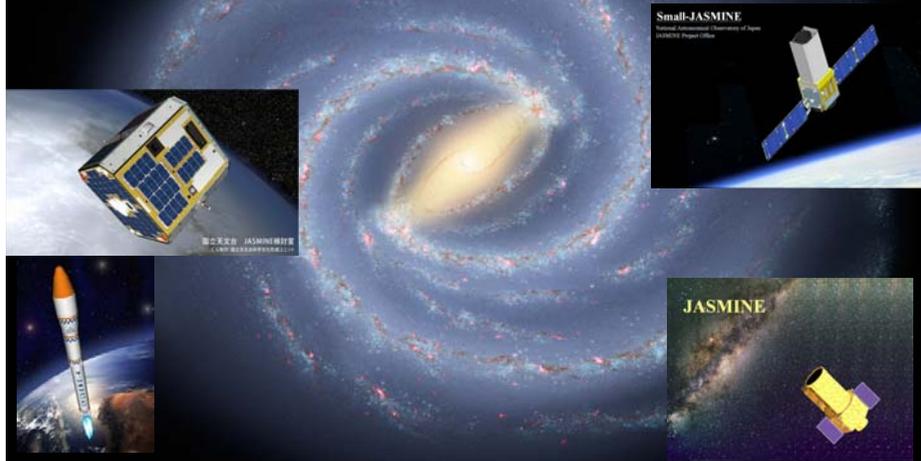


天の川銀河の謎解きに挑む！ ～位置天文学とデータ解析～

郷田直輝（国立天文台JASMINE検討室）



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. はじめに～天の川銀河の謎解き～
2. 位置天文学とは？ ～星の地図と“運動”を知る～
 - (1) 星の地図と運動
 - (2) 位置天文学は何をする天文学か？
 - (3) 位置天文学は何の役に立つのか？～その重要性～
 - (4) 今までどんな観測をしてきたか？～歴史と現状～
 - (5) 今後はどうするか？～世界の将来計画～
4. Nano-JASMINE衛星について
 - (1) どんなもの？
 - (2) 何がすごいのか？～期待される科学的成果～
5. JASMINE計画シリーズによる天の川銀河の謎解き
6. JASMINEにおけるデータ解析

1. はじめに～天の川銀河の謎解き～

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、

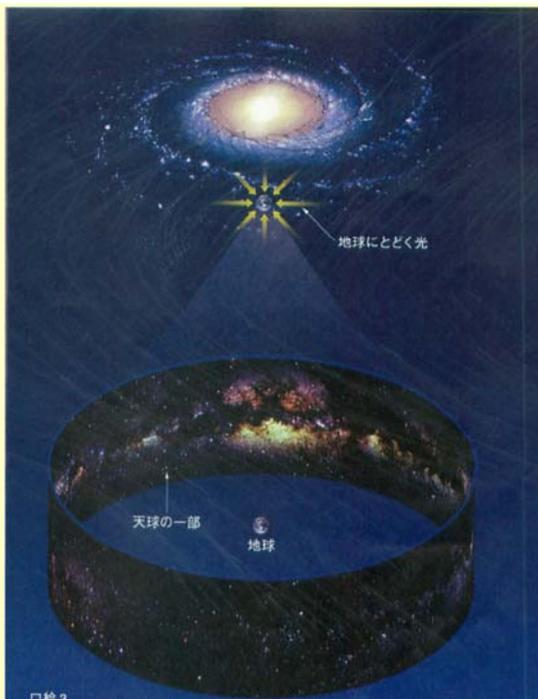
ナスカの地上絵(?), ...

→ 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”

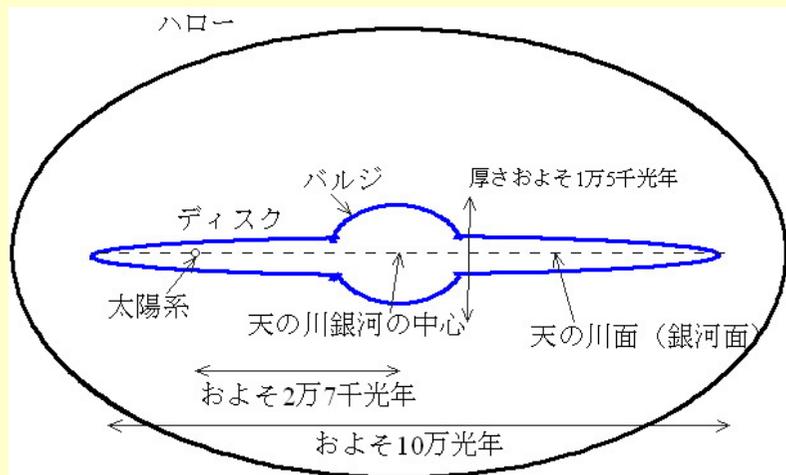
★天の川





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。



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?



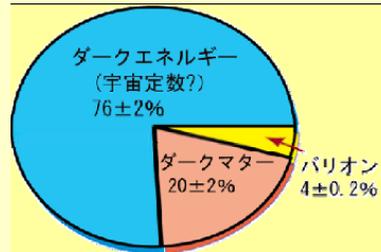
★宇宙にはどんな物(もの)があるの？

◎最近のいくつかの観測事実

◎宇宙に含まれる物質の質量比(重さのわりあい):

普通物質 (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% ~20% ~76%



◎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

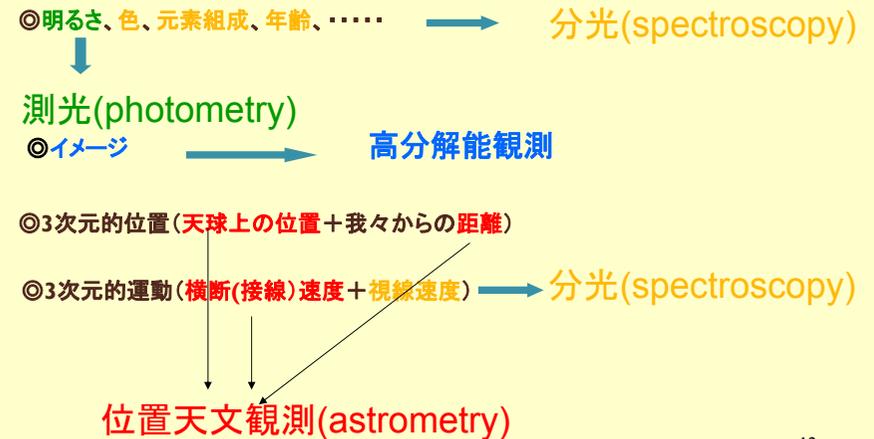
→ 宇宙初期における銀河の形成と
進化を解明するためのヒント



そこで、天の川銀河の解明
→ 位置天文情報

天の川銀河の謎を解くためには？
~位置天文観測の必要性: 星の立体地図と運動~

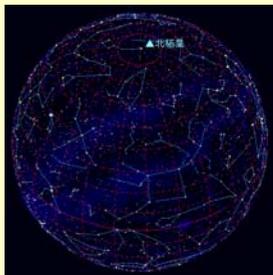
天文学にとっての重要な情報
宇宙の構成要素である星に対して:



2. 位置天文学とは？～星の地図と“運動”を知る～ (1) 星の地図と運動

★星の“地図”とは？

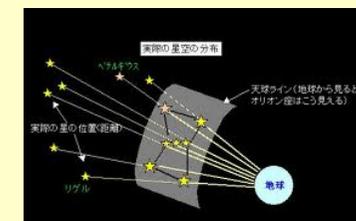
思い浮かべるのは、天球図や星座



星の“方向”を表す“地図”→重要

ところで、おなじ星座の星々は近くにある仲間なのか？

★星の“立体地図”が欲しい



星の“奥行き”が重要！！



星までの距離→本当の明るさ、本当の大きさ

星が多く集まっている星団や
銀河のサイズ、形、星の空間分布

→ 銀河の特徴が分かり、誕生や進化の謎も
分かってくる。

星の3次元立体地図が研究上、欲しい

★星の“運動”について

恒星って動いているの??

