

駿台天文講座 2011. 8.20

# ジャスミン計画と天の川銀河 ～超小型衛星から始める天の川の謎解き～ 郷田直輝 (JASMINE検討室)



Nano-JASMINE Project

Nano-size Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration  
©ISSL, University of Tokyo 2008 

# ジャスミン(JASMINE) : 赤外線位置天文観測衛星

Japan Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration

## 目次

1. 位置天文学とは？ ～その重要性～
  - (1) 宇宙の距離測定
  - (2) 見えないものを見る！
2. 位置天文観測の歴史と現状
3. ナノ・ジャスミン(Nano-JASMINE)衛星について
4. ジャスミン(JASMINE)計画シリーズによる  
天の川銀河の謎解き

# 1. 位置天文学とは? ~その重要性~

位置天文学：星の天球面上の位置とその時間変化を測定する天文学



星の位置の時間変化

**目的：**

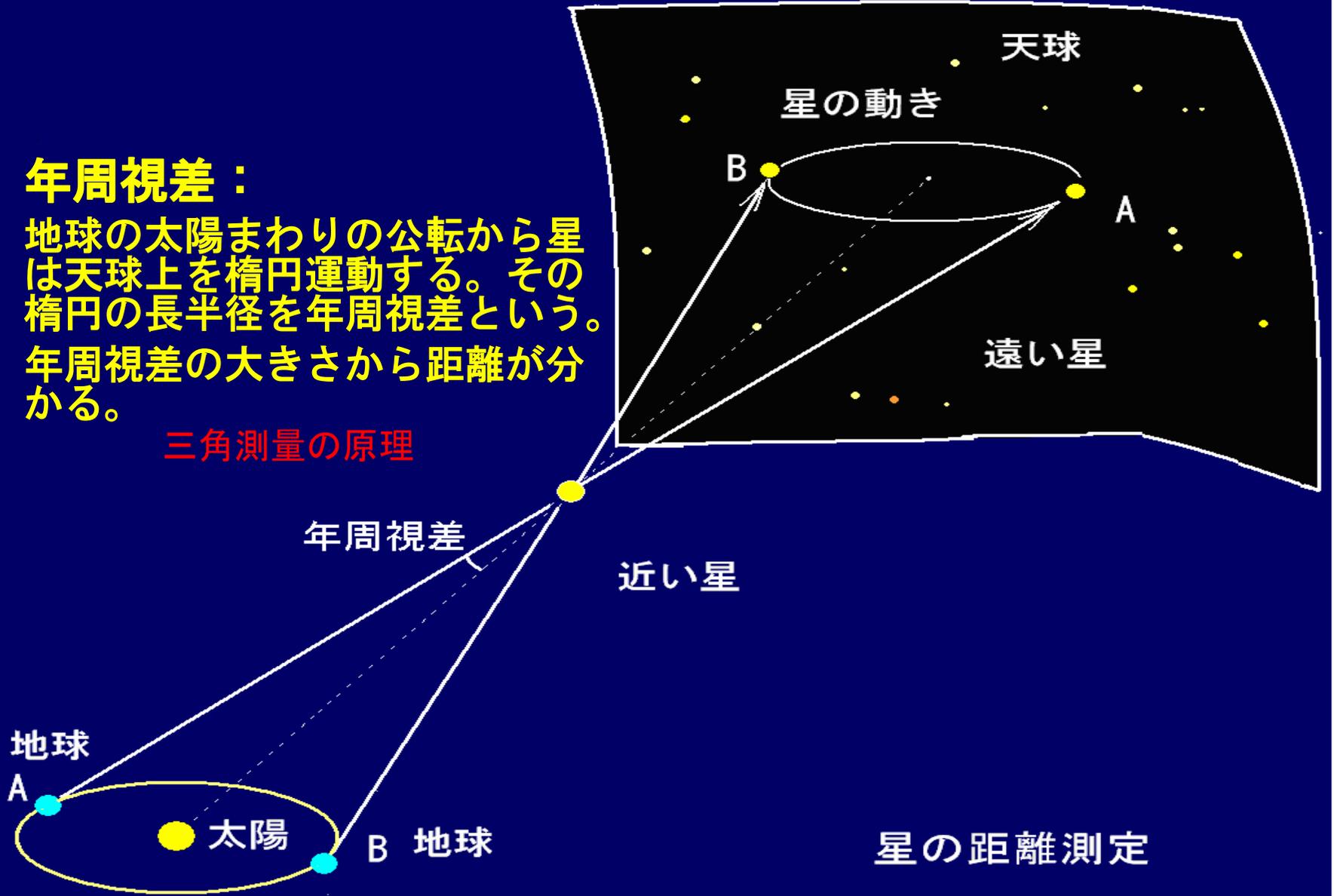
星の天球面上の位置とその時間変化を測定することで、位置、年周視差、固有運動を導出。観測終了後カタログを作成。

