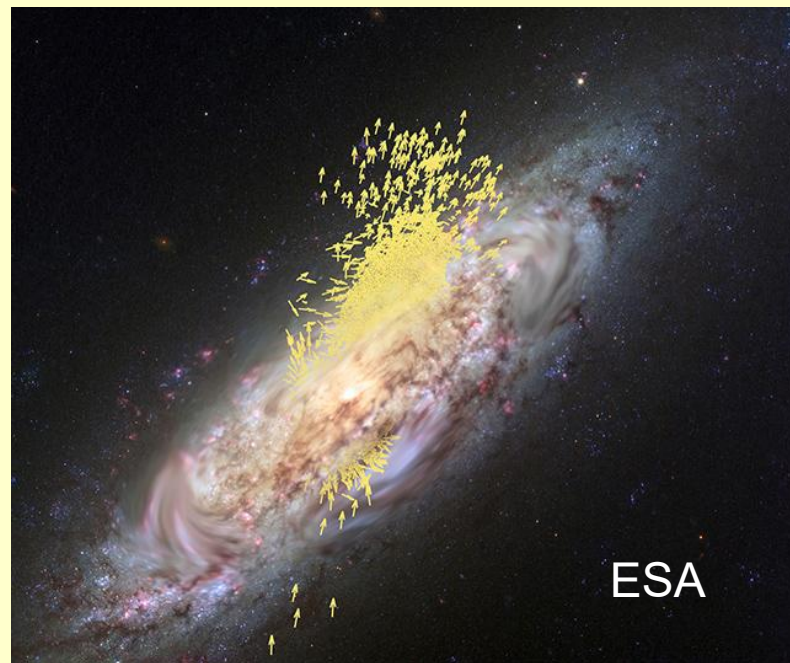
Credit: NASA/JPL-Caltech/R. Hunt

100億年程度前に天の川銀河に小銀河が衝突

「ガイア・エンケラドス」

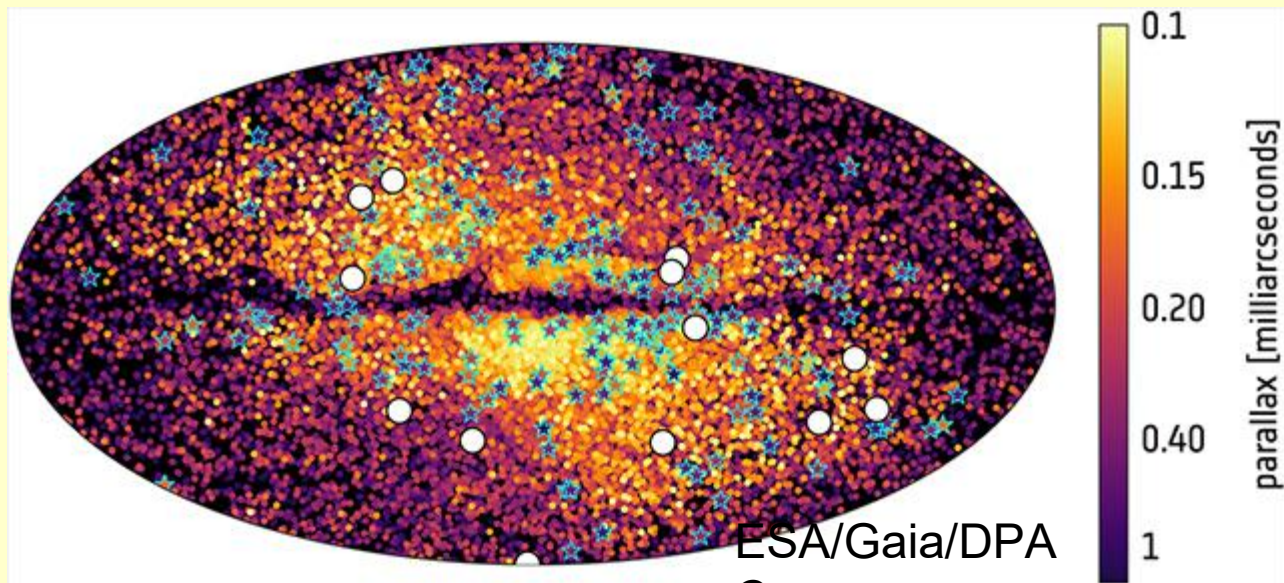
ガイア・エンケラドスの質量は小マゼラン雲より少し大きい程度

小銀河が衝突した後の小銀河の星々の位置や運動を示したイラスト



ガイア・エンケラドスに属していたと考えられる天体の全天分布図。

カラースケール:
紫は太陽に近く
黄色が遠い星。
白い円: 球状星団
星マークは変光星



* 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～



原因: 矮小銀河の残骸、バー(棒状)構造や渦状腕の影響など

* Gaiaの成果例

今までに15000本以上の論文

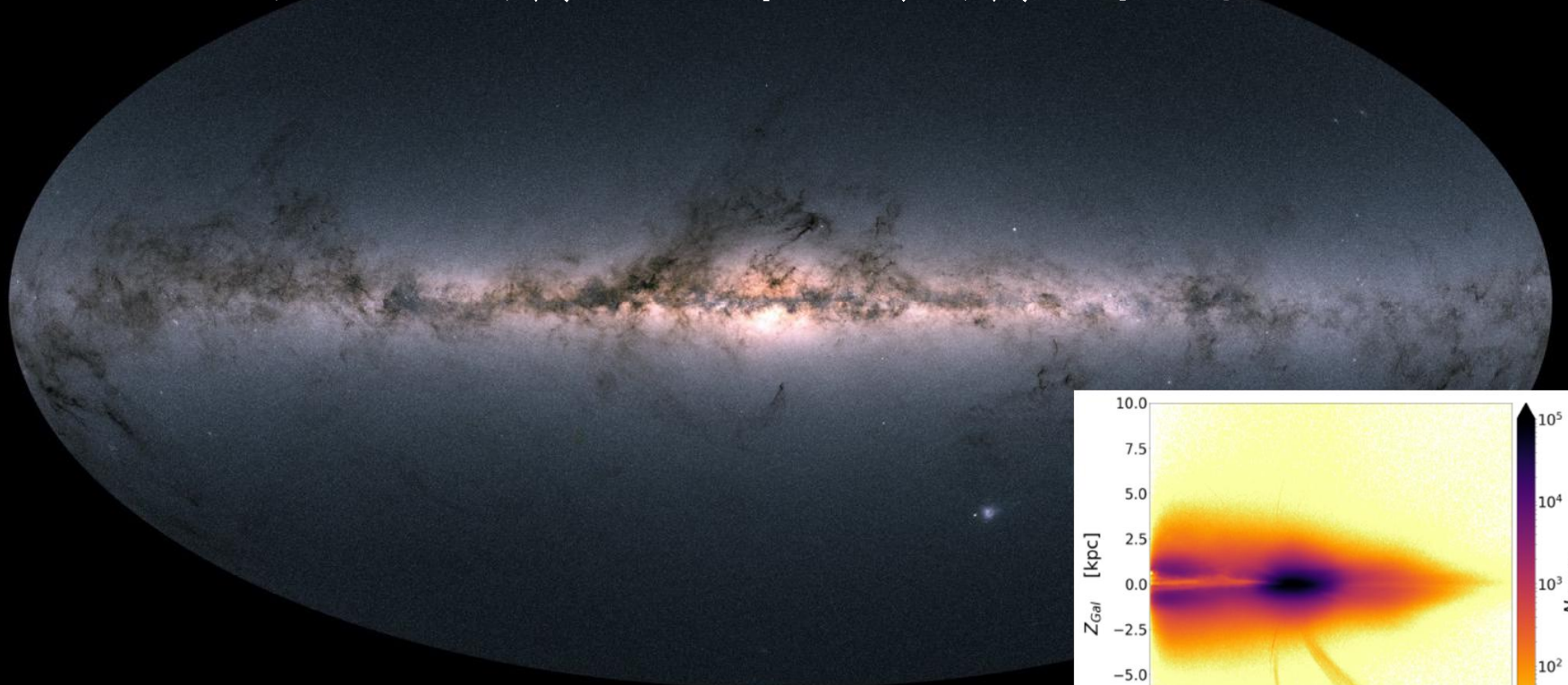
- 太陽系内天体、オウムアムアのふるさと？
- 星の色と明るさの関係→恒星進化論
- 系外惑星の質量導出
- 白色矮星のカatalog
- 高速度星の発見
- 隠された星団の発見
- 星の密度分布
- ダスト(塵)の3次元分布
- 天の川銀河の総質量測定
- アンドロメダと天の川銀河との相対速度
- 矮小銀河の衝突の痕跡
- 銀河間を飛来する星
- バー構造の実視
- 太陽系近傍の運動星団の精密測定～複雑な星の速度構造～
- 銀河面振動(さざ波)の発見
- 太陽系の加速運動を初めて検出(EDR3)
- その他、多数