恒星: 天球上で、星同士の位置関係は変化せず、
動かないので「恒にある星」で恒星

惑星: 時間がたつと、恒星の間を動いてその
位置関係を変えているので、「惑う星」で惑星



ところが、恒星も動いている！！

例: 北斗七星の動きのムービー

@HippLinerより抜粋(野本知理氏@千葉大の作品)



星座も形を変えていく！！

(何万年以上もたつとその変化に気づく)

北斗七星

未来へ



北斗七星

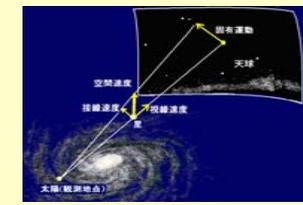
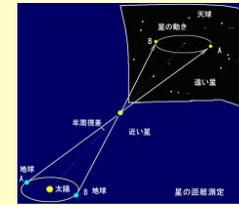
過去へ



★星はなぜ動くのか？

原因:

1. 地球が公転することによる“見かけの運動”(年周楕円運動)“



2. 星が、まわりの星やダークマターによる重力の影響を受けて
独自に運動(秒速で数km~100km以上の場合も:弾丸の速さ以上)
→天球上を動いていく運動(固有運動)

➡ 星は遠くにあるので固有運動はわずか
→地上でみると、星座の形がゆっくりとしか変化しない

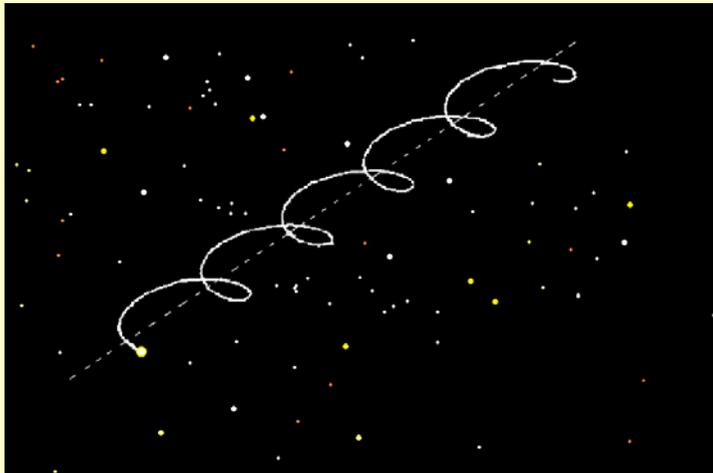
3. その他、特殊な動きをする場合:

- * 星が2つ以上、一緒になっている場合(連星)
- * 星が惑星を持つ場合(系外惑星)
- * 重力レンズ効果を受けている場合(一般相対論の効果)

一般に、年周楕円運動+固有運動(直線)



恒星は、らせん運動をする



★星の運動からなにが分かるのか？(隠された謎)

1. 見かけの年周楕円運動

→その大きさ(年周視差)から星までの距離が分かる！！



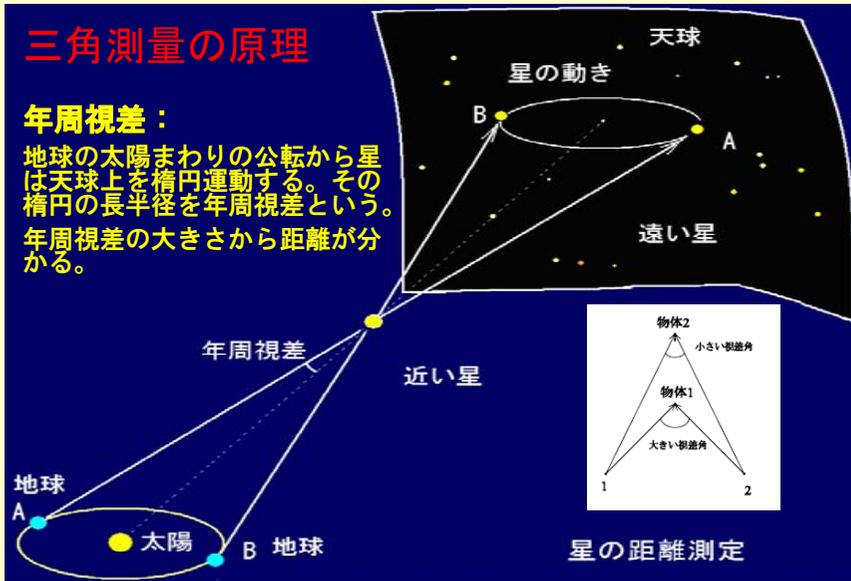
星の立体地図が描ける

— なぜ距離がわかるか？ —

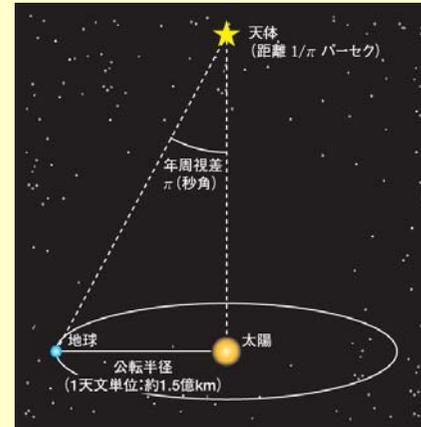
三角測量の原理

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。



距離単位の定義



年周視差が1秒角
(1度角の3600分の1)
となる天体
→ その天体までの距離を
1パーセク(pc)と定義
(parallax second)

(図は理科年表のHPより)

$1\text{pc} \approx 3.09 \times 10^{13}\text{km} \approx 2.06 \times 10^5 \text{天文単位} =$
約3.26光年 (1光年は、光の速さで1年で到達する距離)

★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なれば、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

★距離測定の困難さ

宇宙では天体までの距離は莫大な範囲に広がっている

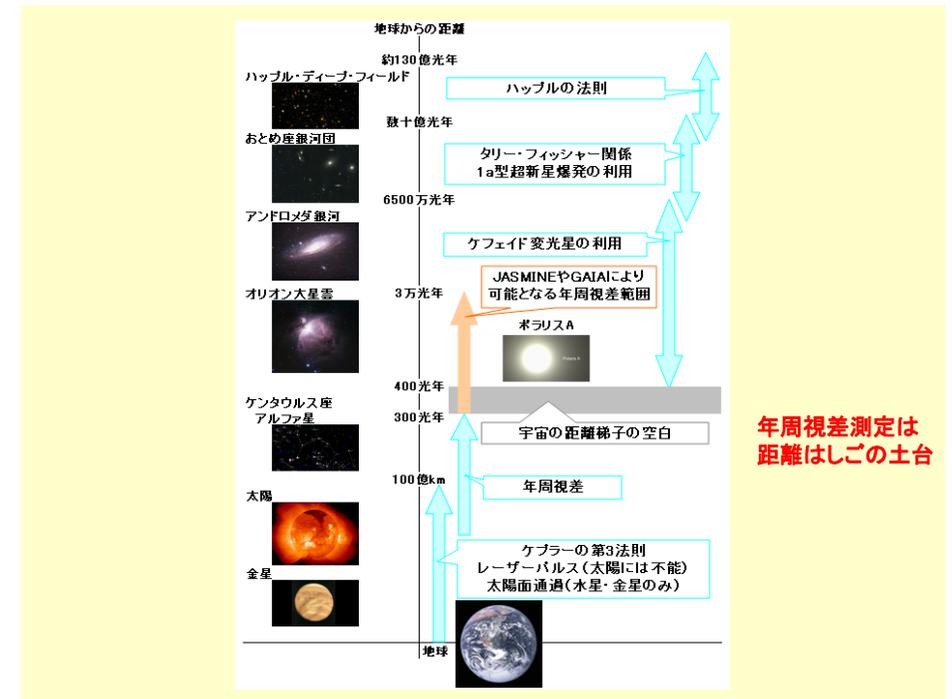
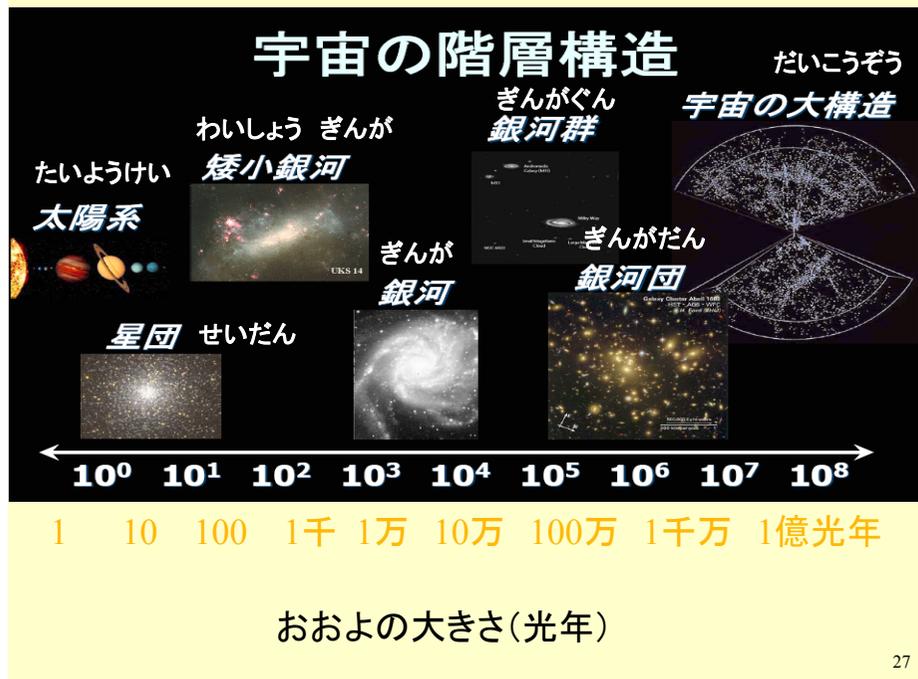
=>すべての天体に応用できる距離測定法はない。