# — 年周視差とは —

## 年周視差：

地球の太陽まわりの公転から星は天球上を楕円運動する。その楕円の長半径を年周視差という。年周視差の大きさから距離が分かる。

三角測量の原理

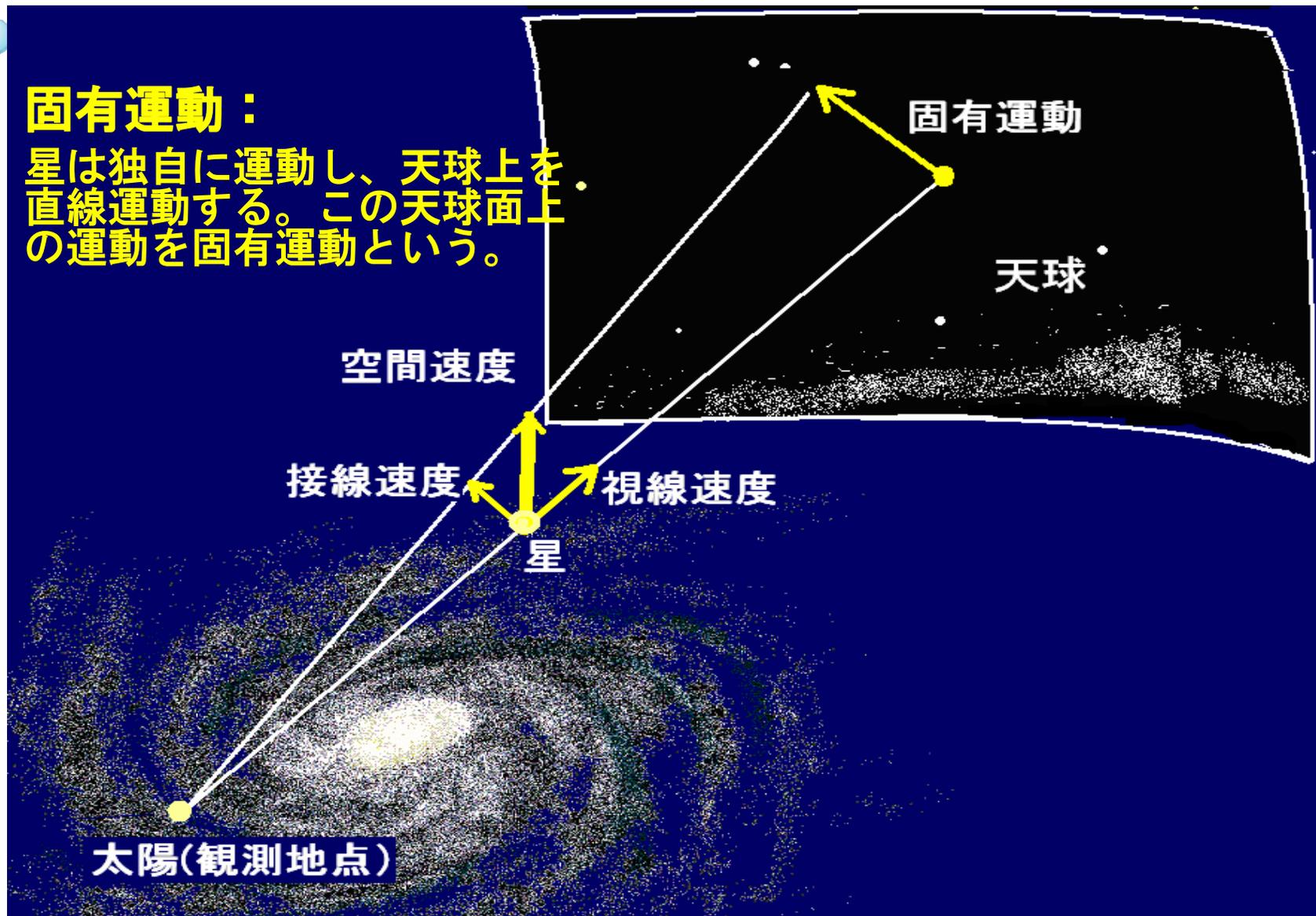


星の距離測定

# — 固有運動とは —

## 固有運動：

星は独自に運動し、天球上を直線運動する。この天球面上の運動を固有運動という。



# (1) 位置天文学の重要性: 宇宙の距離測定

**\*\* 星は、\*\* 光年先**

**\*\* 銀河は、何千万光年先**

**\*\* QSOは、\*\* 十億光年先**

天文台の森  
(三鷹市)  
\* 国立天文台  
パンフレットより



天体までの距離は非常に遠い。  
では、どうやって距離が分かっているのでしょうか？



## ★天体までの距離が重要な理由

### 1. 天体の地図=>分布、構造が分かる

星団や銀河系内の星などの分布、構造

銀河の分布、宇宙の大構造

### 2. みかけの量(相対量)を真の量(絶対量)に変換可能

例1: 星の明るさはみかけのもの。

本当は明るくても非常に遠くにあれば、暗く見える。逆に本当は暗くても近ければみかけは明るい。

例2: 星が天球上を動く速さもみかけのもの

実際は速度が速くても遠ければ、天球上をあまり速く動かない。

**天体までの距離決定**



**天文学の基本情報！  
地味だけど非常に重要なもの**

**しかし、天体は非常に遠い  
=> 距離測定は困難！**

**従って、精度良い距離測定は天文学の重要分野**

## ★距離測定の高難さ

宇宙では天体までの距離は莫大な範囲に広がっている

⇒すべての天体に応用できる距離測定法はない。

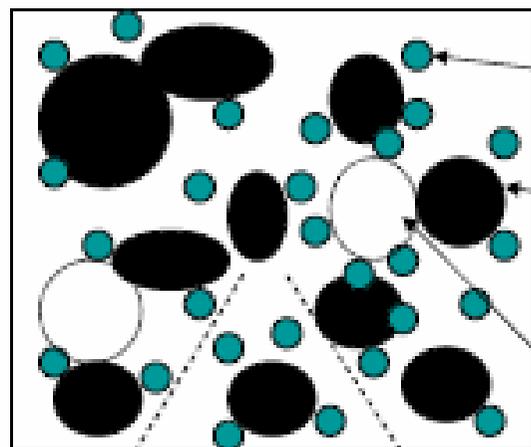
天体までの距離とさらには天体の種類に応じて異なる方法が用いられる。

## ★宇宙の距離はしご

近傍の天体までの距離測定結果を用いて、さらに遠方までの距離を導出していく。

近傍から遠方へと手法をつないでいく方法を用いる。

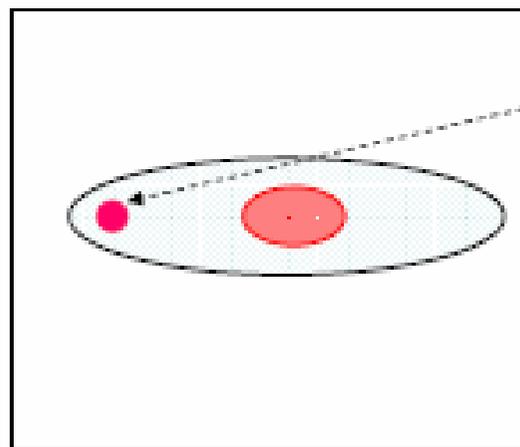
# 宇宙の階層構造



局所銀河群

銀河団

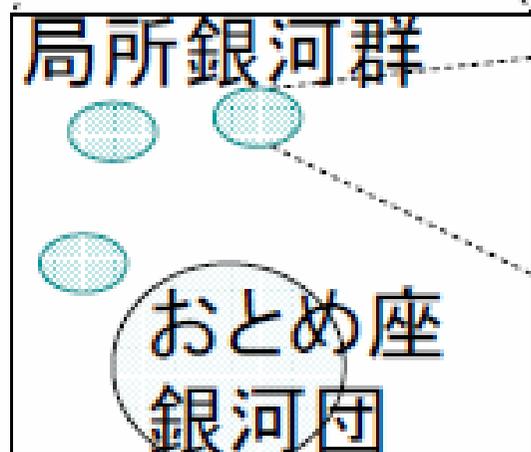
～1億光年



太陽系

～100億km(～0.001光年)

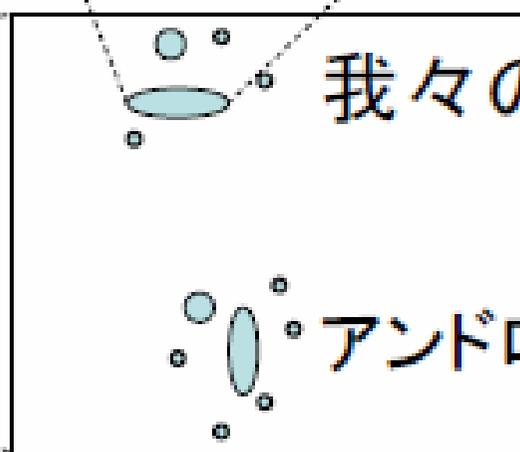
ボイド



局所銀河群

おとめ座  
銀河団

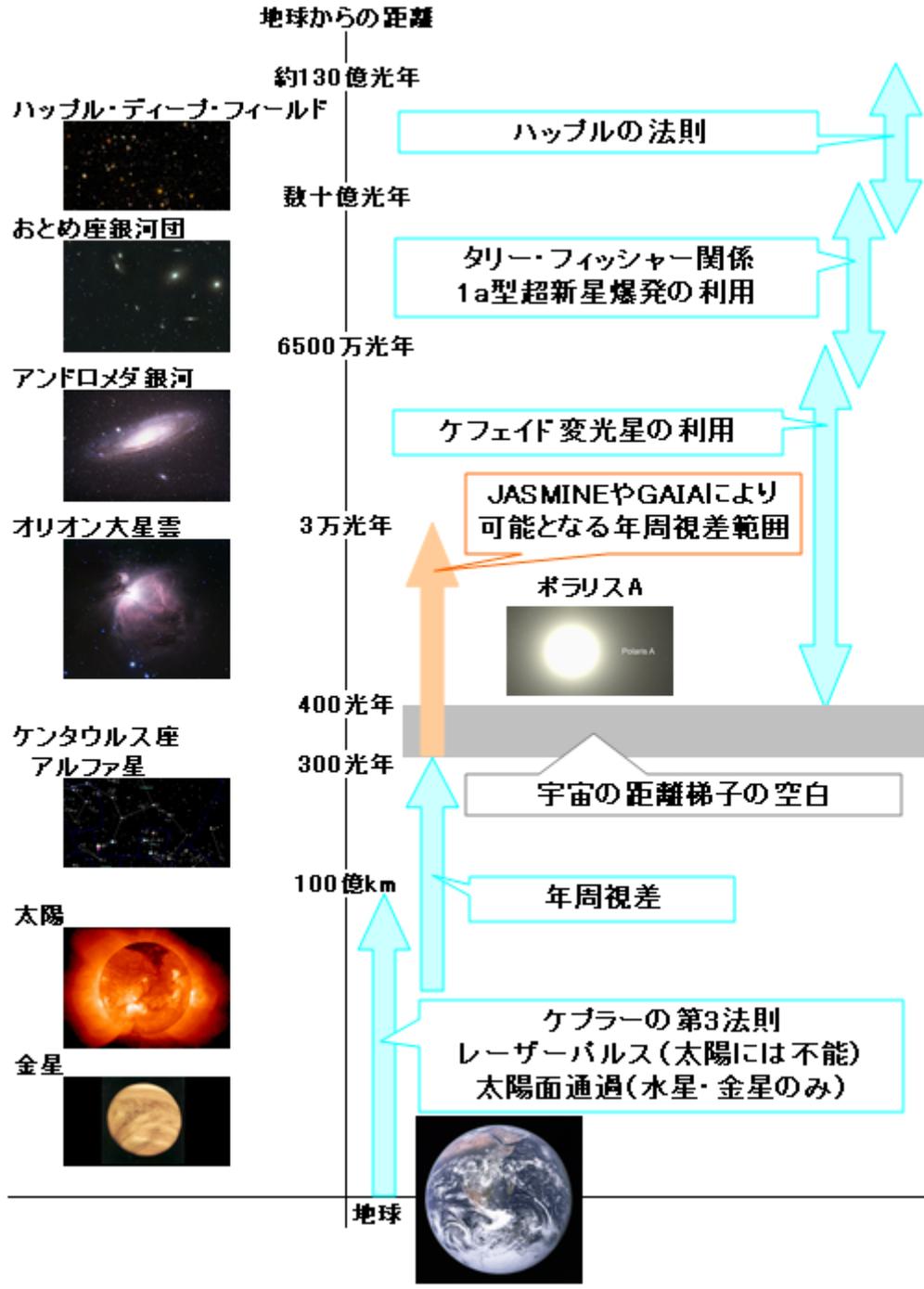
～1000万光年



我々の銀河

アンドロメダ銀河

～100万光年



年周視差測定は  
距離はしごの土台

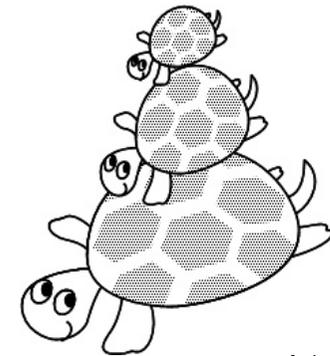
宇宙の距離はしご=>人類は宇宙の広さの認識を拡大  
新たな物理法則の発見にも  
つながった。