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！

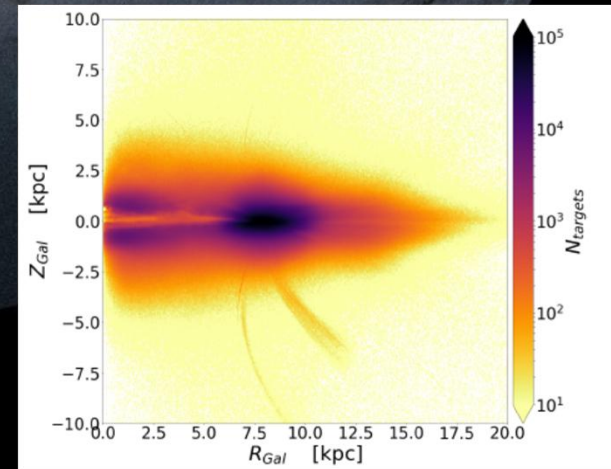
- ・精度の向上
- ・変光星の解析
- ・連星系、系外惑星、重力レンズ天体の解析
- ・その他、諸々

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

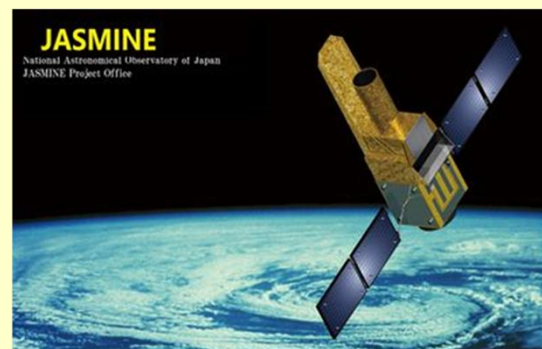


Gaia DR2 (2回目のデータ) : 2018年4月
Gaiaでみた天球の星





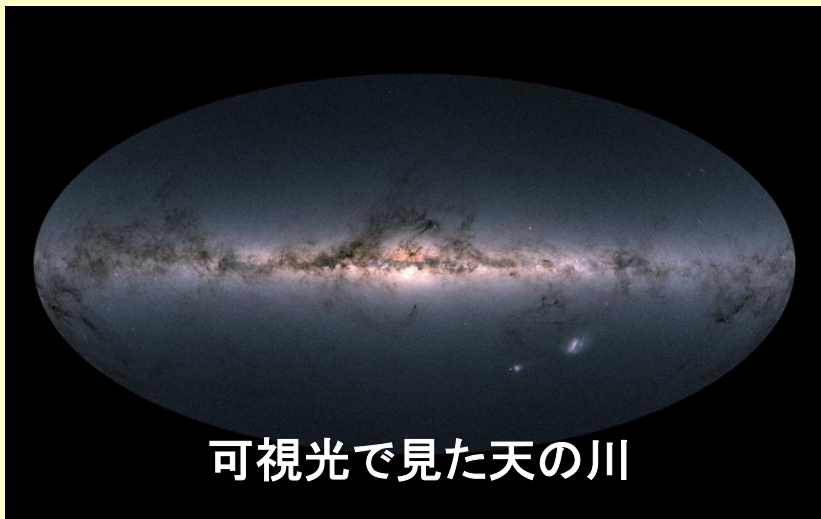
5. 赤外線位置天文 観測衛 JASMINE



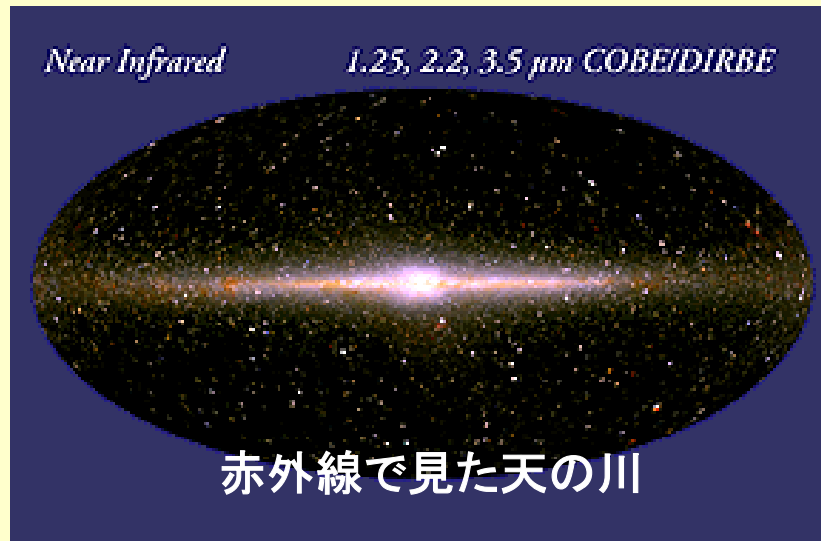
★JASMINEとは？

JASMINE

Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration
(波長(はちょう): 0.9ミクロン~1.6ミクロン)



可視光で見た天の川



赤外線で見た天の川

JASMINEの科学目的・目標

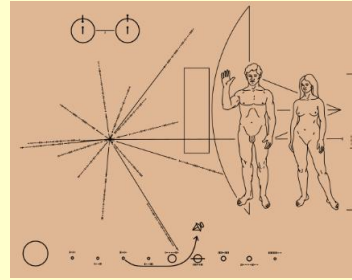
★究極の科学目的

* 人類がなぜ宇宙にいるのか？

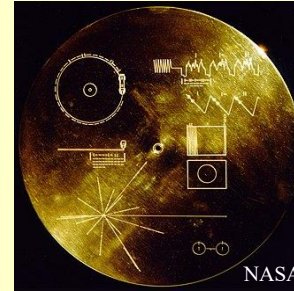
* 我々は宇宙で孤独なのか？



宇宙：銀河、星
→惑星→生命→人類



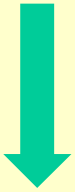
NASA



NASA



太陽系外の生命探査



Credit:NASA, ESA, CSA, and STScI



天の川銀河を“知る”！



Credit:NASA

天の川銀河内(特に太陽系近く)の
惑星探査



Credit:ESA/Gaia



恒星の明るさの変化測定から、
太陽系近くの中期M型星に対して、
生命居住可能領域にある地球型
惑星の有無を確認する



Credit:ESO

JASMINEの 星の距離と運動の測定により、
科学目標 天の川銀河形成の鍵を握る
中心核構造を解明する

JASMINEミッション

(以降、JASMINEと記す)

◎JAXA宇宙科学研究所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宇宙科学研究所により公募型小型3号機に選定された。



Credit: JAXA

イプシロンロケットでの打ち上げ(内之浦)