天体までの距離とさらには天体の種類に応じて異なった方法が用いられる。

★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ubbles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。。。

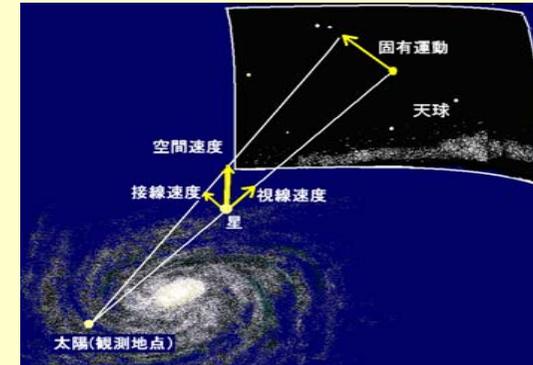
年周視差による三角測量は土台!



★星の運動(空間速度)

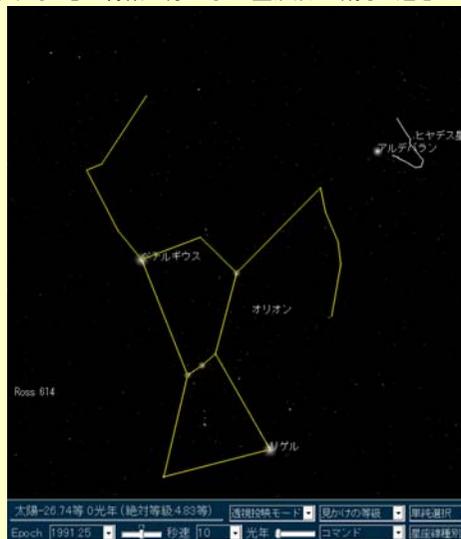
1. 固有運動 × 距離 = 接線速度 (視線方向に垂直な速度)
 + 視線方向の速度

→星の3次元的な空間速度!!



★星の空間速度から分かること:

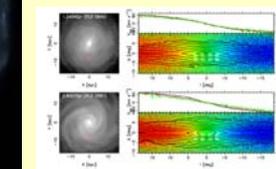
- 例 1. 過去の歴史: 星の誕生の謎解き
 過去にさかのぼったとき、同じ場所でもち合えば。。。
 →同じ星雲(ガス)から生まれた“兄弟”の星が同定される。
 →星が生まれるときの特徴が分かる →星形成の研究が進む!



2. 過去の歴史: 天の川銀河の誕生と進化の謎解き

過去にどのようにして天の川銀河が生まれ、進化してきたのか
 その痕跡が現在の星の動きや地図に残されている。

* 形成や進化のモデルが違っていると、運動の様子が異なるので、
 区別ができる。



3. 見えないものを見る！

距離→星の3次元立体地図

さらに、見えないものが“見られる”！！！！

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

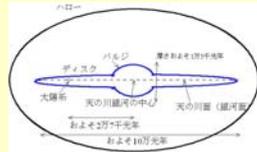
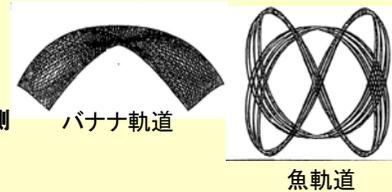
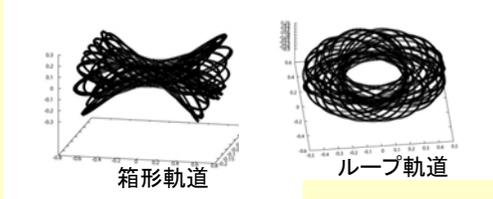


星の位置天文観測

* 3次元立体地図と

3次元速度

(天球上の位置、距離、接線速度) + 視線速度観測



4. 複雑な運動から分かる謎

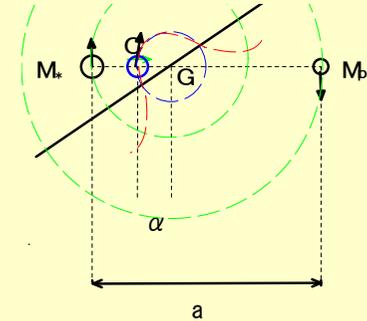
例1: 連星や系外惑星がある場合



星の周期的なふらつきが起こる



ふらつきの特徴から連星や系外惑星の質量などが予測できる

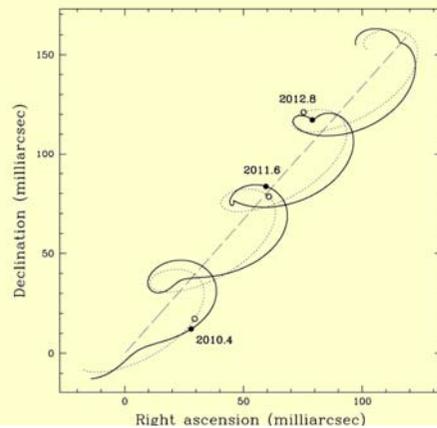


★星の動き: らせん運動からの“ずれ”に注目

距離: 50pc、固有運動: 50mas year⁻¹

M_p (惑星の質量) = 15 M_J (木星質量)、 $e=0.2$ 、 $a=0.6AU$

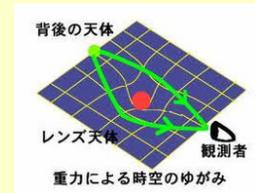
摂動の大きさは、30倍に拡大して見えやすくしている



例2: 重力レンズ効果による星の動き

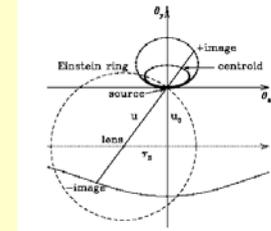
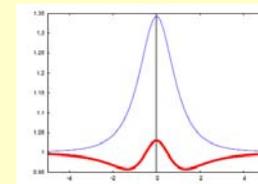
重力レンズ効果とは？