例:バブルの法則:遠方銀河ほど、速い速度で  
我々から遠ざかっている。  
=>宇宙空間の膨張

しかし。。。。

親亀の背中に子亀、その背中に孫亀のせて。。。

↓  
親亀こけたら、皆こける。。。



# 実際の星の年周視差の大きさ



**非常に小さい！ → すごい測定精度を要求**

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)



## ケンタウルス座

アルファ星は、リギル・ケンタウルス(4.4光年)。プロキシマは、そのアルファ星の連星の一つ。

実際。。。

ヒッパルコス衛星による年周視差の観測結果  
=>セファイド変光星の明るさが、従来の結果より、  
20%程度明るい  
=>大マゼラン星雲までの距離が10%程度  
遠い！？  
物議をかもした。

本当か？=>まだ、分からない

★土台となる年周視差による測定が重要！

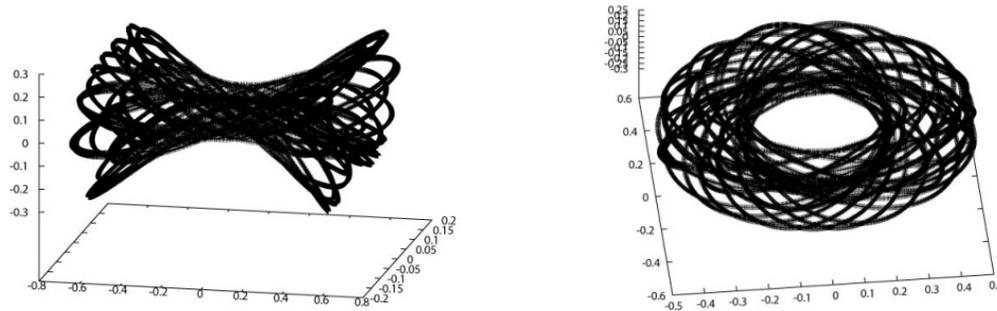
# (2) 位置天文学の重要性： 見えないものを“見る”！！！！

ダークマター等の分布、軌道 → 銀河の構造、形成史、力学構造の物理などへも影響

↑  
重力場

↓  
(観測できる)星の分布や運動

↑  
星の位置天文観測  
(天球上の位置、距離、接線速度)  
+ 視線速度観測



位置天文学：星の天球面上の位置とその時間変化を測定する天文学

星の天球面上の位置とその時間変化を測定することで、位置、年周視差、固有運動を導出。観測終了後カタログを作成。

# — 位置天文観測で分かる事（まとめ） —

距離



星の**立体分布**  
星の**本当の明るさ**、放出している**本当のエネルギー**

固有運動 + 距離



星の**接線速度** (視線速度に垂直方向)

以上より



星や**ダークマター**の分布や運動  
星の形成や進化  
銀河の構造や形成史  
その他いろいろ(系外惑星探査、重力レンズ、  
一般相対論の検証など)

## 2. 位置天文学の歴史と現状

### ★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)

\*1ミリ秒角

↓  
1997年：ヒッパルコスカタログ ~0.001秒角

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、メーザー源とよばれる星の周りのガスを見ている)



★1838年、ベッセルにより、年周視差が初めて検出される。



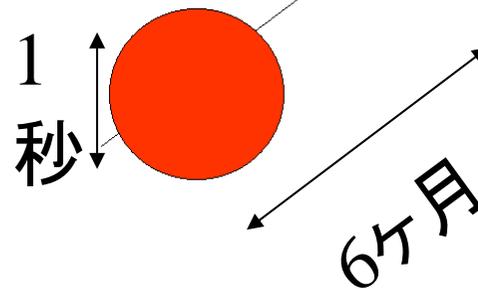
## 地動説の直接証明

固有運動の大きな61 Cygを  
ターゲット  
→ 0.3136秒

1830'sは年周視差観測の先陣争いの時期 (Hipparcos: 0.28547秒)

シミュレーション

F.W. Bessel (1784 -  
1846)



<http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/text/bessel.htm>

# 位置天文観測の位置測定の世界 (現状)

1997年：ヒッパルコスカタログ～0.001秒角(1ミリ秒角)