打上げ時期は、現在、内閣府宇宙戦略開発本部が令和7年12月に改訂された宇宙基本計画工程表では、2031年度末が目標と定められている。

JAXAを中心として、国立天文台、京大、東大をはじめ数多くの国内研究機関および国際協力のもとに開発を進めている。

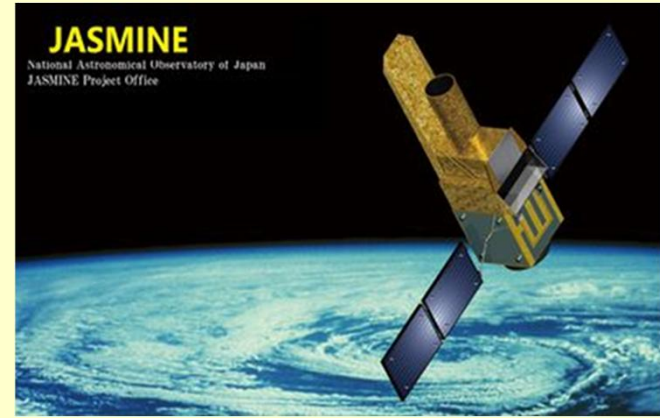
宇宙基本計画工程表(令和7年度改訂)より抜粋

内閣府宇宙戦略開発本部(首相が本部長)が決定

(3) 宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造

年度	令和5年度 (2023年度)	令和6年度 (2024年度)	令和7年度 (2025年度)	令和8年度 (2026年度)	令和9年度 (2027年度)	令和10年度 (2028年度)	令和11年度 (2029年度)	令和12年度 (2030年度)	令和13年度 (2031年度)	令和14年度 (2032年度)	令和15年度 以降
8 宇宙科学・探査①	JAXAの宇宙科学・探査ロードマップについて必要な見直しを行う[文部科学省]										
	【宇宙物理学】 大型の海外計画への、存在感を持った形での参画を目指す。JAXAや宇宙物理学分野の研究者のコミュニティが一体となった協体制の構築、国際動向の情報収集、長期戦略の立案による、技術開発を推進。国際的な大型計画とも相補的かつ独創的・先鋭的な技術を活用し、科学的にユニークな中・小型のミッションの創出を目指す[文部科学省]										
	X線分光撮像衛星(XRISM)の開発 運用 打上げ										
	マイクロ波背景放射偏光観測宇宙望遠鏡(LiteBIRD)の開発 打上げ										
	主として公募により実施する小型計画に基づく衛星・探査機(2年に1回) 赤外線位置天文観測衛星(JASMINE)の開発 運用 打上げ										
	戦略的海外共同計画										
	Nancy Grace Roman宇宙望遠鏡への参画 運用 打上げ										
	系外惑星大気赤外線分光サーベイ衛星計画(Ariel)への参画 運用 打上げ										

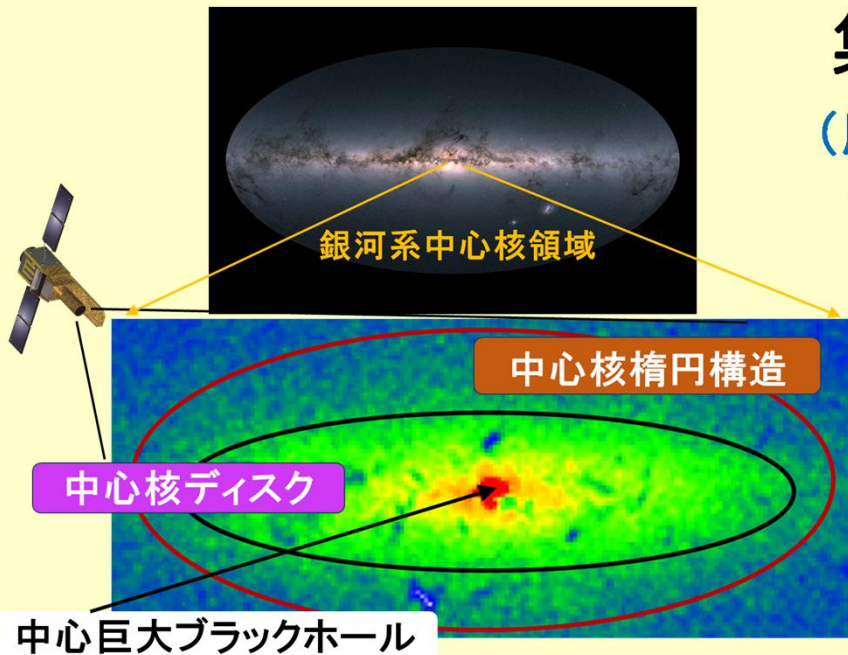
JASMINE衛星！



0.000025秒角 (=1億4千万分の1度角
=0.00000000069度角)クラスの精度！！

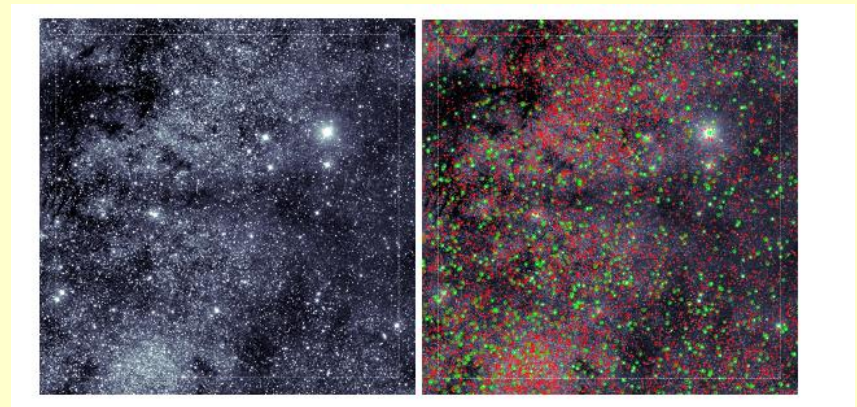
* 100km離れた場所にいる人の髪の毛1本の太さの
5分の1程度の大きさを見込む角度に相当

赤外線による観測

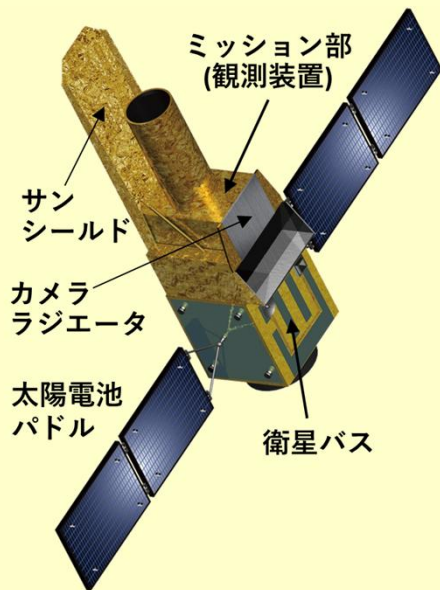


天の川銀河の中心部
(中心核領域)を
集中的に観測

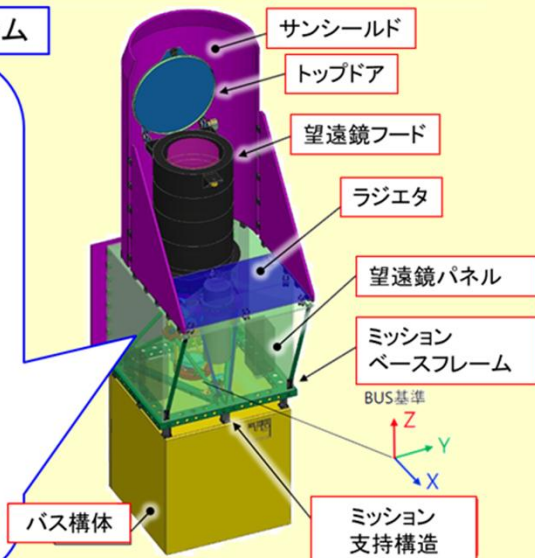
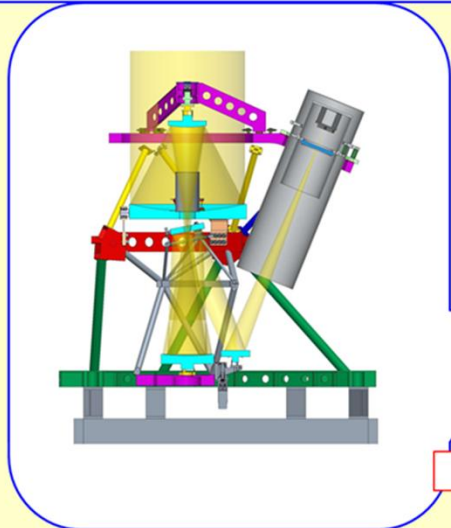
(塵(ちり)に覆(おお)われて可視光では
観測しにくいところ)