重力物質があると、一般相対論の効果(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

星の楕円運動 (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

以上のように、星の“動き”は、いろいろな宇宙の謎解きにとって重要！

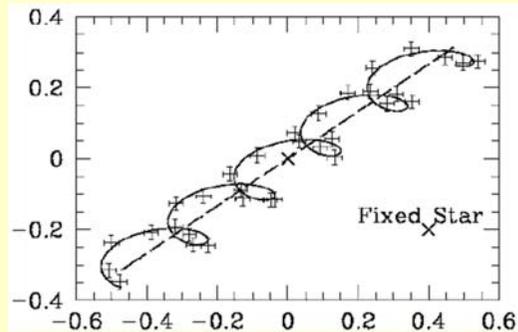


では、どうやって年周視差や固有運動を測定するのか？



天球上の星の位置とその時間的な動きを測定すれば良い。

単純！！



しかし、実際は大変！ものすごい精度での測定が必要。

例えば、実際の星の年周視差の大きさ
非常に小さい！

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。



* 1秒角は、1度角の3600分の1。
ちなみに、天の川銀河の中心にある天体だと0.00012秒角=0.12ミリ秒角
(1度角の約3000万分の1)

精密測定が必要！
いかに高精度で測定できるか



位置天文学とよばれる分野

- ★太陽系から300光年先の星の距離を正確に測定するために必要な精度：
1/1000秒角=1ミリ秒角
- ★太陽系から3万光年先の星の距離を正確に測定するため必要な精度：
10万分の1秒角=10マイクロ秒角
- *東京から見て、富士山頂に立っている人の髪の毛1本の太さの約10分の1を見込む角度

(2) 位置天文学は何をする天文学か？

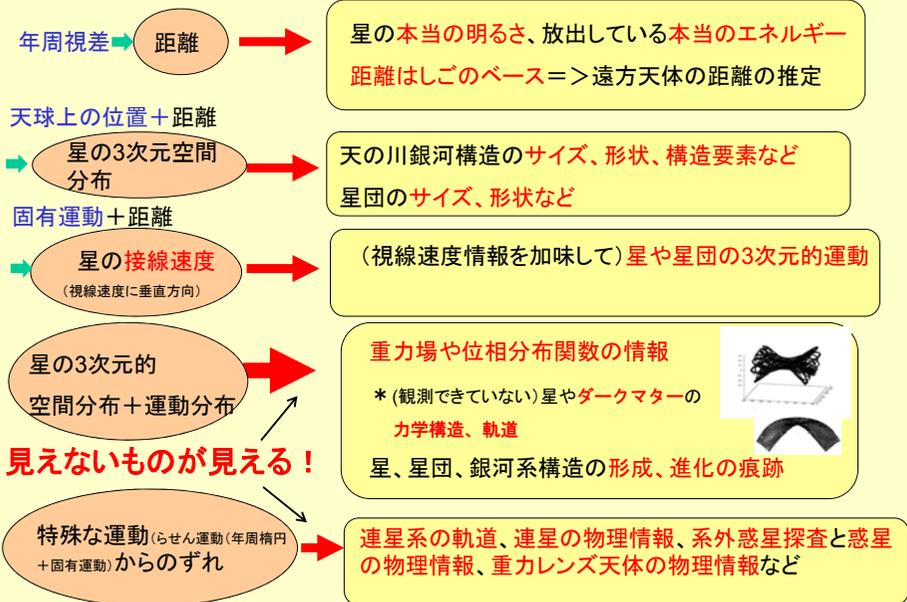
位置天文学：星の天球面上の位置とその時間変化を測定する天文学



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。

(3) 位置天文学は何の役に立つのか？



(4)位置天文学は今までどんな観測をしてきたか？ ～歴史と現状～

○天文学史上、最も古い分野

○古代エジプト

シリウスの日の出直前の出現

=>ナイル川の氾濫:1年周期の発見

○紀元前2世紀のギリシアの天文学者ヒッパルコス

春分点の移動(約45秒/年)

→ 地球の自転軸が歳差運動(コマの首振り運動)

41

○16世紀のチコ・ブラーエ(最高の眼視観測者)
惑星の運動(約1分角の位置精度)

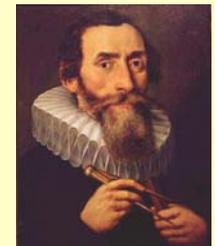
→ ケプラーの法則

→ ニュートン力学:近代物理学の誕生

チコ・ブラーエ (1546-1601)



ケプラー (1571-1630)



42

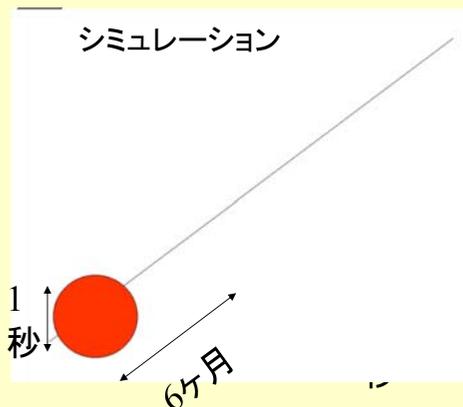
★1838年、ベッセルにより、年周視差が初めて検出される。

→ 地動説の直接証明

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

固有運動の大きな61 Cygをターゲット
→ 0.3136秒

F.W. Bessel (1784 - 1846)



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

43

★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 * 1ミリ秒角

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、レーザー源とよばれる星の周りのガスを見ている)

VERAが年周視差測定の高記録

S269(シャープレス269:星形成領域)

距離は、1万7250 ± 750光年



以上のように、歴史的に振り返っても、星の天球上の位置変動を測定することは、天文学ならびに物理学の進展におおいなる寄与をしてきた。

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)

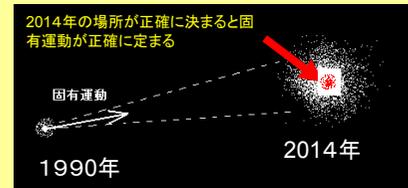
* 測定は1989年～1993年 ↓

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そろそろ新しいカタログが必要 → Nano-JASMINE

ヒッパルコスカタログと結びつけると固有運動の精度が1桁近く上がる！

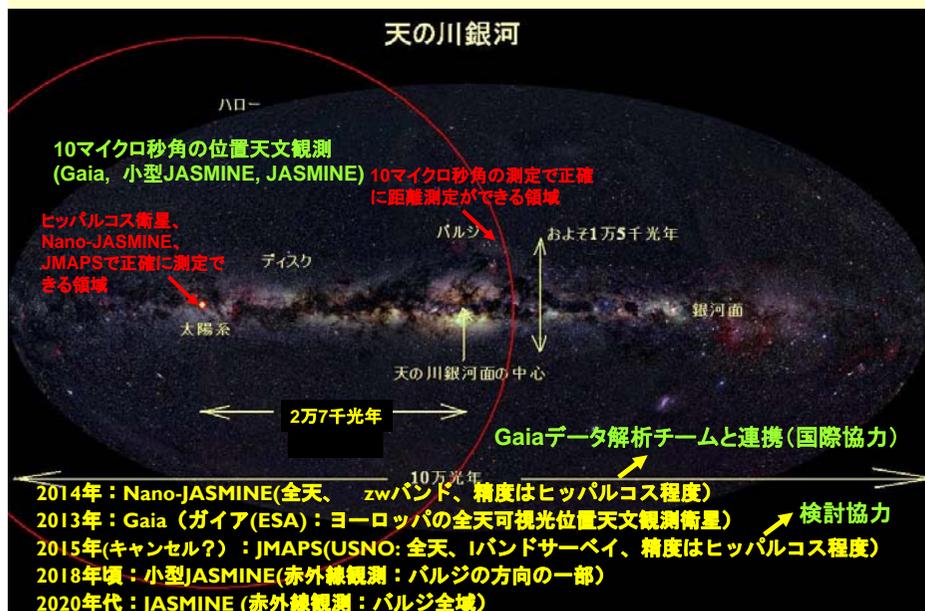
(20年の経過が有利に働く)



さらに、1ミリ秒角の精度で正確に測定できるのは、太陽系近くの300光年以内

10マイクロ秒角レベルの位置天文観測が欲しい！！

(5) 今後はどうするのか？～世界の将来計画～



★Gaia

ESAにより予算配分決定済み

- * 2013年10月に打ち上げ予定
- * 2021年に最終カタログ公開
- * 途中で何度か中間リリースも予定

可視光で全天サーベイ(20等級までの10億個)

* 望遠鏡タイプ

(大角度離れた2つの視野を同時観測)