\* 測定は1991年



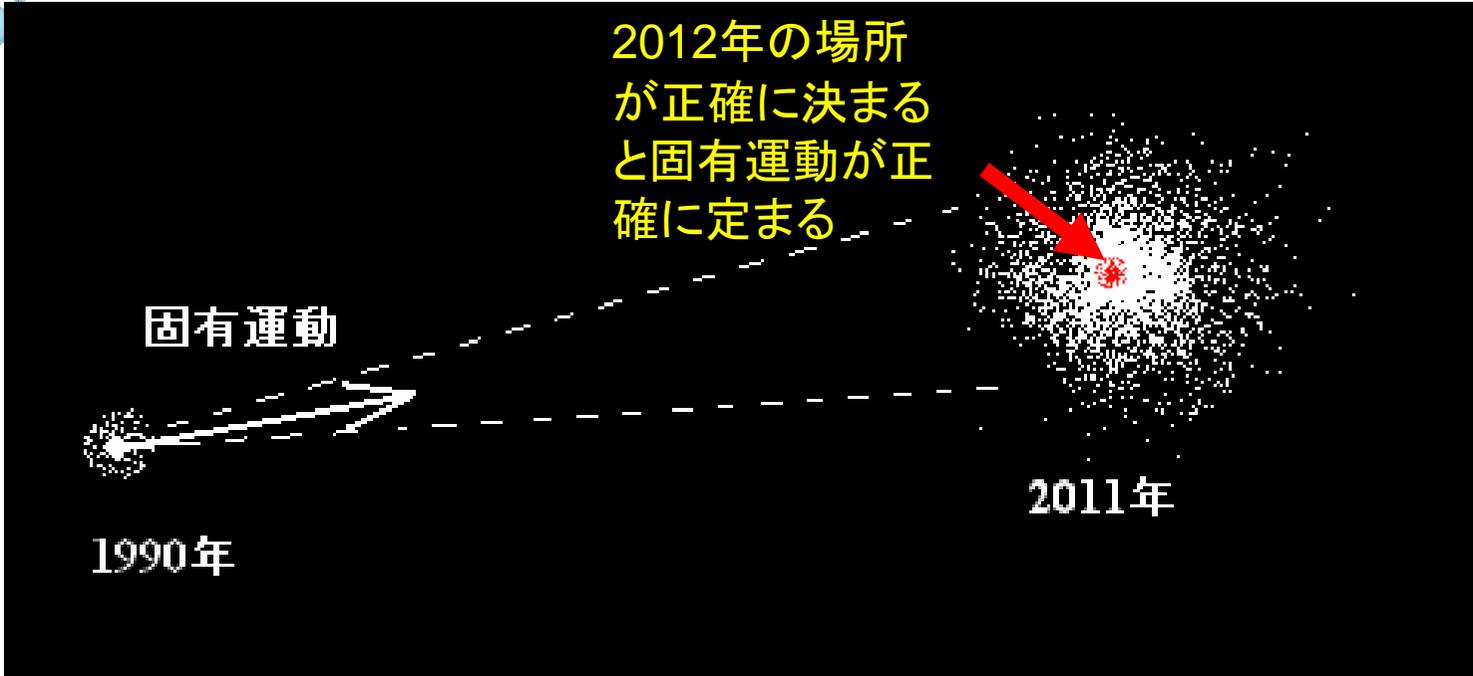
ヒッパルコスの測定から20年：位置天文カタログは時間とともに精度悪化

ヒッパルコスと同程度の精度でも新しいカタログが必要

将来の10マイクロ秒角レベルの位置天文観測(GAIA,JASMINE)への架け橋



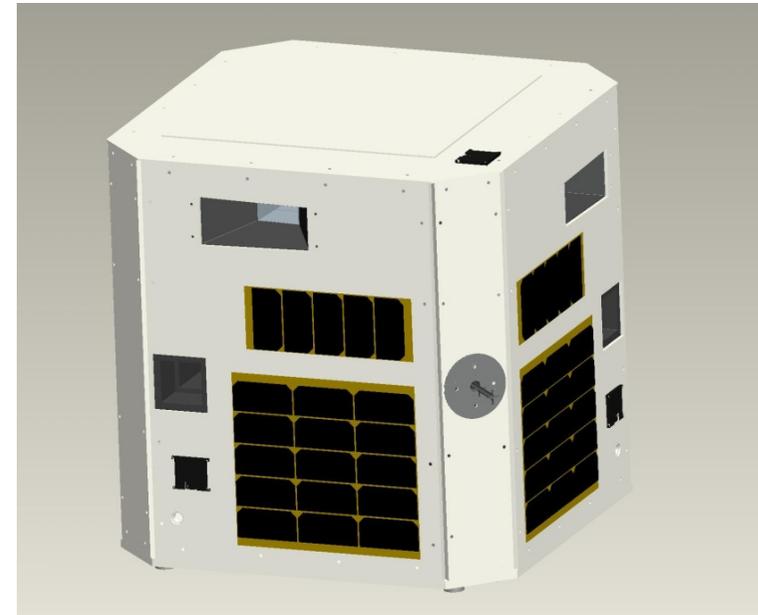
2012年：Nano-JASMINE



# 3. ナノ・ジャスミン衛星について Nano-JASMINEはどんなもの？

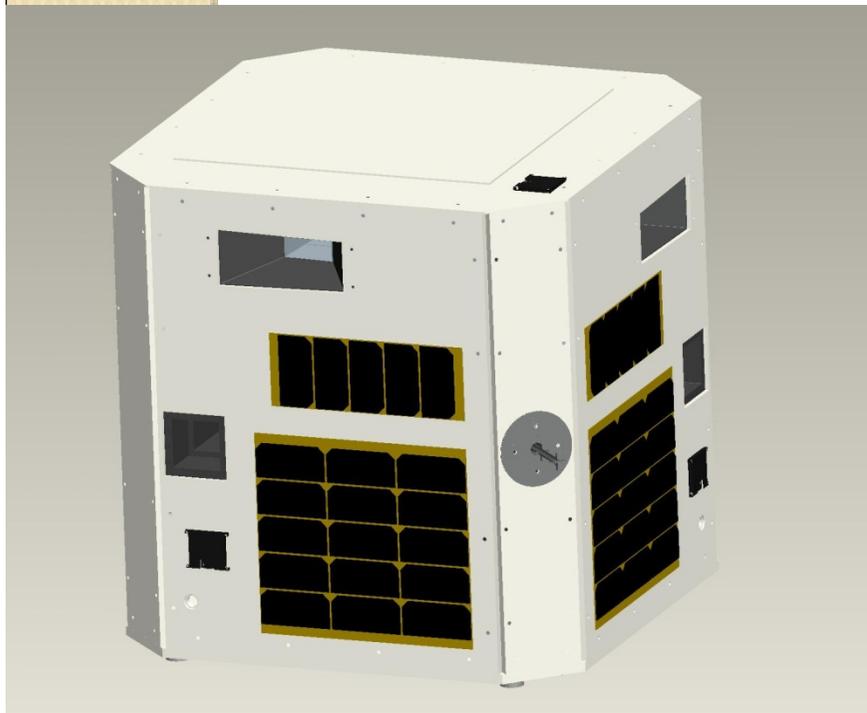
## 衛星の仕様

衛星外形	50×50×50cm
質量	約35kg
打ち上げ	2012年
観測期間	2年
観測精度	～3ミリ秒角
観測等級	zWで7.5等級より明るい星
観測波長	zw-band(波長域：0.6～0.8 $\mu$ m(ミクロン))

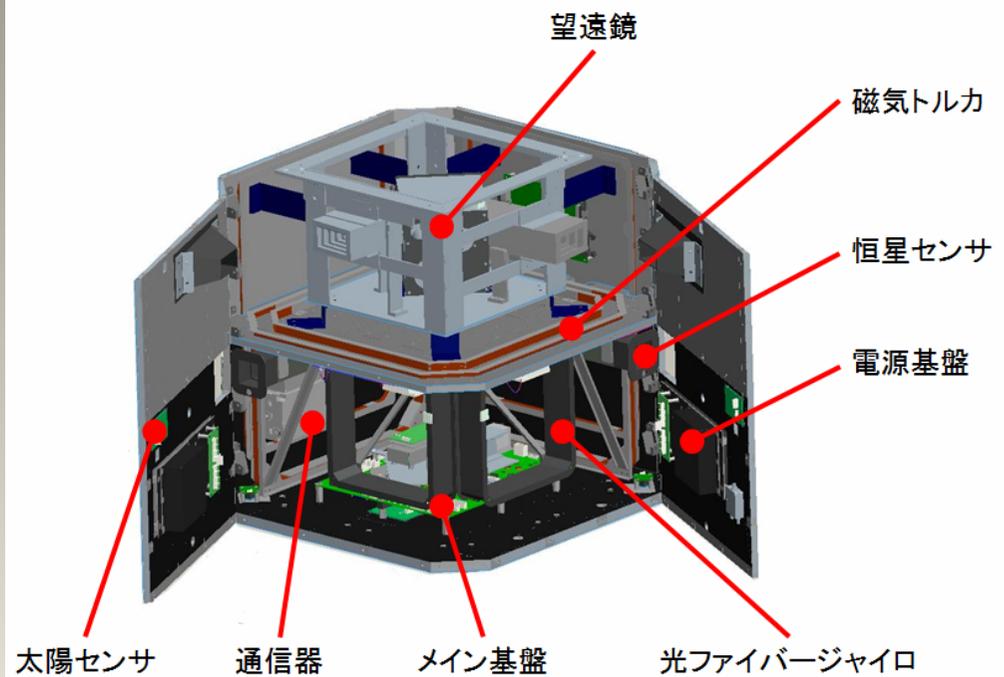


Nano-JASMINEの概観図

# Nano-JASMINEはどんなもの？



Nano-JASMINE概観図(外観)



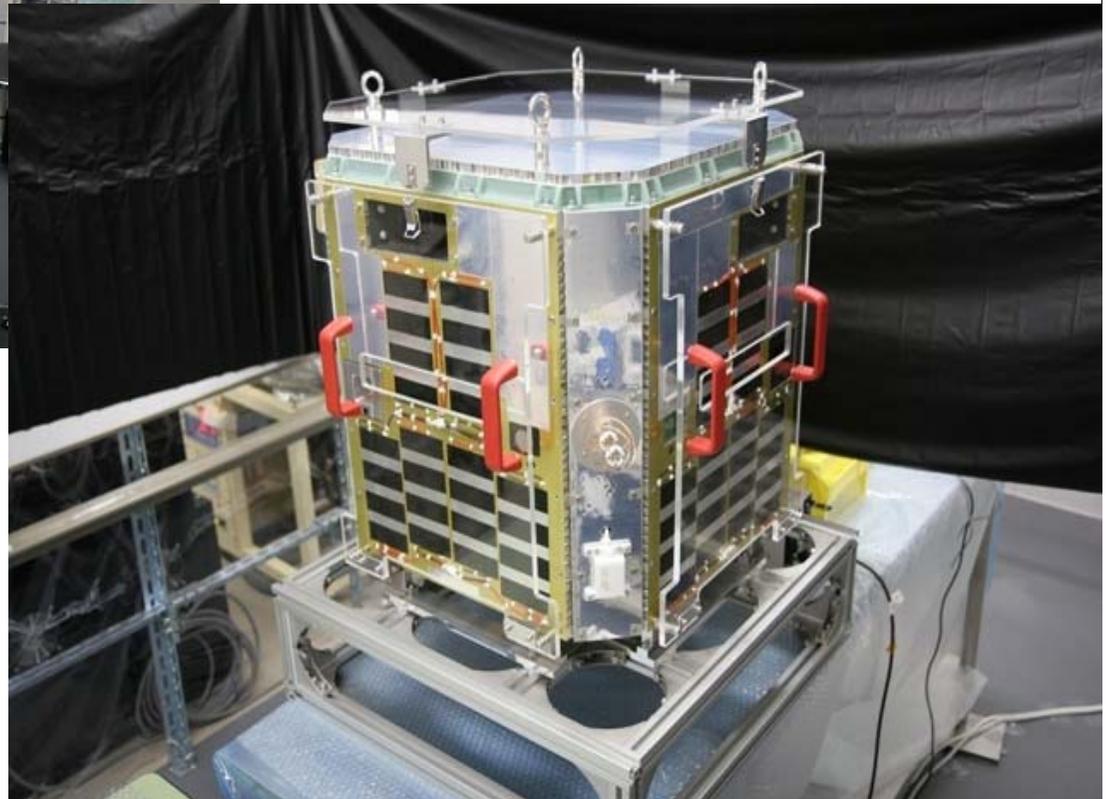
Nano-JASMINEの概観図(内部)