JASMINEはどんな観測装置なのか？



望遠鏡魔パネル内の望遠鏡システム



(現時点での案: MELCO提供)

望遠鏡の鏡の直径(もっとも大きいもの)主口径: 36cm程度

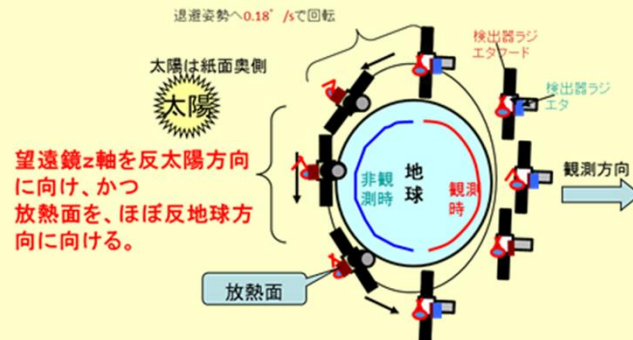


赤外線カメラ: 地上での天文観測用に開発された高性能な国産カメラを宇宙でも使えるように開発中

たいよう どうききどう 昼と夜のさかいめ

軌道: 太陽同期軌道 (高さ約570km)

観測期間: 3年間程度



★JASMINEの誕生と歩み



A. 日本での位置天文観測（近世～20世紀末）

子午儀と子午環の例：国立天文台（旧東京天文台）@三鷹キャンパス 関連

写真のクレジットはNAOJ

JASMINEの“ご先祖様”

○レプソルド子午儀

- ・1880年ドイツ製。海軍観象台→東京帝国大学東京天文台（今の国立天文台）。
- ・重要文化財。
- ・1949年に日本で初めての本格的観測星表「三鷹黄道帯星表」を出版（国際的に評価された我が国初の本格星表）



@国土地理院

○ゴーチェ子午環

- ・1903年フランス製。
- ・終戦後、太陽系天体の位置観測データの提供で国際的に高く評価。1961年以降、国際天文学連合第8委員会（位置天文学）からの要望もあり、南天標準星国際共同観測に参加。
- その成果は、米国海軍天文台によりSRS星表として集約され、活用。また、国際協力で1980年代に基本星表F5星表として集約。



○自動光電子午環

- ・1982年完成。ドイツ製。眼視観測→光電化
- ・約35000星に対し有効観測回数20万回の観測。観測星表は“Ten Years of the Tokyo PMC”として出版



B なぜ日本でも位置天文観測衛星をやろうと思ったか？

★ヒッパルコス衛星による“革命” 1989年～1993年:運用 1997年:ヒッパルコスカタログ公開

○精度(1ミリ秒角レベル)、個数(12万個)とも従来の地上観測と比較して、1桁以上の向上！！→位置天文学の“革命”

○“単なる星表作り”からの脱却→天体物理学へ

* 20世紀になり天体物理学が勃興(素粒子・原子核論、相対論、X線・赤外線・電波観測等の活躍)→位置天文学は、あっても特別な意味は持たないが、なければ危険と揶揄されていた。

* ヒッパルコス衛星による精度向上により、天体物理学につながってきた。

しかし、
まだ小さな革命

★ヒッパルコス後の海外での位置天文観測 衛星計画

より大きな革命へ！

年周視差精度
1ミリ秒角
→距離の精度が
20%以内なのは
200pc(600光年)
程度

ドイツ: DIVA。可視光、3500万個、精度0.2ミリ秒角

米国海軍天文台: FAME。可視光、4000万個、50マイクロ秒角。

その後、AMEX→JMAPS

NASA: SIM 可視光干渉計、1万個、4マイクロ秒角(少数精鋭)

ESA: **Gaia** 可視光、全天サーベイ、15億個以上、最高精度は10マイクロ秒角クラス

日本は？

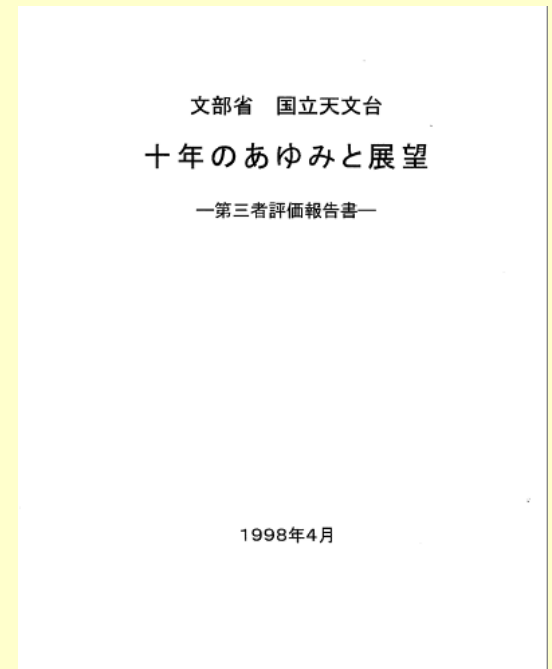
B なぜ日本でも位置天文観測衛星をやろうと思ったか？

★国立天文台第3者評価と人事公募

1997年度に行われた国立天文台第三者評価委員会からの国立天文台への検討推進勧告：

「ヒッパルコスの結果を踏まえて位置天文学の将来を見据えたとき、スペースアストロメトリ(位置天文観測衛星)計画の実現の可能性を真剣に検討すべきであろう。」

→国立天文台では宇宙軌道上からの位置天文観測を推進する教授を公募し、郷田が1999年4月に着任した。



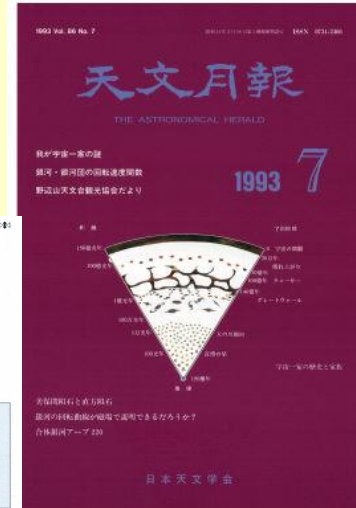
専門分野

大学、大学院、大学教員時代@京大、阪大)
もともとは理論的研究 (“理論屋さん”)

○宇宙論：宇宙背景放射の温度ゆらぎと宇宙の大構造形成

* NASAの宇宙背景放射探査衛星
COBEが世界で初めてCMBの
温度ゆらぎを検出(1992年)

○階層構造の形成:重力不安定説
宇宙初期の物質のわずかな密度ゆらぎ
=>自己の重力で密度が高まる
=>銀河やその中で星が生まれる
=>銀河が集団化
=>銀河団や超銀河団ができてくる。



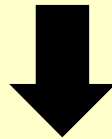
天文月報1993年7月号より

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 396: L1-L5, 1992 September 1
© 1992. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

ApJ396 L1 2006年ノーベル物理学賞

STRUCTURE IN THE COBE¹ DIFFERENTIAL MICROWAVE RADIOMETER FIRST-YEAR MAPS

G. F. SMOOT,² C. L. BENNETT,³ A. KOGUT,⁴ E. L. WRIGHT,⁵ J. AYMON,² N. W. BOGESS,³ E. S. CHENG,³
G. DE AMICI,³ S. GULKIS,⁶ M. G. HAUSER,³ G. HINSHAW,⁴ P. D. JACKSON,⁷ M. JANSSEN,⁶
E. KAITA,⁷ T. KELSALL,³ P. KEGSTRA,⁷ C. LINeweaver,² K. LOEWENSTEIN,⁷ P. LUBIN,⁸
J. MATHER,³ S. S. MEYER,⁹ S. H. MOSELEY,³ T. MURDOCK,¹⁰ L. ROKKE,⁷
R. F. SILVERBERG,³ L. TENORIO,² R. WEISS,⁹ AND D. T. WILKINSON¹¹
Received 1992 April 21; accepted 1992 June 12



SKYLIGHT

我が宇宙一家の謎—混迷する宇宙論—

郷田直輝

(大阪大学理学部 〒560 大阪府豊中市待兼山町1-1)

杉山直

(Dep. of Astronomy, Univ. of California, Berkeley, CA 94720, U.S.A.)