年周視差の精度：

$$G = V - 0.0257 - 0.0924 \cdot (V-I_c) - 0.1623 \cdot (V-I_c)^2 + 0.0090 \cdot (V-I_c)^3$$

<10マイクロ秒角@G<12等級

～25 マイクロ秒角@G=15等級

～300 マイクロ秒角@G=20等級

◎Nano-JASMINEのデータ解析開発でGaiaのデータ解析チーム(DPAC)と密着した国際協力



3. Nano-JASMINE衛星について (1) 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 2014年12月

*ウクライナ製のCyclone-4ロケットを使って、ブラジルのAlcantaraから打ち上げられる予定

観測期間 2~3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：0.6~1.0μm(ミクロン))

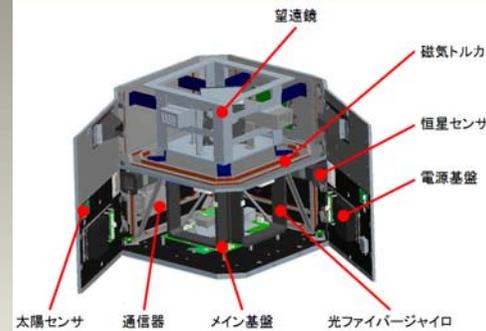


Nano-JASMINEの概観図

Nano-JASMINEはどんなもの？



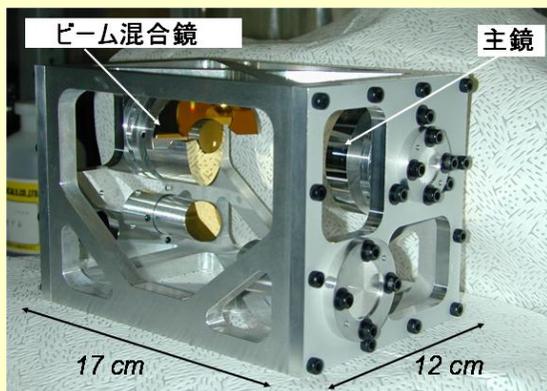
Nano-JASMINE概観図(外観)



Nano-JASMINEの概観図(内部)

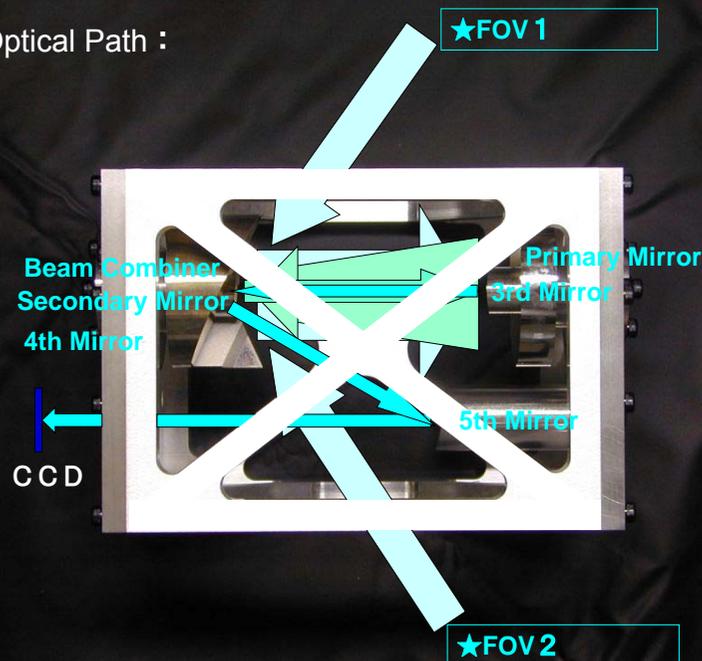
望遠鏡

リッチークレチアン式望遠鏡
主鏡5cm、合成焦点距離167cm)
全アルミ製、鏡面に金蒸着



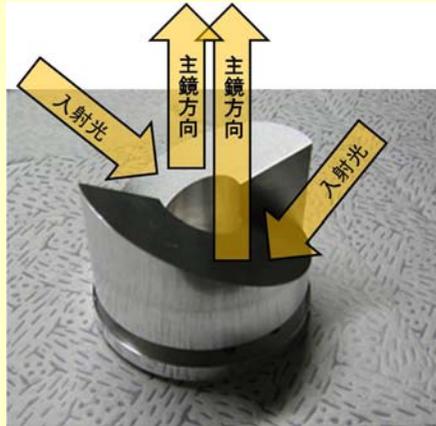
望遠鏡外観(12cm x 12cm x 17cm, 1.7kg)

Optical Path :



ビーム混合鏡

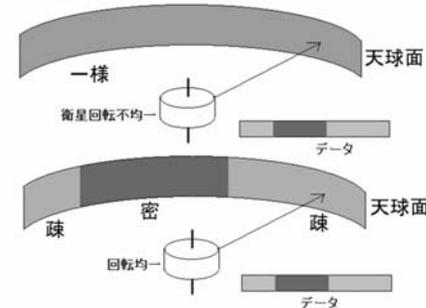
2方向からくる光を1つの望遠鏡に取り込むために設置された一定の角度をなす2枚の鏡。Nano-JASMINEでは99.5度離れた角度をなす光を取り込める。



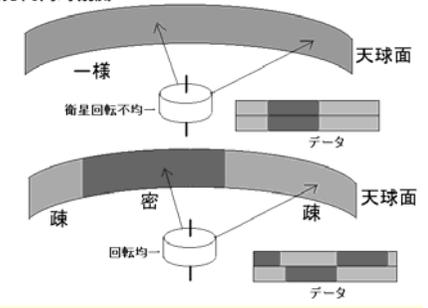
2方向を観測すると縮退が解ける

星の個数密度が不均一なデータを取得した場合、1方向のみの観測だと、星の分布が本当に不均一なのか衛星の回転が不均一なのかが区別できないが、2方向の観測だとその両者の区別が可能となる。

1方向観測



2方向同時観測



Nano-JASMINEの技術的課題は？

望遠鏡の熱安定性：

望遠鏡の構造は十分に安定に保たれる必要があり、地球周回中(~100分)で望遠鏡の温度変動が0.1度以内に抑えることが要求される。

⇒MLI(多層断熱材)とガラスエポキシを用いた断熱と熱容量の確保で実現

望遠鏡の指向安定性：

星像が流れて撮像されないようにする必要があり、740ミリ秒角/8秒で安定化されることが要求される。

⇒切り出された星像を衛星の姿勢制御系へとフィードバックする事で実現

Nano-JASMINEの技術的課題は？

Nano-JASMINEがCyclone-4の振動の環境に耐えることを検証。



Nano-JASMINE振動試験



Nano-JASMINE(熱モデル)の熱環境試験
@国立天文台先端技術センター

熱の設計が正しい事を検証
(軌道上で想定される温度まで冷却されるかなど)

Nano-JASMINEの技術的課題は？

磁場が多く残るとNano-JASMINEの姿勢に影響を与えてしまう。
衛星の残留磁場を計測し、要求値を満たしていることを確認。



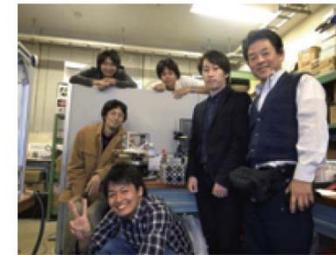
残留磁場計測試験



* 国立天文台先端技術センターの大型クリーンルーム

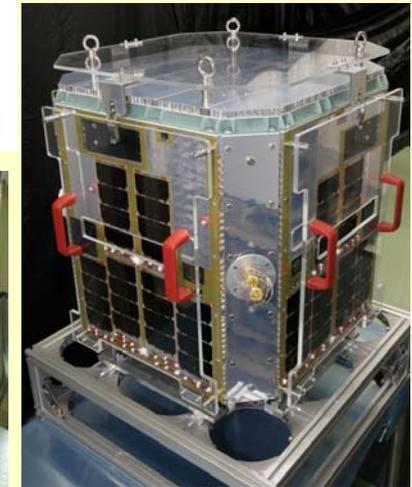
衛星アライメント計測試験

衛星搭載機器の取付方向の計測と環境試験後の変動状況の確認。



実験に成功して(国立天文台JASMINE検討室にて)