# Nano-JASMINEの試作品

\*試作品：エンジニアリングモデル

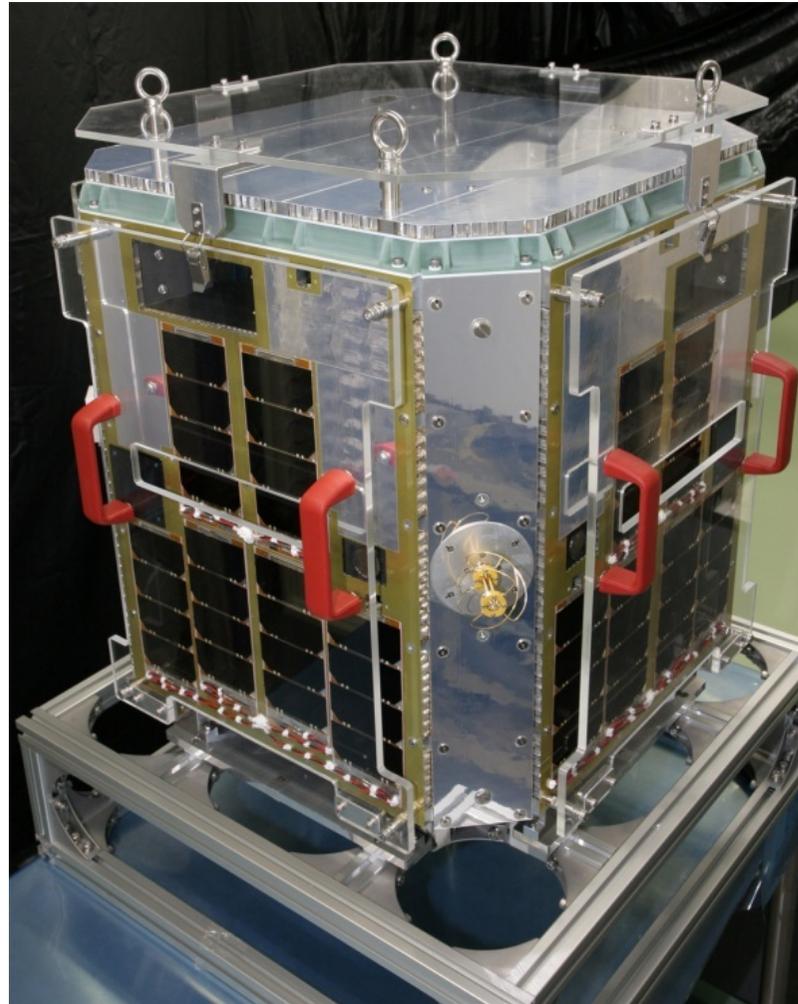


試作品の外観



試作品組立風景

組み立てが完了したNano-JASMINE衛星のフライトモデル



# Nano-JASMINEはどこで開発？

## 開発体制

国立天文台JASMINE検討室：

衛星全体の仕様決定、観測装置（ミッション部）の開発

データ配信、データ解析（文部科学省宇宙利用促進調整委託費を利用）

東京大学工学部中須賀研究室：

衛星システム(無線機、姿勢制御、電源など)全般の開発

データ受信システム（宇宙利用促進調整委託費を利用）

京都大学理学部天体核研究室：

軌道上でのデータ処理関連(星像の切り出しなど)

データの受信・解析システムの構築（宇宙利用促進調整委託費を利用）

# Nano-JASMINEはどう観測するの？

軌道：地球周回軌道  
(高度800km太陽同期軌道)

衛星スピン周期：100分

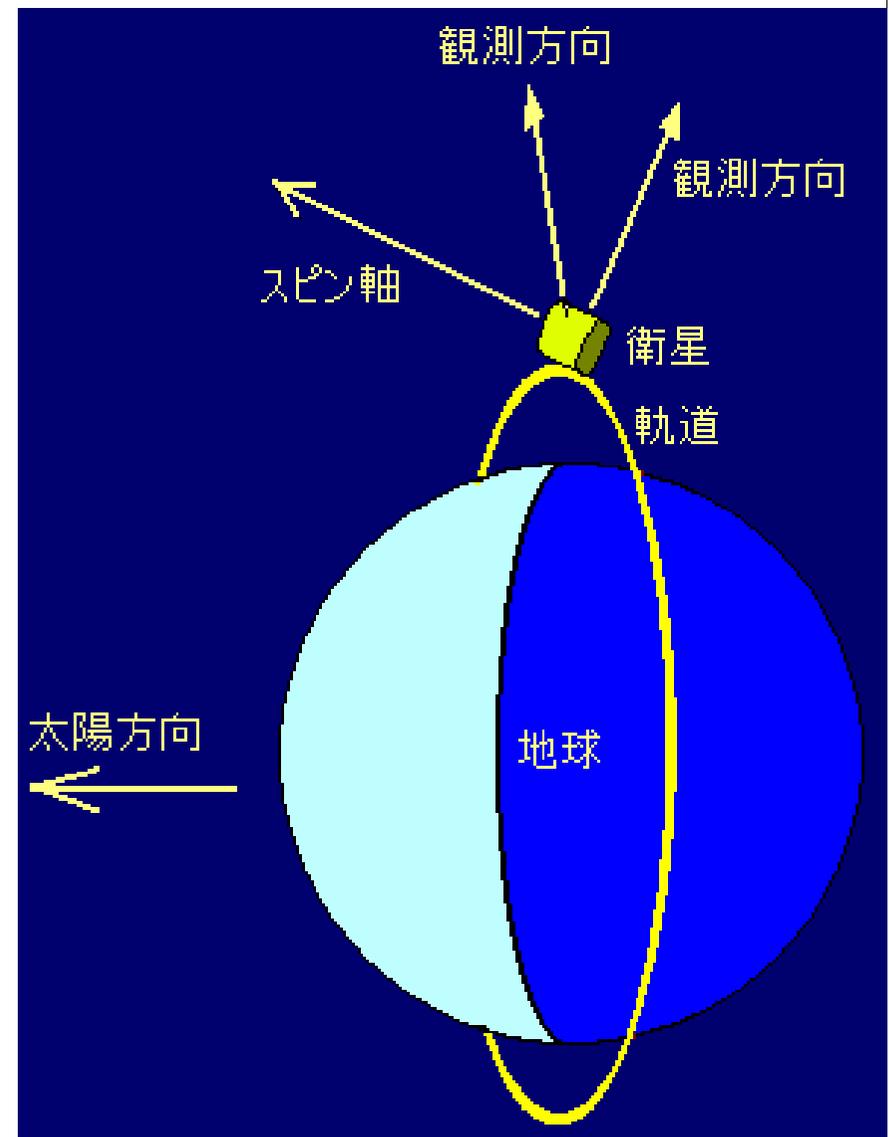
スピン軸方向：太陽から45度

歳差周期：2ヶ月

\* 同じ星を年間6回以上観測

99.5度離れた2方向同時観測

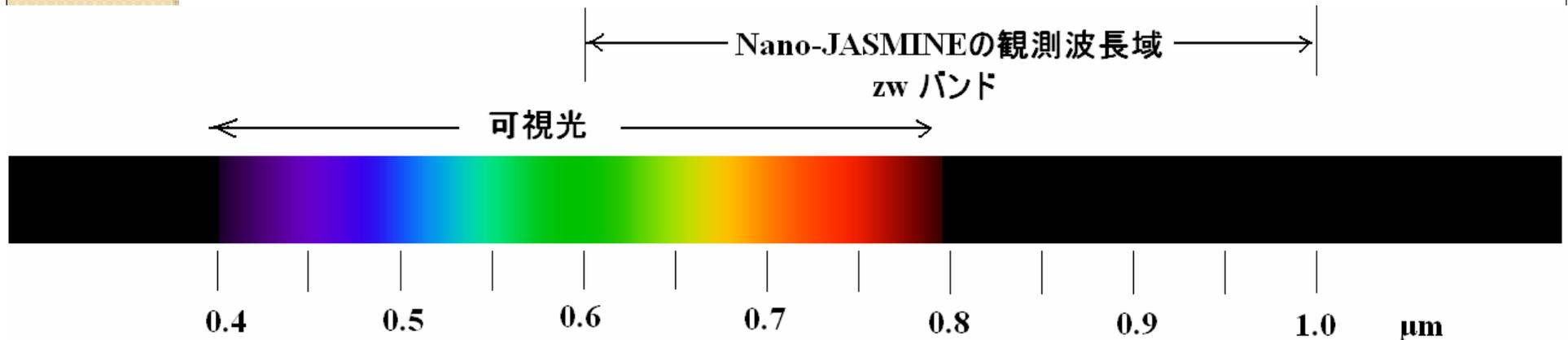
運用期間：約2年間



# Nano-JASMINEは何がすごいのか？

## 期待される科学的成果

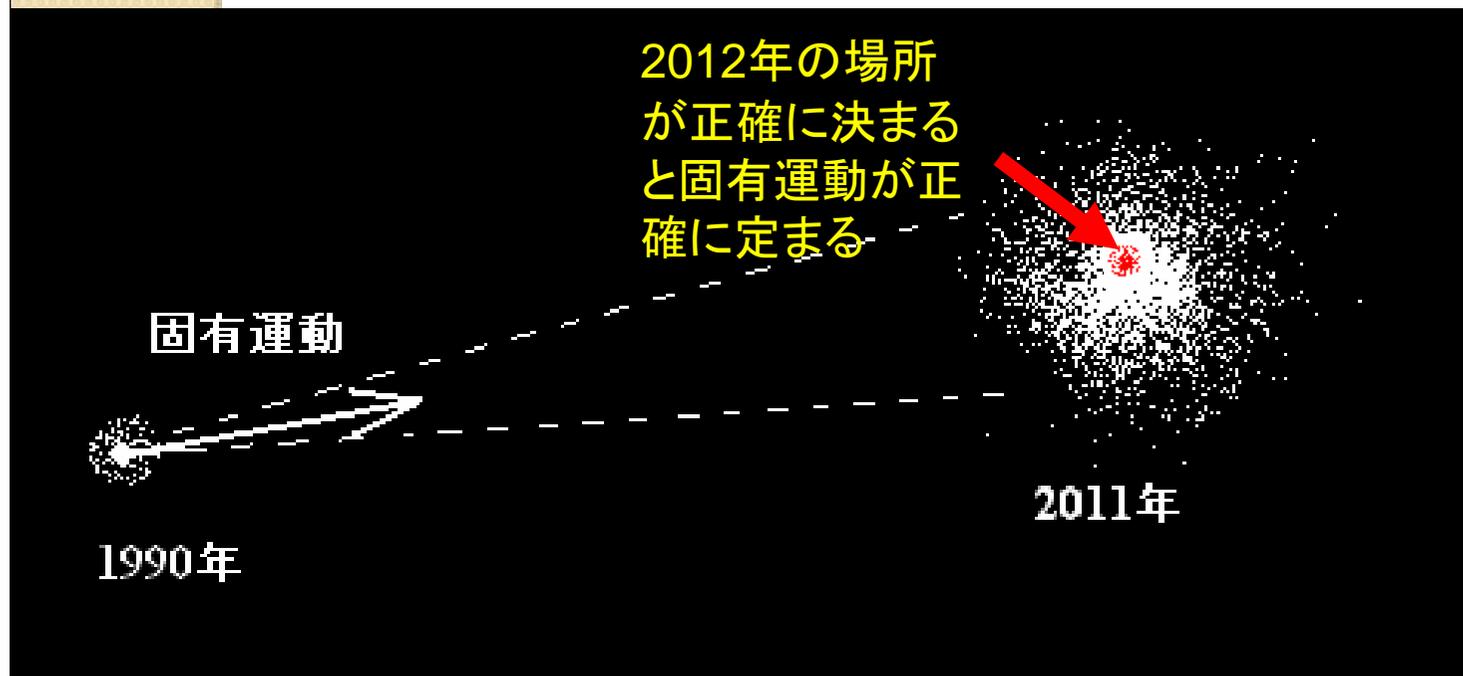
- **日本初**の位置天文観測衛星（観測精度～3ミリ秒角）  
（ヒッパルコス衛星に次ぎ**世界でも二番目**）
- **zw-バンド**における世界初の全天位置天文カタログ