我々が住んでいるこの宇宙という広大な家。この家の“形”や起源はどうなっているのだろうか。また、この家に住む家族にはどんな人がどれくらいいて、その人達はどの様に成長してきたのだろうか。こういった“宇宙一家”の数々の謎を解いていこうとするのが宇宙論である。この宇宙論に関する最近の話題や現状について説明する。特に、銀河や銀河団・超銀河団などの宇宙の大規模構造の形成問題の混沌としてきた現状について解説する。

様々な構造形成モデルの是非を解析

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 395: L59-L63, 1992 August 20
© 1992. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

ApJ395 L59 Gouda & Sugiyama (1992)

SURVIVING COSMOLOGICAL MODELS AFTER THE DISCOVERY OF LARGE-ANGLE ANISOTROPIES OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND

NAOTERU GOUDA

Department of Physics, Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto 606, Japan

AND

NAOSHI SUGIYAMA

Department of Physics, Faculty of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113, Japan

Received 1992 May 4; accepted 1992 June 10

○銀河の形成と進化

○自己重力多体系（銀河や星団など）の非線形現象

（力学構造、緩和、カオスの遍歴現象など）の解析

国立天文台に異動後（1999年～）：

赤外線位置天文観測衛星（ジャスミン）計画の推進

B なぜ日本でも位置天文観測衛星をやろうと思ったか？

○何故、応募したか？

* 宇宙論から:

遠方の銀河までの距離→一番土台になっている年周視差観測による、
銀河系内の星までの距離がまだよく分かっていない！！
→その重要性和必要性に気づく。

* 自己重力多体系から:

銀河内の星の軌道は？どういう力学構造なのか？

太陽系より大きなサイズの自己重力多体系に関しては知られていない

* 日本が独自に観測データをもつことの重要性←宇宙背景放射の温度ゆらぎ研究での経験

* プロジェクトへのあこがれ(?!)

* 個人の研究背景としてはつながっているが。。。

* ヒッパルコス成果と今後の計画への期待により、
天体物理をやっていた人間が参入できる土壌が
出来つつあり、推進される雰囲気が増えてきた。

C. JASMINE誕生

★どう進めたか？ ～ゼロからのスタート～

○プロジェクトはどうやって始めるの??

○赤外線位置天文観測の検討開始

* 宇宙科学研究所(赤外線天文グループ)を訪問

→海外では計画されていない赤外線で!

* 最初は、4名で勉強会を立ち上げ。

位置天文観測って、どう観測するの?というレベルから。。

* FAME, Gaiaを見本

とにかく国際会議へ。海外の専門家とつながりを!

➡世界は、見ず知らずの日本グループを暖かく迎えてくれた

今から考えると、日本の近代化と共に西欧の天文学に

伍して位置天文観測の国際協同観測に参加してきた

先達の実績、信頼がベースにあったお陰ではないかと思う。

C. JASMINE誕生

○国内の天文学研究者コミュニティへのアピール

* Gaia等によって今後はすごい観測データが出る！

→天文学、宇宙物理学の広範囲の分野で関連

着任後、今さら位置天文をやるのですかと、よく聞かれた。



実際、現在、Gaiaによりすごい成果がどんどん創出中

* 日本は、Gaiaができないであろう、天の川銀河の中心、
天の川面を赤外線で見ると世界最前線となる！

最初の頃は、GaiaがあるのにJASMINEは必要なんですか？と、
よく聞かれた。



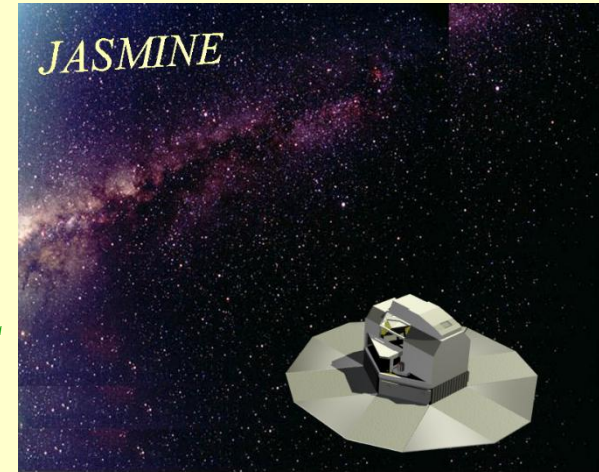
実際、JASMINEが観測する中心核領域の星に対して、
JASMINEの目標精度をGaiaで達成できている星はほとんど無い

D. (大型) JASMINEのスタート

○(大型)JASMINE計画の構想

Gaiaの最高精度を赤外線で実現！
銀河面(天の川面)を全面サーベイ！
観測手法は、Gaiaを真似る

現在のJASMINE
とは方式が全く
異なる



➡ 主鏡口径2m

当初は、いけいけどんどん?!。。。。

* 2003年4月: 当時のNASDA技術研究本部にサポート依頼。
JAXA統合の少し前。今後は、NASDA@筑波と
宇宙科学研究所@相模原と共同で宇宙科学衛星開発を!



その後、数年続く毎月の会合により、衛星開発関係で
いろいろな勉強をさせていただけた。

E. Nano-JASMINE計画のスタート

2002年度の国立天文台執行部からのアドバイス：
大きな衛星をやる前に小さいもので宇宙空間で実証を行う方が良いのでは？



2003年4月に超小型衛星開発を進めていた東大工学部中須賀研究室を訪問。
大型JASMINEの技術実証になるとともに、科学的成果も最先端を目指すことに。



* 宇宙ステーション内での実験にも応募
→ 宇宙飛行士が動くと揺れるので、高精度な星像中心推定はできないと。

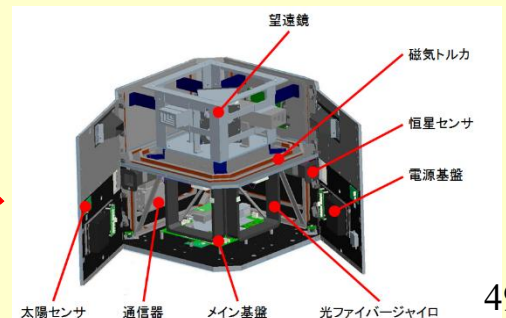
検討開始後、1年程度はお互いの“言葉”を理解するのに一苦労。

* Nano-JASMINEの概要

衛星外形	50×50×50cm	
質量	約35kg	
主鏡口径	5cm	ヒッパルコスと同程度の
観測精度	～3ミリ秒角	精度を！
観測波長	zw-band (波長域：0.6～1.0μm(ミクロン))	
観測等級	zwで9等級より明るい星	

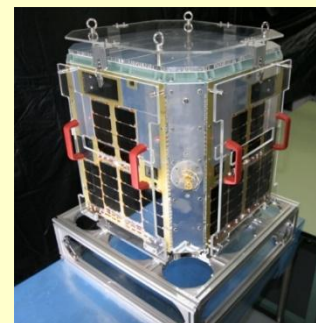


Gaiaでは困難な明るい星(特に3等星以下)に対して、NJは、ヒッパルコスカタログとの組み合わせにより、固有運動の精度向上、長周期連星系の解析が可能。



F. Nano-JASMINEのその後

- ミッション観測装置開発、データ解析システム開発、サイエンス検討など→NAOJが中心(+京大等)
- バス部、地上通信、打上げ・運用準備→中須賀研
- 学生、研究員が開発の中心(のべ40名程度)