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の観測

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

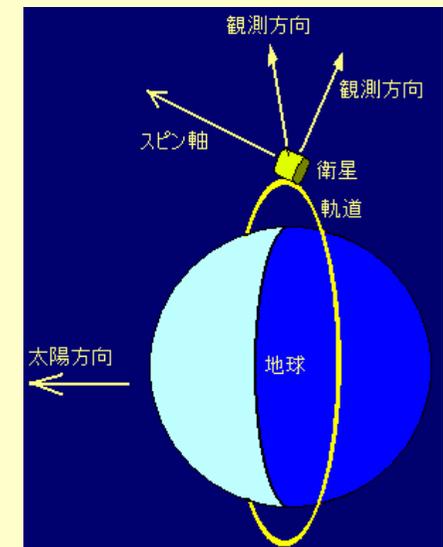
スピン軸方向：太陽から45度

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



打ち上げ

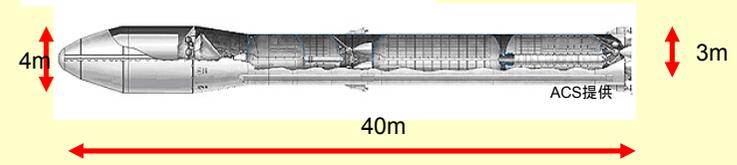
Nano-JASMINEがウクライナのサイクロン-4
ロケットを用いて2014年に
ブラジルアルカンタラ発射場から打上げ予定。



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併会社

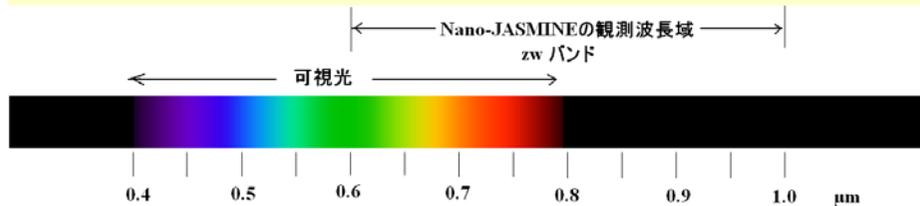
アルカンタラ射場より打ち上げられる。



(2) Nano-JASMINEは何がすごいのか？

期待される科学的成果

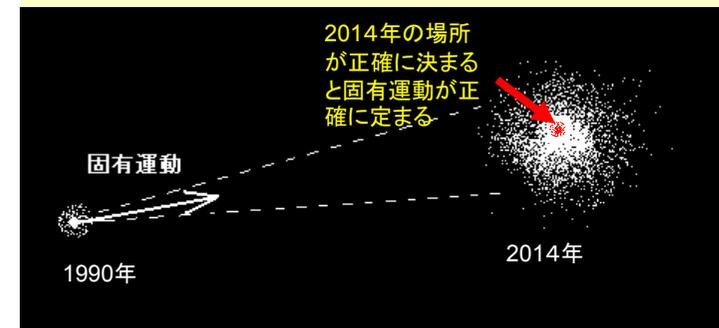
- 日本初の位置天文観測衛星 (観測精度~3ミリ秒角)
- Gaiaでは明るい星 (6等星以内) が測定できない。
これが測定できるのは、Nano-JASMINEのみ！
- zw-バンド における世界初の全天位置天文カタログ



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：**大質量星が誕生した場所の同定**（“兄弟”が分かる→星がどのように誕生するのかの謎解きが進む！）、**星団の同定と運動、太陽系近傍のダークマターの分布***、大星団までの正確な距離などなど

Gaiaが測定できない明るい星（6等星以内）は、Nano-JASMINEのみが測定可能！
=> 将来は、N-JとGaiaのデータをマージさせる予定

(*)円盤上にダークマターがどれだけあるのか？
→ダークマターの正体にも関わる。
X粒子？

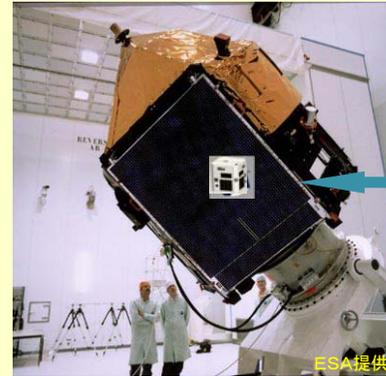


撮影：沼尻裕氏

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！



ヒッパルコス衛星 重量1.4トン



Nano-JASMINE衛星 重量36kg

* ~3ミリ秒角

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

* ヒッパルコスと合わせて

固有運動~2.3ミリ秒角/年

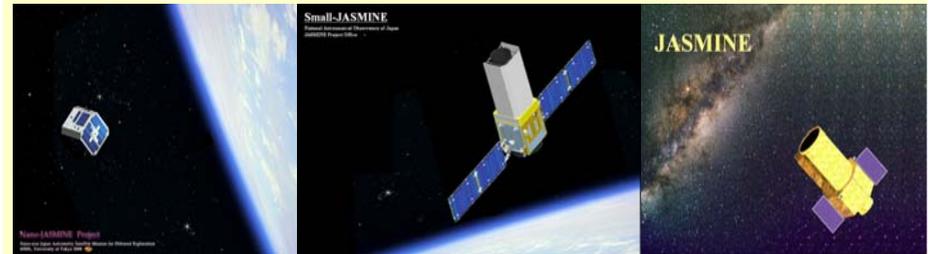
~0.1ミリ秒角/年

精度は悪化するが~9等級程度50万個の星を観測

一参考一

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銀河の謎解き



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:2014年
衛星重量:35kg

日本初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(2014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
10μas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:2018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枠に
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。

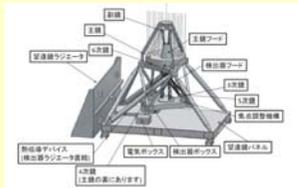
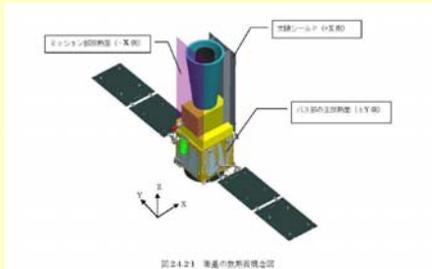
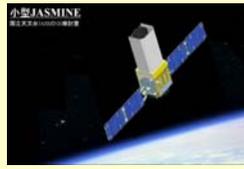
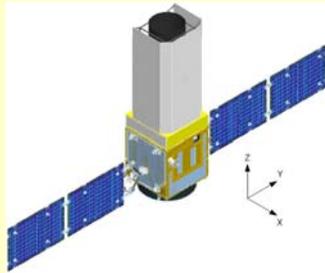
(中型) JASMINE

主鏡口径80cm級
10μas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

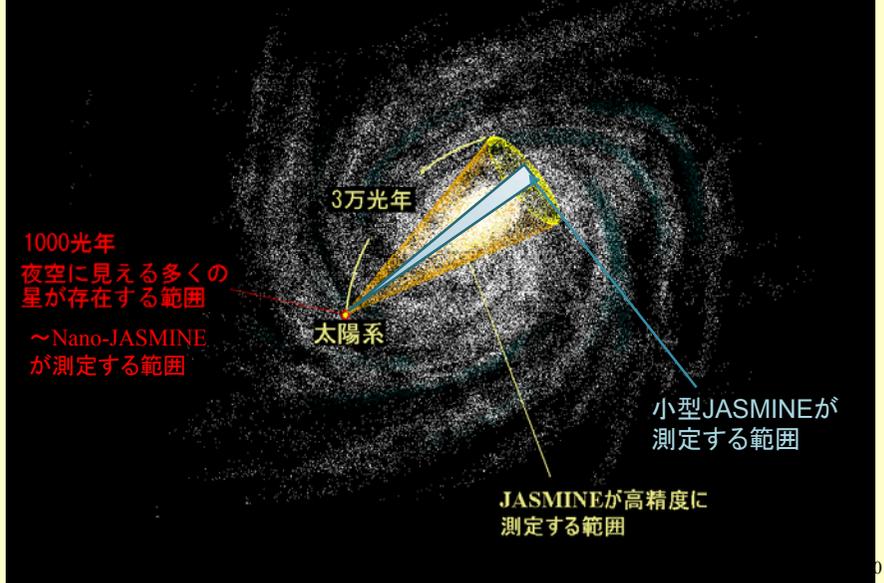
- バルジ方向の20度×10度をサーベイする。
- 小型JASMINEでの観測個数や領域が小さいことを補い、統計精度を向上
- 全面的な国際協力も視野