# Nano-JASMINEは何がすごいのか？

## ● 期待される科学的成果（続き）

- 固有運動精度をヒッパルコスとあわせることによりヒッパルコスよりも1桁アップ  
(~0.1ミリ秒角/年)



# Nano-JASMINEは何がすごいのか？

## 期待される科学的成果（続き）

### ●解決に寄与できる課題：

（例）太陽系近傍のダークマターの分布、星団までの正確な距離、星団の運動、星形成などなど



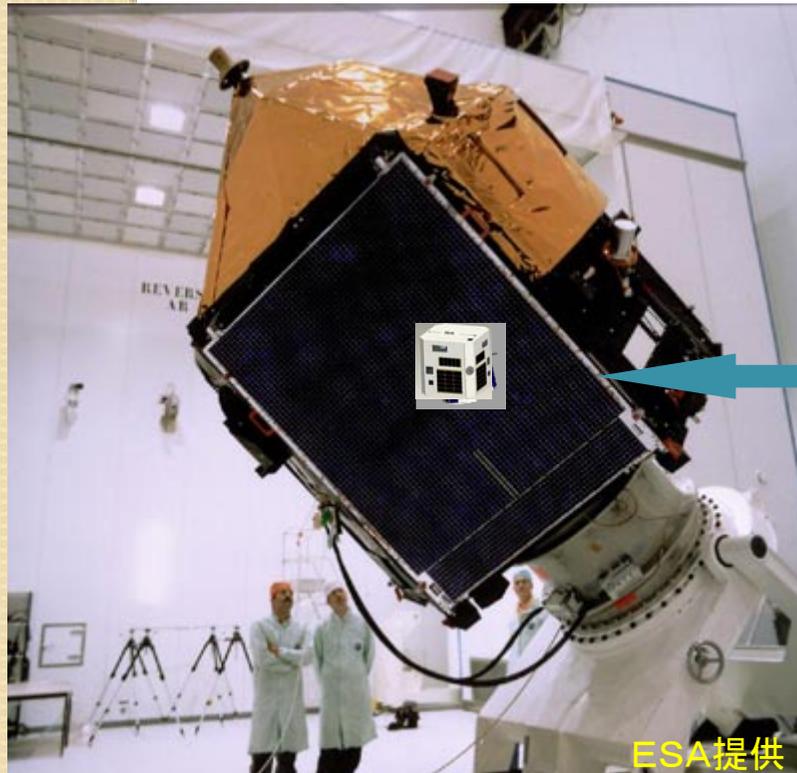
撮影：沼尻裕氏

# Nano-JASMINEは何がすごいのか？

## 超小型化への技術革新

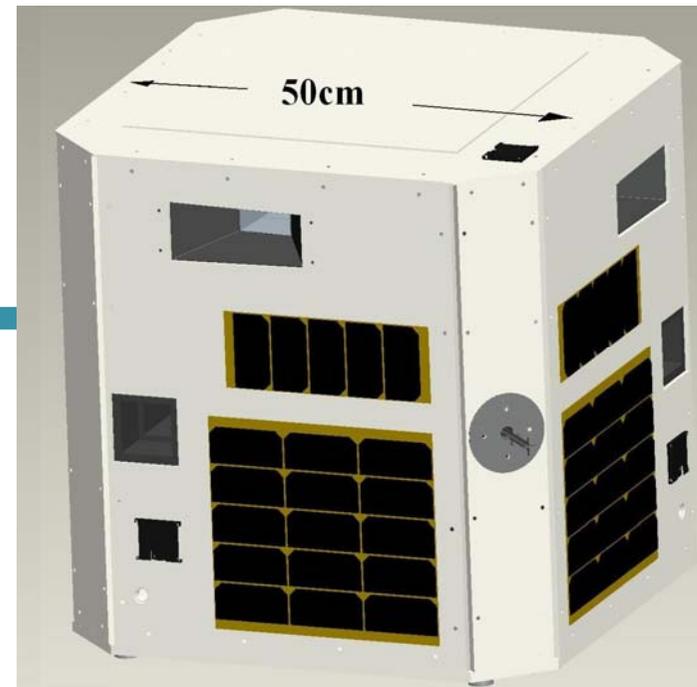
- 検出器の性能向上、高精度姿勢制御装置の小型化など
- 低コスト。
- 小さいながらヒッパルコス衛星と同程度の観測を行う！

\* ~3ミリ秒角



ESA提供

ヒッパルコス衛星 重量1.4トン



Nano-JASMINE衛星 重量35kg

# Nano-JASMINEは何がすごいのか？

学生の教育や若手研究者の育成、  
衛星未経験者の衛星計画参入への敷居を下げる

開発の主体は学生（のべ36名（現在：18名））  
や若手研究者

開発期間が比較的短い：一連の開発を経験できる。

# Nano-JASMINEは何がすごいのか？

## 次世代への架け橋

天の川銀河

ハロー

10マイクロ秒角の位置天文観測

(Gaia, 小型JASMINE, JASMINE) 10マイクロ秒角の測定で正確に距離測定ができる領域

ヒッパルコス衛星、  
Nano-JASMINEで正確に測定できる領域

バルジ

およそ1万5千光年

ディスク

太陽系

銀河面

天の川銀河面の中心

2万7千光年

2万6千光年

10万光年

データ解析チームと連携(国際協力)

2013年：Gaia (ガイア(ESA)：ヨーロッパの全天可視光位置天文観測衛星)

2017年頃：小型JASMINE(赤外線観測：バルジの方向の一部)

2020年代：JASMINE (赤外線観測：バルジ全域)

# 打ち上げが正式決定！！

Nano-JASMINEがウクライナのサイクロン-4  
ロケットを用いて**2011年度**(2012年に延期の  
見込み) にブラジルアルカンタラ発射場から打  
上げ予定であるが、その契約が2010年2月26日に  
締結された。

## 打ち上げ契約成立！

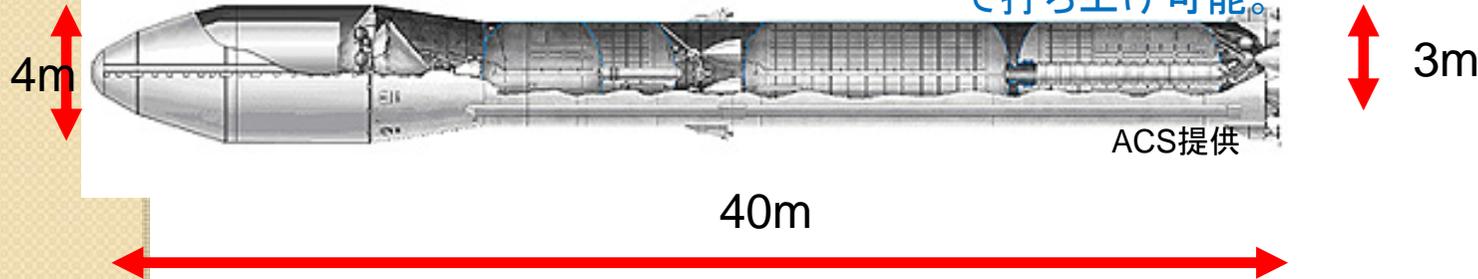


サイクロン-4ロケット

© SDO Yuzhnoye

ユジノエ社(ウクライナ) サイクロン-4型  
ロケット

今までサイクロン-3型までの打ち上げ実績がある。  
サイクロン-4型は、サイクロン-3型より打ち上げ  
能力を上げたもので、今回の打ち上げが初号機  
となる。低軌道で5300kg、静止軌道で1600kgま  
で打ち上げ可能。



打ち上げのオペレーション:アルカンタラサイクロンスペース社  
ウクライナとブラジルの合弁会社

アルカンタラ射場より打ち上げられる。

組立場



射場



管制棟





# ムービー：

製作：国立天文台科学文化形成ユニット  
三上 真世

# 今後のスケジュール

2010年12月 フライトモデル完成

\*フライトモデル:実際に打ち上げる衛星

現在、最終試験段階。

運用、データ解析の準備

2012年 フライトモデルを射場へ運搬

2012年X月 打ち上げ@アルカンタラ(ブラジル)