↓

* 打ち上げ実機(FM)が、2010年10月にほぼ完成

↓

* ウクライナ政府とブラジル政府がほぼ半分ずつ出資したロケット打ち上げ会社(ACS社)により打ち上げが2011年8月に予定されていた。



↓

* ブラジルの射場建設が予算不足で進まず、何度か打ち上げ延期

↓

* ようやく射場の目処がつき、2014年12月～2015年12月の間で打ち上げ予定

↓

* 2014年4月にウクライナでNJ試験機による搭載試験が予定された。

F. Nano-JASMINEのその後

* 2014年2月にクリミア半島@ウクライナにロシアが侵攻。紛争状態になった。



* ウクライナでの試験は中止。今後の見通しがたたず。



* 2015年末までに打ち上げできず、契約解消。ACS社は事実上、倒産



* Gaiaメンバーの強力なサポートで、ESAによる無償打ち上げ
(相乗り(ピギーバック))の交渉が宇宙研の協力も得て進んだ。

現在のJASMINE
とは方式が全く
異なる

NJは、Nano-Gaiaでもある。

Gaiaチームより、Gaiaのデータ解析

システムの事前実証のため、NJの生データの利用要望(2007年)

→その後、Gaiaチームの強力な協力によるNJのデータ解析システム構築



* ESA側の事情(親の親衛星の変更)により中止となった



* Gaiaメンバーの紹介で、新たに設立した海外の小型ロケット会社による安価な打ち上げで交渉、調整。

→なかなかロケットは打ち上がらず、また安価では無理になった。

* FMの劣化、故障→2022年度にミッション終了

F. Nano-JASMINEのその後

* 打上げは残念ながらできなかったが、検討、開発で多くの業績、成果を理学側、工学側であげることができた。理学側は衛星開発の未経験者ばかりだったが、工学側と一緒に開発に加わり、大変良い経験ができた。

* 卒業論文、修士論文等で多数の若手教育にも貢献できた。

* Gaiaのデータ解析チームとの密な関係の構築。



(小型)JASMINEへの強いサポート、実際、データ解析システム開発への参加につながった。

海外では、当初は、NJも(大型)JASMINEも懐疑的。

ただ、出来る限りチームで国際会議に頻繁に出席し、

“やっているぞ”とアピール。段々とサポートしてもらえる雰囲気。

★ Nano-JASMINEの余生：アウトリーチで活躍！

* 打ち上げ実機 (FM)

→ 奥州宇宙遊学館にて展示

* 試験機 (EM)

→ 岐阜かがみはら航空宇宙博物館にて展示



NJ企画展@奥州宇宙遊学館
(2023年7月)

G. 大型→中型→小型へ

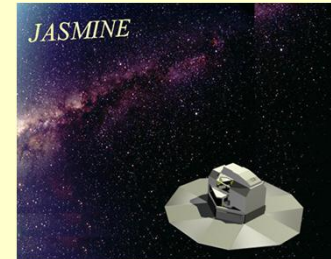
大型JASMINEのワーキンググループ(WG): 2003年10月発足@宇宙研

* 主鏡口径 ~2m

* 天の川全面

* 工学の先生方@宇宙研への説明会

* NASDA技研本部→JAXA SE推進室、
総技研本部、宇宙研工学のサポート



予算、技術、スケジュールも検討

→なるべく小型化をするのが望ましい。

2004年度～: 小型化したバージョンの検討を開始

JAXA/SE推進室、総技研本部の方達のご協力を得て、2007年5月から集中検討開始。

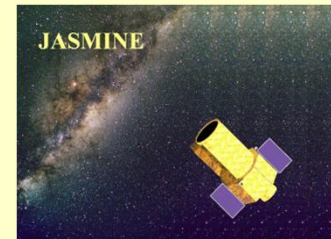
中型JASMINEのWG: 2008年3月発足@宇宙研

* 主鏡口径 80cm

* バルジ領域のみ

* 国際天文学連合(IAU)位置天文組織委員会
から中型JASMINE計画推進のお墨付き獲得

* Van Leeuwen氏(@ケンブリッジ大)による、
中型JASMINEのレビュー(2008.3)→良い評価



* 小型版の検討開始 (by 有識者の方達からのご意見、アドバイス)

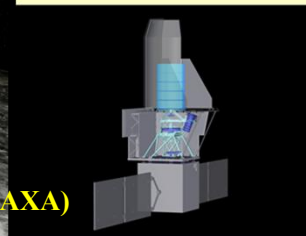
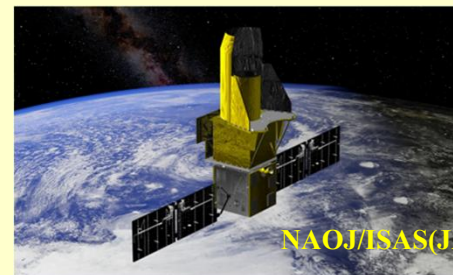
* JAXA SE推進室、総技研本部、宇宙研工学のサポート

* 目標、仕様、システムへの要求事項の大枠が決定

(小型)JASMINEのWG: 2009年1月発足@宇宙研

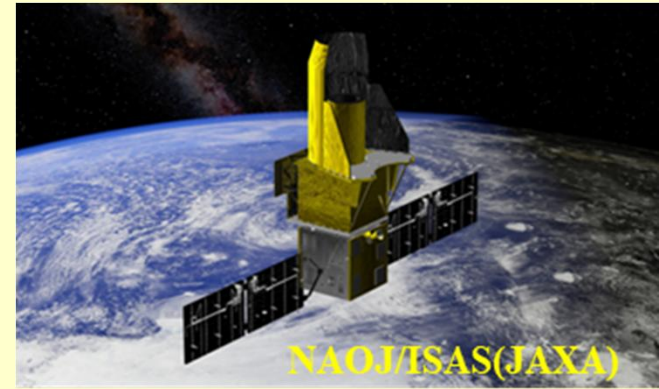
* 主鏡口径 30cm→40cm→36cm

* 中心核領域のみ



H. 小型JASMINE→JASMINEに改名

- ・公募型小型計画1号機へのミッション提案(2014.2)
 - 審査(2014.4)
 - 再審査(2014.6): 不採択(SLIMが選ばれる)



- ・公募型小型計画2号機・3号機へのミッション提案(2016.1)
 - 審査(2016.2-3)
 - データ解析に特化した審査会 (2017.3)
 - 国際審査(2017.12)
 - 計画審査(旧MDR)(2018.7~2018.8)
 - 概念検討の成熟度(CML4)確認会
 - ダウンセレクション審査(2019.5): **公募型小型3号機に採択！！**
 - 赤外線カメラは国産に方針変更: 宇宙用化開発
 - ミッション定義審査(MDR)通過(2024.8)
 - 現在に至る
- 今後 ΔMDR→システム定義審査(SDR)
 - 基本設計審査(PDR)→ 詳細設計審査(CDR)
 - 打ち上げ(~2032年)→ 運用・データ解析(2032年~2035年)
 - データ解析: 途中段階のデータ公開(複数回)(2032年~2040年)
 - 最終カタログ公開(~2040年)