★小型JASMINE衛星

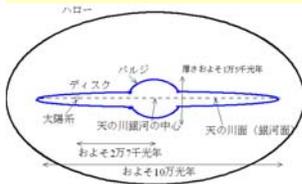


光学系	コルシユ系(3枚鏡)
望遠鏡素材	合成石英
主鏡口径	約30cm
焦点距離	3.86m
視野	0.6° × 0.6°
検出器	HgCdTe
検出器サイズ	4.1cm × 4.1cm(4K × 4K)
ピクセルサイズ	10 μm
ピクセルon sky	535 mas
検出器個数	1
星の色情報用測光用検出器(J,Hバンド用を1個ずつ)	

天の川銀河



★天の川銀河の謎解き



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。



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?

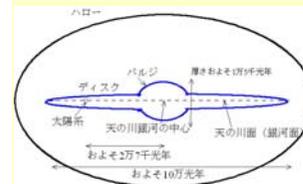
★特に小型JASMINE、(中型)JASMINEは。。。

赤外線 →

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

(塵に覆われて可視光では観測しにくい)



○バルジの力学構造 → ダークマターの軌道、分布

○バルジの構造形成史

○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

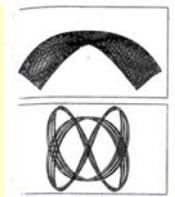
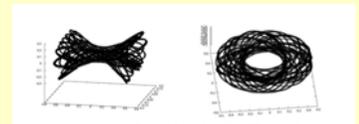
○円盤の渦巻きの起源

○白鳥座X-1ブラックホールの特徴

○系外惑星探査

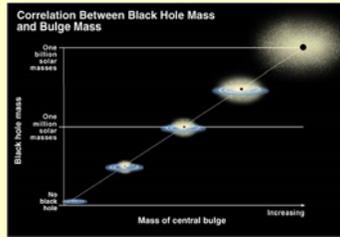
○ワームホール探査(?!)

などなど。。。



★小型ASMINEで狙うサイエンス例

巨大ブラックホールと銀河との共進化

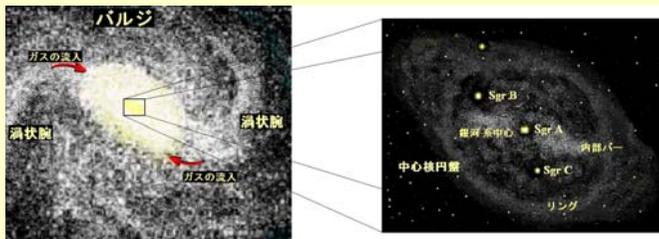


巨大BHの質量～バルジの質量/2000

巨大BHとバルジの進化は関係がある

小、中BHの合体か、ガスや星の降着か??

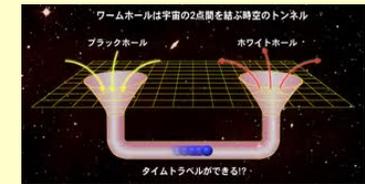
合体があった場合、周りの星の速度分布に影響→その痕跡が残っているはず



73

73

ワームホール探査!?

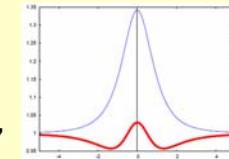


重力レンズ効果で

背後にある星の光が一時的に増光と“減光”

重力レンズ効果で

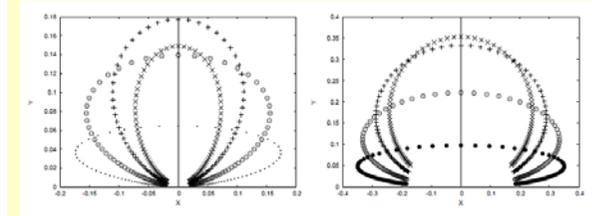
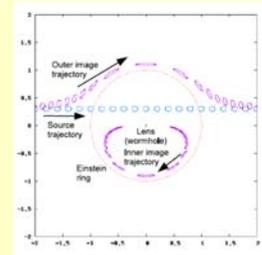
背後にある星が“楕円ではない運動”



赤:ワームホールの場合
青:ブラックホールの場合

ワームホールの場合

ブラックホールの場合



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?

天の川銀河内の星の3次元地図&運動を得る

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)

75

天の川銀河:多くの銀河の中の1つに過ぎないが。。

唯一、詳細かつ精密に観測ができる銀河!!
典型的な銀河(特異ではなさそう)

天の川銀河、大変良い“実験場”

天の川銀河の研究成果は、他の銀河の形成、進化、
天体現象の解明への大きなヒントを与える

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や
 天の川の神秘、様々な天体の謎が
 解き明かされていく。

超小型衛星、小型科学衛星:比較的小さいが。。。
 汎用性はないが、得意な観測を専門的、集中的に
 比較的短時間で安価なコストで行うことが可能。
 →大きくなくても世界に先駆け、画期的な成果を
 出せる! アイデア勝負!!

6. JASMINEにおけるデータ解析

★ 目標精度達成のための手段:技術開発とデータ解析

◎小型JASMINEだとヒッパルコスより2桁の精度向上。どうすれば、それが可能になるか?

注意:
 ここでいう精度は、誤差分散。
 推定値と真の値の差は
 問題にしない。
 “真の答え”が分かっている他の
 天体との“比”だけが問題。

★目標精度10μ秒角:

東京から見て、富士山頂にいる人の
 髪の毛の太さの1/10を見込む角度

○星の光子数を増やす(大きな望遠鏡、高感度の検出器など)

→ランダム誤差の減少

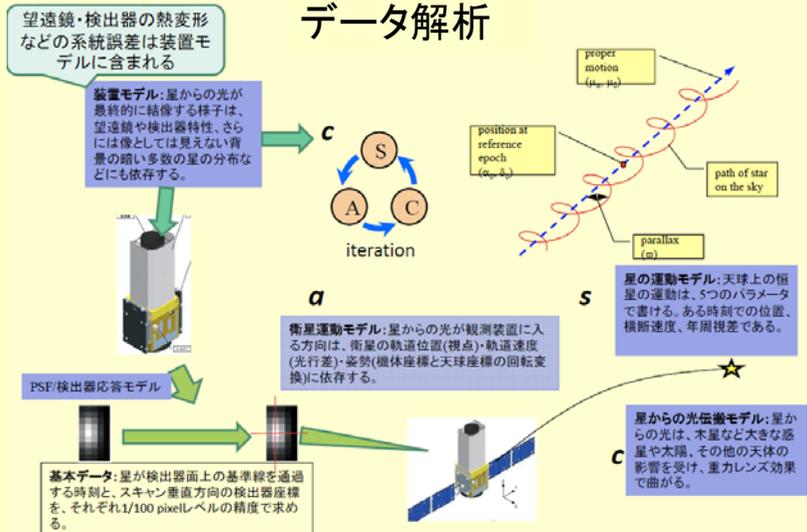
○衛星や望遠鏡の安定性

→系統誤差の“制御”

そして、重要なのが、系統誤差の“推定”

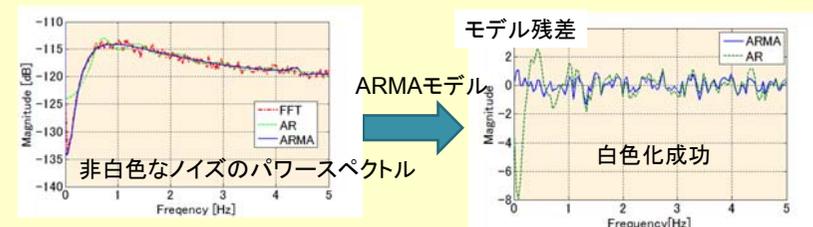
$$\sigma \sim \lambda / (D\sqrt{N})$$

データ解析



非白色ノイズの対応(NJの例)