2014年 観測終了予定

2014年～2015年 Nano-JASMINEカタログ公開  
(早期のバージョン1から2へ)

\* 文部科学省宇宙利用促進調整委託費により、独自のデータ受信・配信システムを構築し、国立天文台(位置天文データ)、東大(衛星システムデータ)からのデータ配信を行う予定。

# Nano-JASMINEカタログ

Nano-JASMINEカタログ:

zwバンドで7.5等級より明るい星およそ20万個についての以下の精度で観測

位置～2.6ミリ秒角

年周視差～3ミリ秒角

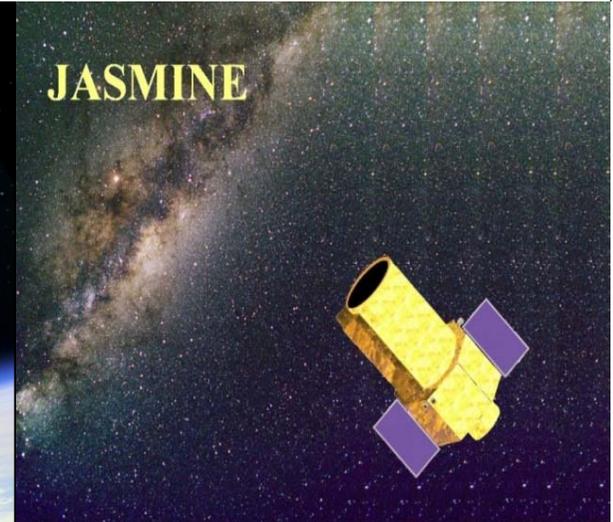
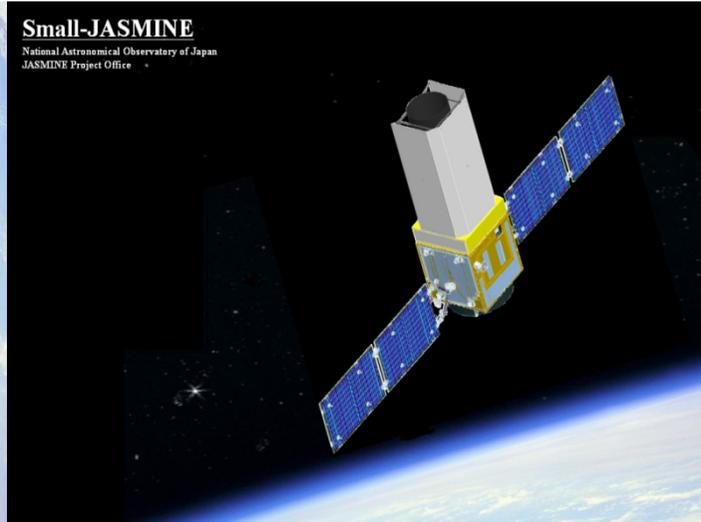
固有運動～2.3ミリ秒角/年 \*ヒッパルコスと合わせて～0.1ミリ秒角/年

精度は悪化するが～10等級程度100万個の星を観測

—参考—

カタログ名	V等級	星の数	位置決定精度
ヒッパルコス	～12	120,000	～1mas
ティコ	15	2,500,000	7mas (<7mag) 25mas (<10.5mag) 60mas (<11.5mag)

# 4. JASMINE計画シリーズによる天の川の謎解き



## Nano-JASMINE

主鏡口径5cm  
 ~3mas 全天サーベイ、  
 zw-band(0.6~1.0ミクロン)  
 打ち上げ: 20121年  
 衛星重量: 35kg

日本初(世界で2番目)の  
 スペースアストロメトリの経験。  
 衛星開発+打ち上げ: 1億円程度、  
 ウクライナのロケットでブラジルから打ち上  
 げ(2012年)

- 単独ではヒッパルコス程度の精度。ヒッパルコスと組み合わせると、固有運動精度は1桁程度向上
- 太陽系近傍のダークマター分布、星形成、星団の物理など

## 小型JASMINE

主鏡口径30cm級  
 10 $\mu$  as程度 狭領域サーベイ  
 Hw-band(1.1~1.7ミクロン)  
 打ち上げ目標: 2017年頃  
 衛星重量: ~400kg

銀河系中心近くのバルジの星の位置天文情報を世界で初めて得る。

JAXA宇宙研の小型科学衛星シリーズに応募予定: 高精度狭領域位置天文観測は、小型科学衛星が最適。

- 世界に先駆けて、銀河系中心付近でのバルジ構造、星形成史、巨大BHの進化などの研究進展を目標
- X線連星の軌道要素決定、系外惑星などの特定天体もターゲットにする。

## (中型)JASMINE

主鏡口径80cm級  
 10 $\mu$  as程度 広領域サーベイ  
 Kw-band(1.5~2.5ミクロン)  
 打ち上げ目標: 2020年代  
 衛星重量: ~1500kg

100万個レベルのバルジの星の位置天文情報

- 測定精度は、小型JASMINEと同様
- バルジ方向の20度×10度をサーベイする。
- 小型JASMINEでの観測個数や領域が小さいことを補い、統計精度を向上
- 全面的な国際協力も視野

# 天の川銀河

1000光年  
夜空に見える多くの  
星が存在する範囲

3万光年

太陽系

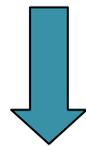
JASMINEが高精度に  
測定する範囲

天の川銀河の謎の解明を目指して

★なぜ、天の川の星々の位置やその変動(星までの距離と運動速度)を測定するのが重要なのか？



天の川の“**地図**”(運動情報も含む)を得る



天の川銀河を“**知る**”

天の川銀河の構造、誕生と進化、

天の川銀河内の構成天体の謎の解明

(ダークマターの量や分布、恒星の進化、星団、変光星、

系外惑星、重力レンズ、星間吸収物質、など)

余談:

天の川とは？

★古代: 不思議で神秘的なもの

天上の川、天漢、光の川、...

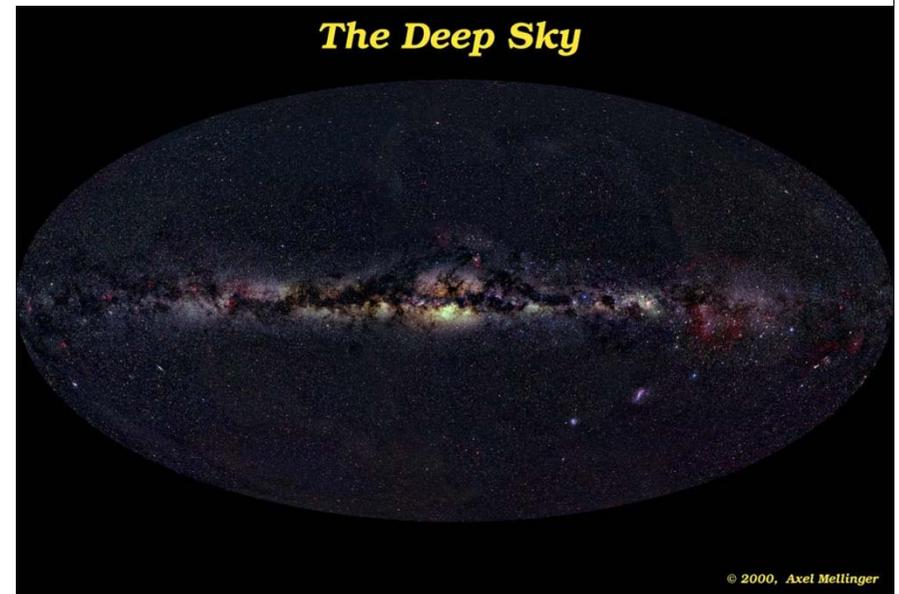
★数々の伝承: ミルクの道、

ナスカの地上絵(?), ...