◎JASMINEへの期待

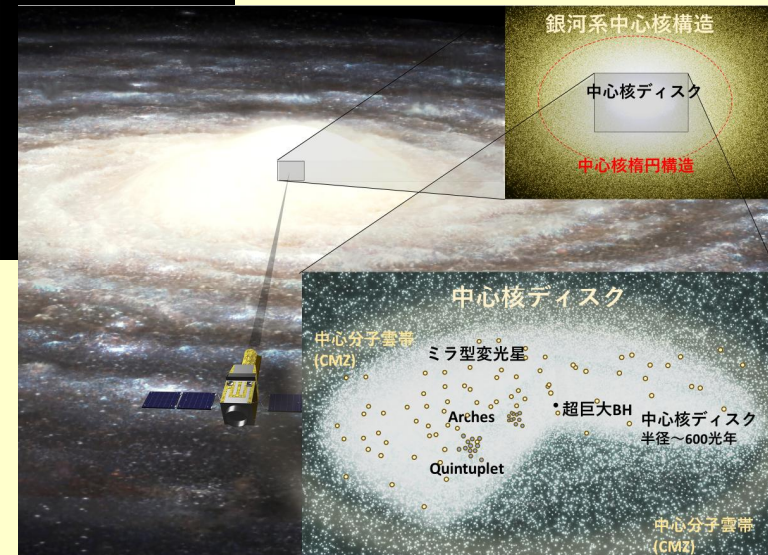
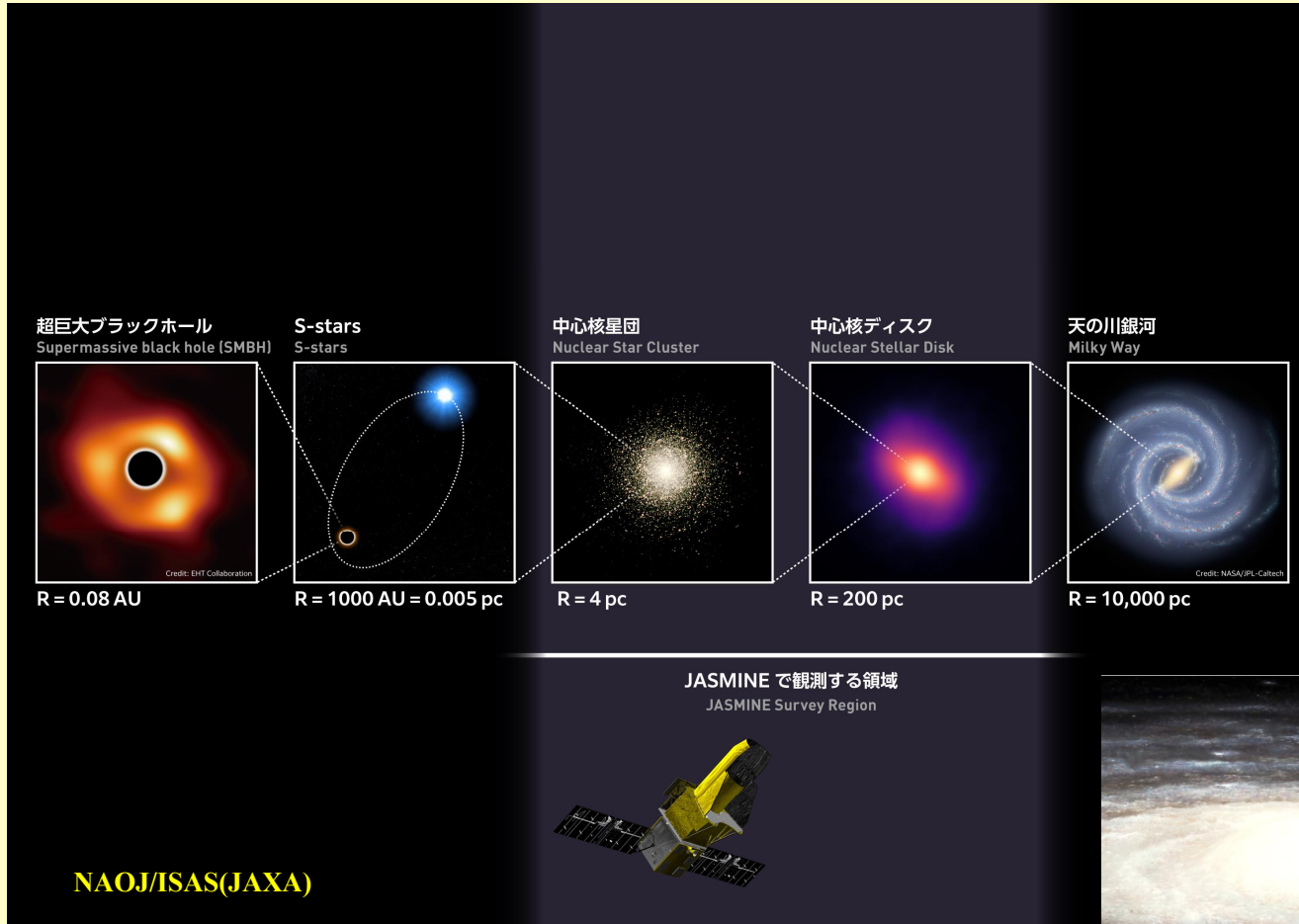


★JASMINEで解き明かす様々な謎

天の川銀河の中心核領域の星の距離と運動を観測



天の川銀河の中心核領域



何が分かるの？

★中心核ディスクの年齢

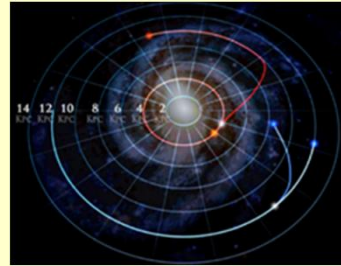


バー構造の形成時期



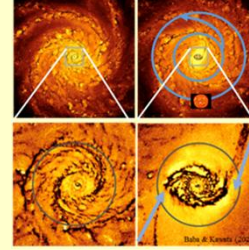
太陽系の移動解明

内部から外側に
移動を開始 (!?)



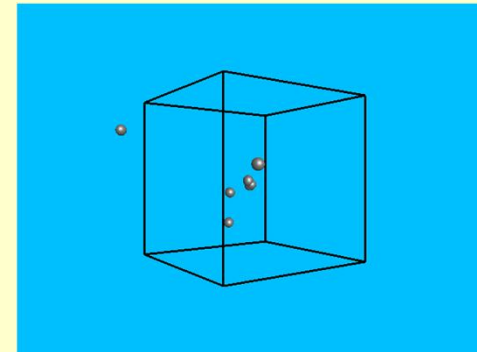
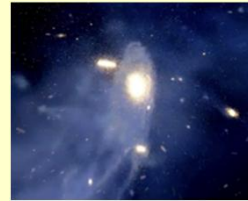
惑星形成
に影響!?

気候変動?
生命進化?
人類誕生?



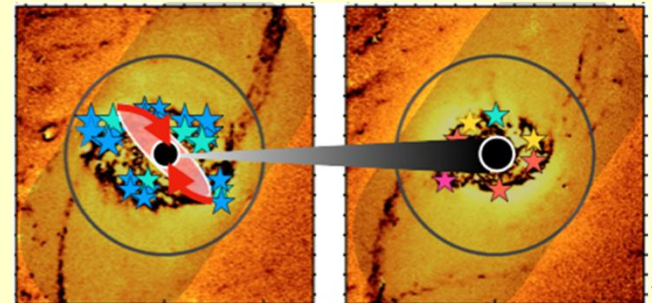
★100億年以上前の天の川銀河誕生時の様子(ようす)

当時に形成された星々の
運動の様子がそのまま残っているかも?



★むかしにいくつかの巨大ブラックホールが 中心領域へ落ち込んできた 名残(なごり)の発見(?)