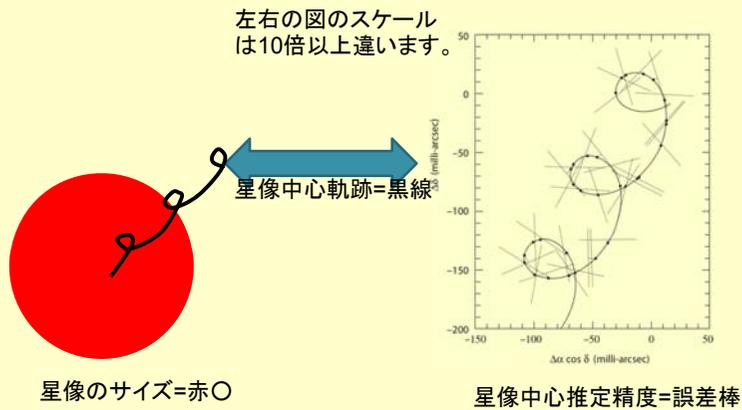
伊藤まゆ美さん(足立研)の修論より



衛星の姿勢制御など、制御由来の誤差は、相関を持つ場合が多く、どのような相関があるかあらかじめ分からない。

従来位置天文で研究されている最小二乗の研究における、相関行列既知の仮定は成立していない。

実態は...



★観測手法

Hipparcos, Gaia, Nano-JASMINE

小型JASMINE

位置天文パラメータ (絶対年周視差, 固有運動)

全天サーベイ

局所的サーベイ(bulge)

部分的に星の個数は少数

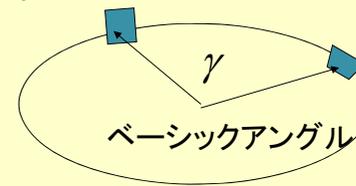
星の個数は多数

Great circle reduction

同一天体を多数回観測可能

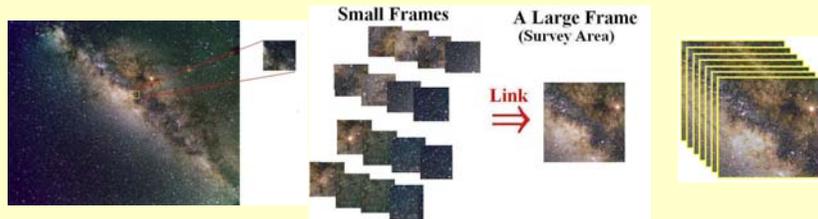
Spherical reconstruction

フレーム連結法



小型JASMINE: バルジ方向(中心付近)の通常観測モード

- Stage 1: 7秒間撮像。同じ視野に対して、16回繰り返す。その16枚のフレームのセットを小フレームとよぶ。
- Stage 2: 望遠鏡の向きをすこし移動。前の視野と半分程度重なる視野に対して、Stage 1と同様にして、小フレームを作成。この作業を、約45分間行うことで、全観測領域を16枚の小フレームで覆うことができる。こうしてできた全領域のフレームを大フレームとよぶ。
- Stage 3: 作業2までのプロセスをミッション期間中、繰り返す。最終的には、約1万枚の大フレームが作成される。この大フレーム上の星の軌跡から、年周視差、固有運動を求める。
- この際、大フレーム毎のサイズ変動、distortionの変動は、較正天体(VERA、Gaiaなどで測定された天体)を用いて同時に解く。



★目標精度達成のための誤差対策

一般: 除去、制御、測定、推定

小型JASMINE: 1回の観測では達成できない高精度をミッション期間をかけて、

同一天体の多数回観測による統計処理で実現

ランダム誤差: フォトンノイズは、ミッション期間に渡るフォトンの集積で減少

系統誤差:

○局所的誤差 (光学系や検出器による星像の形状に関わるもの)

* 星像中心決定アルゴリズムにより系統誤差も推定し、中心位置決定誤差の低減化が可能 (アルゴリズムとしては、重心法、または主成分分析を取り入れたPSF fitting法)

○大域的誤差 (光学系distortion、検出器のピクセルむら、観測装置の時間変動など)

* 同一天体を短時間で高頻度に観測

=> 星の相対距離が短時間では不変と見なせることを “自然の校正装置(動かないものさし)”として、

系統誤差(装置等の時間的、空間的変動など)を推定。

さらに、多数の星が利用できることにより精度が向上。

また、多数回観測による一部系統誤差のランダム化

* ただし、推定が困難な場合のみ、一部制御は必要

=> criticalな要求2点: 指向安定性(370mas/7秒)、温度安定性(~1K/45分)

推定方法

動かない基準(ものさし)を使う

短時間で星は動かない。星間の角距離が“不変”
不変性を利用し、観測装置歪み量補正
(基準は観測装置ではなく天空にある)

測定された星間の距離変化 = 観測装置から発生する系統誤差 + ランダム誤差

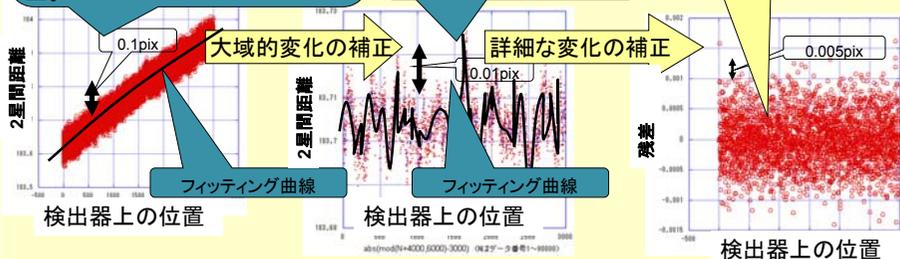
相関性を見つけて補正

検出器上の位置に伴う系統誤差の補正

① 検出器上の位置に応じて変化する、2星間距離の大域的变化をフィッティングする。検出器上の場所に、ほぼよいように補正。

② 大域的補正後、ピクセルレベルスケールでの2星間距離の変化(系統誤差)をフィッティングし、補正する。

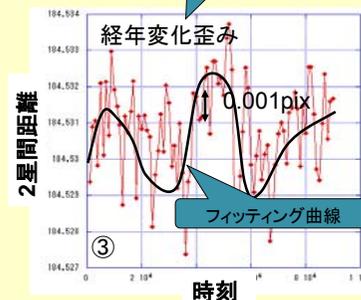
無相関化
⇒ 枚数に応じて誤差低減



時間に伴う系統誤差の補正

③ 経年変化

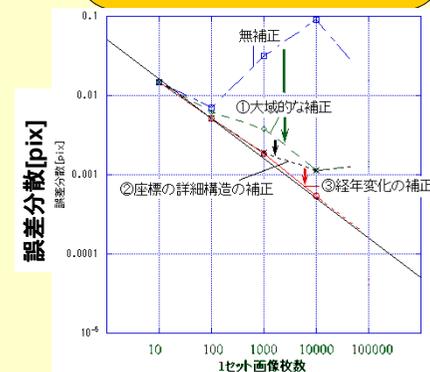
フィッティングを行い、時間変動にともなう誤差を補正



実証実験結果

①②座標に伴う系統誤差

③時間に伴う系統誤差
以上補正後、
枚数に応じての誤差結果



課題点:

- 枚数を重ねていったとき、うまく \sqrt{N} 則で誤差が減少してくるか?
- できるだけ(実際に)無相関になっていることをどう示すか?
- 系統誤差を間違えて引きすぎていないか?(オーバーフィッティング問題)



位置天文学: 制御による系統誤差の抑制
系統誤差の“推定”による除去とその検証
(統計学の方法をうまく用いることも重要)

ありがとうございました。
今後もしもご支援、ご協力をお願いします。

この発表資料は、<http://www2.jasmine-galaxy.org/~gouda/Gouda-130422.ppt>にあります

Jasmine