1610年、ガリレオによって、星の集まりであることが発見される。

“天の川銀河”

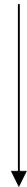
# ★天の川



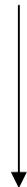
★ 漢字の“漢”



中国では元々、**天の川**(**天上の川**)



**漢水**:七夕の頃、**天の川**と一体化



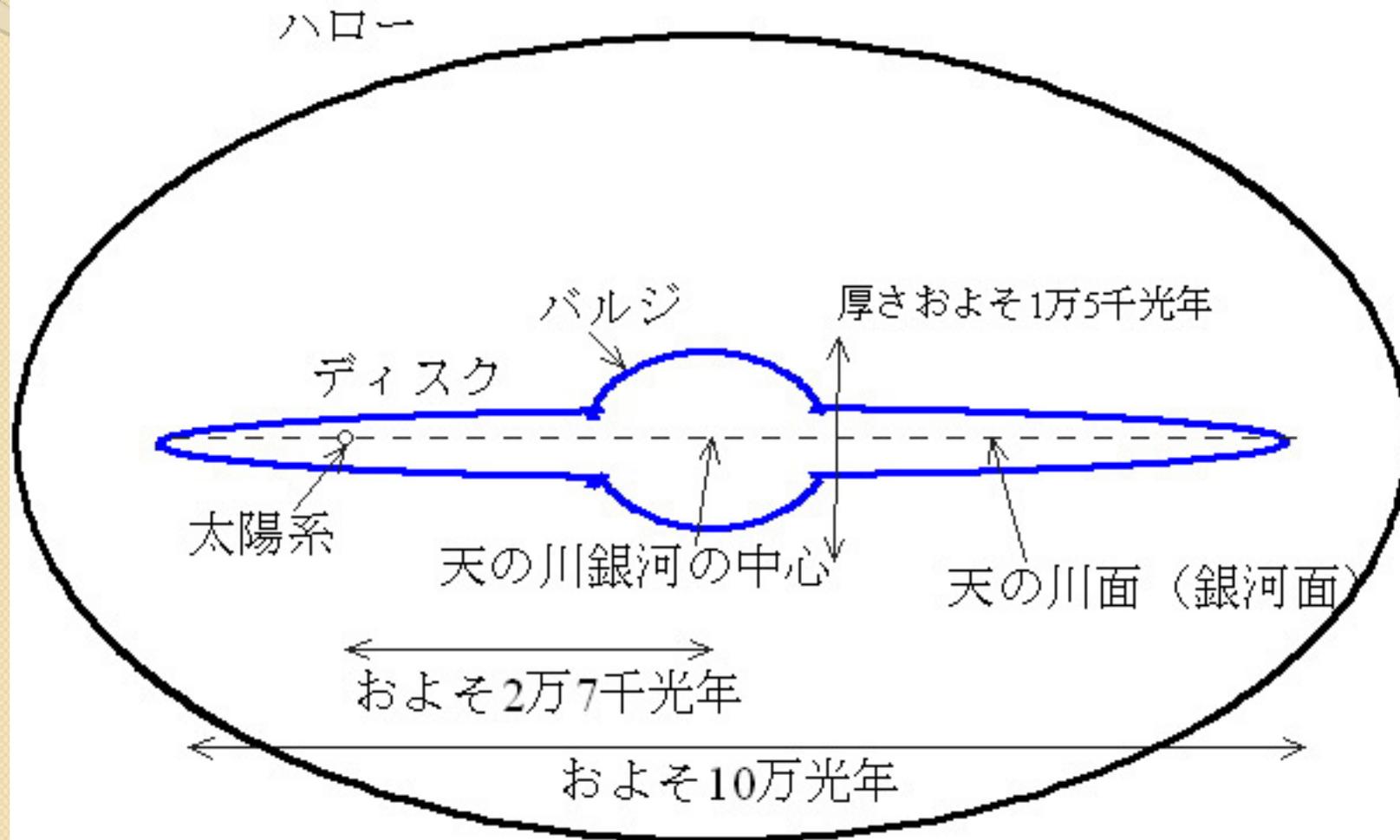
**漢王朝** → **漢字**



# 天の川銀河の概要

★恒星が約2000億個集まった集団。

★銀河面(ディスク)、バルジ、ハローの成分に分かれる。



# M31 (アンドロメダ銀河)



(国立天文台広報普及室提供)

しかし、天の川銀河は、まだまだ分からない  
ことばかり

★星の距離、運動???

→ 天の川銀河の“正しい”形は  
まだ誰も知らない

★構成天体(ダークマターなど)も不明

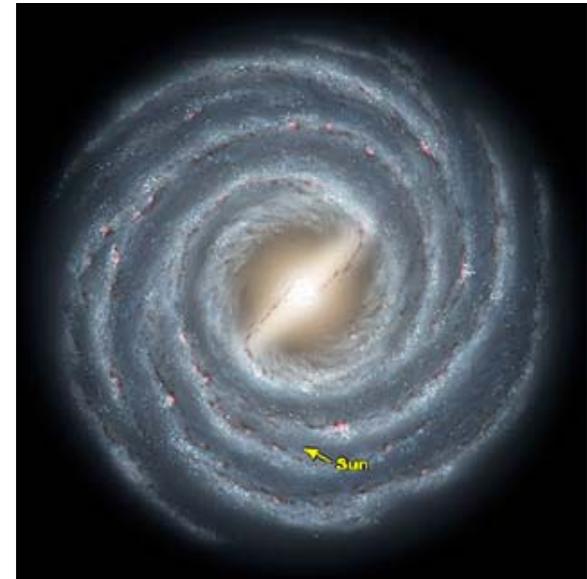
★どのように誕生して、現在のようになってきたかも不明

★天の川銀河の中心にある巨大ブラック

ホール(太陽質量の400万倍)の謎。起源、進化は?

そこで、位置天文情報

→ そこで、天の川銀河の解明



## ◎なぜ、天の川銀河を知ることが重要か？

→一番身近で、詳細かつ精密に  
●(近未来で)観測できる唯一の銀河。

### 非常に良い“実験場”

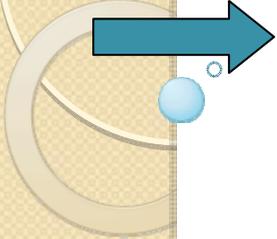
1. 太陽系サイズ以上の星の集団(自己重力多体系)の  
厳密な特徴(分布や運動)を誰も知らない。

→天の川銀河を知れば、はじめて。

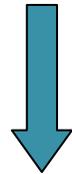
2. 宇宙の存在する様々なタイプの天体は天の川銀河  
にもほとんど存在する。

天の川銀河内の天体(ダークマター、恒星、変光星、  
重力レンズなど)を解くことによって、宇宙を“普遍的”に  
理解できる。

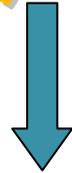
### 3. 天の川銀河の形成史を知る



宇宙初期における銀河の形成と  
進化を解明するためのヒント



宇宙における構造形成



人類の位置づけ

つまり……

遠方宇宙論 vs 近傍宇宙論

★銀河系の形成・進化の解明  
(唯一、詳細に探査できる)

銀河の形成、進化は複雑な過程。  
遠くを見ているだけでは詳細は分からない。  
天の川銀河の中にそれを解く鍵が隠されている  
はず。

例：衛星銀河の衝突の化石など

## ◎家の“形成史”と住人の例え

家は、どのように建築され、どのように変化していくか？その家の中にいる人間とは？



自分の家の外へ出たことがない人がそれを知るためには？

1. 自宅の窓から、外にあるたくさんの家と住人を観測。サンプルを集めると大体的特徴をつかめる。

→ 遠方宇宙論

2. 家の構造、材料、どのように組み立てられているかを直接知るためには、自分の家を探索する。

→ 近傍宇宙論

“自分の家”



天の川銀河

★特に**小型JASMINE**、(中型)**JASMINE**は。。。。

**赤外線**→

●(塵に覆われて可視光では観測しにくい)

**天の川銀河の中心付近**

**中心部に位置するバルジ**

**集中的に観測**

○バルジの力学構造、構造形成史

○バルジ内の星形成史

○中心にある巨大ブラックホールの進化

○中心での星団形成

○円盤の渦巻きの起源

などなど。。。。

## ★最後に

● 位置天文観測：地味だが。。。

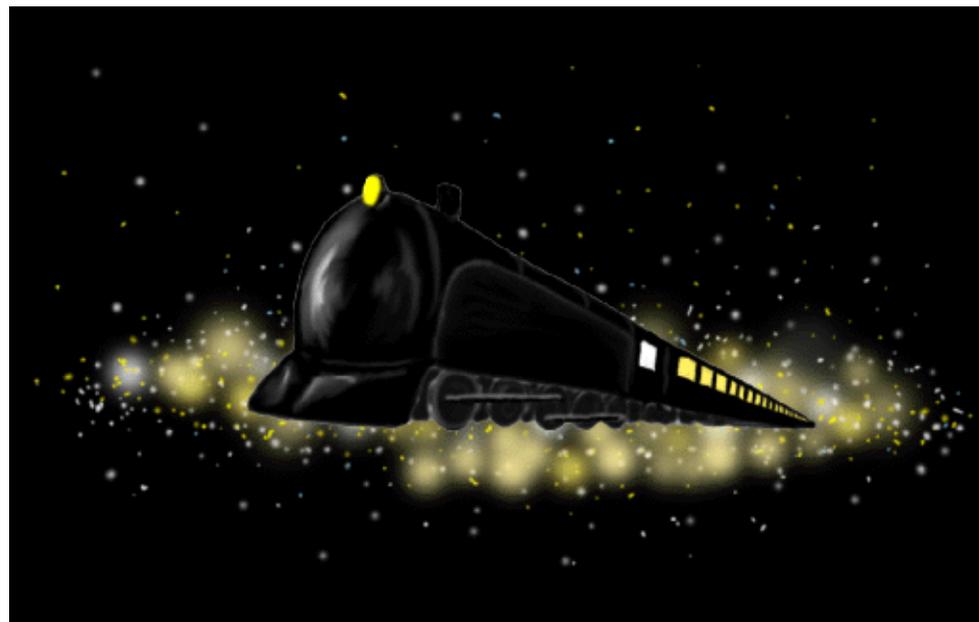
距離をはかる営み：人類の認識の拡大

地図、運動→ダークマターの様子まで

天の川の神秘が解き明かされていく。

→他の銀河の形成、進化の解明のヒント

21世紀.....



21世紀の銀河鉄道

新しい天の川銀河の姿や  
宇宙像が見えてくるだろう  
楽しみ！！

ありがとうございました

Jasmine