★中心にある超巨大ブラックホール の重さが増えてきた理由が 分かるかも



○中心にある**ブラックホール**の探査(たんさ)

○中心での**ダークマター**の探査(たんさ)

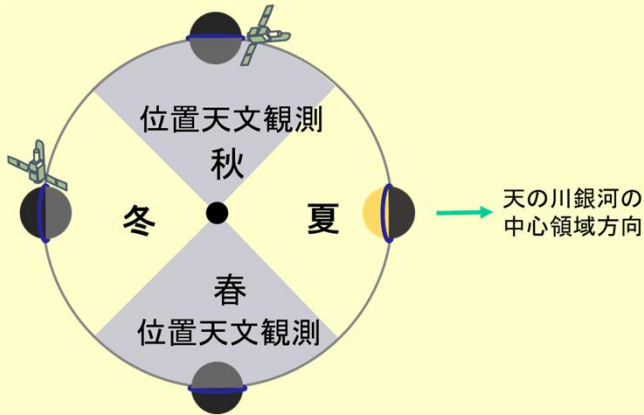
○中心での**星団(せいだん)**の探査(たんさ)

○ワームホール(**時空(じくう)**)の**虫食い穴**
(**むしくいあな**)探査(?!)
などなど。。。

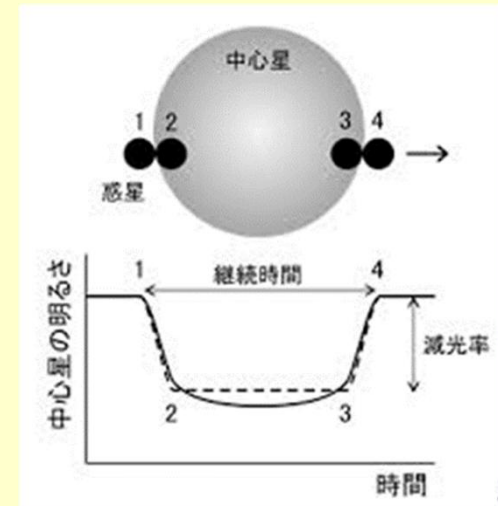
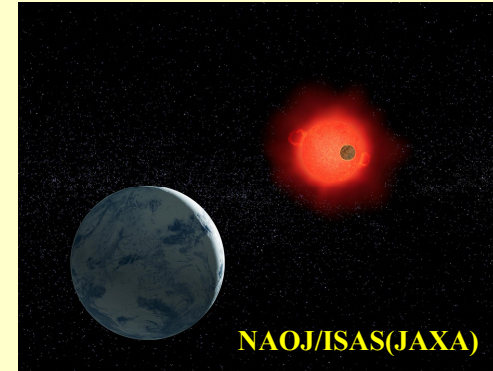
★JASMINEによって、生命が住んでいる可能性のある地球に似た惑星が見つかるかも！

春、秋：位置天文観測（天の川中心）

夏、冬：惑星探査（ターゲット星）



太陽より
1/5程度小さく、
温度が低くて赤い星
(中期M型星)が、他の
観測よりも優位な
ターゲット



Credit:天文普及研究会



惑星が星の前をとおると、
星の明るさが、ほんのすこし
暗くなる
→惑星を発見できる！！

6. おわりに

○JASMINEは、立ち上げから現在に至るまで紆余曲折。

遠回りもあったかもしれないが、経験してきたことは大きい。

○“おもしろい”と言い続けることも大切。国内外で段々とサポート増

○様々な分野のいろいろな方達との出会い、交流が現在にも大いに活かされていると感じる。

例

*JAXAやメーカ退職後、NAOJでの支援員に。

*Gaiaチームをはじめ、海外からの強力なサポート

Gaia-JASMINE Joint meeting(2016年12月)
の懇親会(屋形船内)での集合写真



○JASMINEの実現、成功は将来の位置天文での国際協力(ヨーロッパのGaiaNIRなど)での我が国のステータスの向上につながる

*戦前からの子午儀、子午環での国際協同観測による実績がJASMINEにもバックからのサポートになっていたかも。

いずれにせよ、個人的には、“二度の研究人生”を送らせてもらった感じで、楽しませてもらいました。

推歩

* 推歩とは、天体の動きを測ること

* 国立天文台ニュースNo.92
2001年3月号より抜粋

エッセー

推 歩

位置天文・天体力学研究室 教授 郷田 直輝



私は歴史が好きで、NHK 総合で放送している「その時歴史が動いた」を時々みている。先日(2000年11月1日)、伊能忠敬の話があった。ご存じのように、はじめて実測によって日本地図を作った人である。その事実は、学校でも習い、もちろん知ってはいた。しかし、忠敬の生い立ちとか、どんな人物であるのか、さらに、実際どのように地図を作ったのかなど、詳細は全く知らなかったのだが、このテレビ番組である程度知ることができた。興味をもったので早速、忠敬の生涯を綴った本を探して読んでみることにした(2000年11月に原稿を書いている私にとっては未来だが、読者の方は、2001年正月にNHKで放送がある「四千万歩の男 伊能忠敬」というドラマをご覧になり、忠敬について詳しい方もおられるかもしれない)。

伊能忠敬は、少年時代から天文学と数学に大変興味をもっていたようだ。しかし、婿養子先の伊能家の家業である造酒業、醤油の醸造、水運業などを継がねばならなかった。忠敬は、隠居するまで、この第一の人生を精一杯尽くした。そして、隠居後、第二の人生を歩むことになる。夢にまでみた天文学をやるために江戸幕府天文方の高橋至時(よしとき)に弟子入りをするのである。時に、忠敬51歳、至時32歳である。当時、幕府天文方暦局は、浅草にあったようである。忠敬は、至時のもとで、天文学を熱心に学ぶとともに、深川の自宅に天文台を作り、自らも観測に動んでいた。毎晩、熱心に星の位置を測っていたようだ。この頃、忠敬には「推歩先生」というあだ名が付けられていた。推歩(すいほ)とは、天体の動きを測ることである。はじめは、年寄りの道楽と考えていた至時も、次第に忠敬の熱心さと有能さに感心するようになる。歳の離れた二人ではあったが、やがて、深い絆で結ばれるようになった。

当時、忠敬は日本人にとっては謎であった、地球の大きさを計測したいと考えていた。最初は、自宅のある深川と天文方のある浅草との距

離と北極星の見かけの高度差を用いて算定しようとした。しかし、高橋至時に一笑に付された。そんな短い距離では、誤差が大きくなりすぎるといふわけである。では、江戸と蝦夷の間を測ってみれば、可能かもしれないと考えるに至った。これが、伊能忠敬が実測を行い、日本地図を描くことになるきっかけとなった。その後、どのようにして実測を行ったのか、また、地図が完成するまでに如何なる試練が待ち受けていたかなどは、紙面の都合上、別の書物に読むこととしたい。ただ、地球の大きさに関しては、現代の値とさほど変わらぬ高精度で値を求めることができたという事実だけは付記しておく。

このように忠敬は、51歳で第一の人生を終わらせた後、少年の時の夢を追い求めた。そのたゆまない好奇心、子供のような心、探求心は、恐れ入るものがある。この原動力により、後年(最終的には、忠敬没後、後継者の手によって完成するのだが)、世界にも誇れる日本地図の完成をみることになるのである。実際、幕末に訪れたイギリス艦隊は、この地図をみせられ、あまりの正確さに驚嘆したという。これによって、西洋人は、あなどっていた日本人に対する考えを改めたともいわれている。この地図は、その後様々な用途に用いられ、明治時代における日本地図のほとんどはこの忠敬の地図が基になっていたようである。



伊能忠敬 「推歩先生」

* 第一の人生

=> 家業: 造酒業、醤油の醸造、
水運業など

* 51歳で隠居後、第2の人生:

江戸幕府天文方。

地球の大きさを計測するた

めに、江戸と蝦夷の距離測定。

→ 日本地図を描くことになった

きっかけ

→ 独自の日本地図は世界に

驚きをもたらした。

私も不惑の歳となったが、伊能忠敬が隠居した歳に比べれば若い。忠敬にあやかるとは恐れがたいが、忠敬の好奇心、探求心をせめても見習いたいものである。スペースアストロメトリの計画は欧米諸国に比べて、日本は立ち遅れてはいるが、忠敬が独自に日本地図を手がけ、世界に驚きをもたらしたように、日本も何とか追いつければと願う。いずれにせよ、銀河系全体の“地図”作りのため、世界で「推歩」がまさに始まろうとしている。



JASMINEへの応援を今後もよろしくお願いします！！

ありがとうございました

Jasmine

