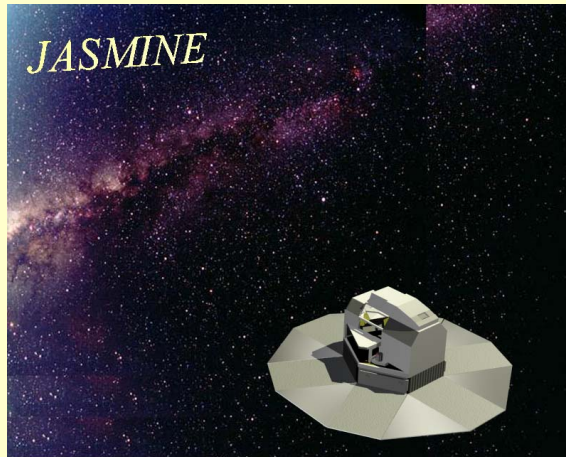


JASMINE (赤外線位置天文観測衛星) 計画について

郷田直輝 (国立天文台)

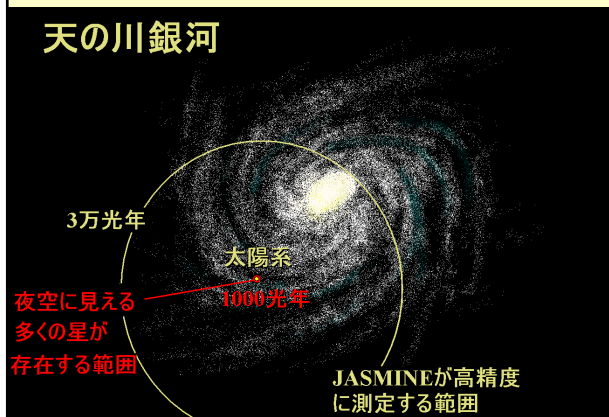


1

§ 1. JASMINEのミッション概要

観測: 近赤外線 (z-band: $0.9 \mu\text{m}$ 付近) によるアストロメトリ (位置天文) 観測を衛星を用いて行う。

精度: 星の位置、年周視差、1年当たりの固有運動を約10万分の1秒角の高精度で測定 ($z < 14\text{mag}$)



年周視差の誤差は10%以内が必要！
それ以上だとバイアス効果が入り距離評価が困難

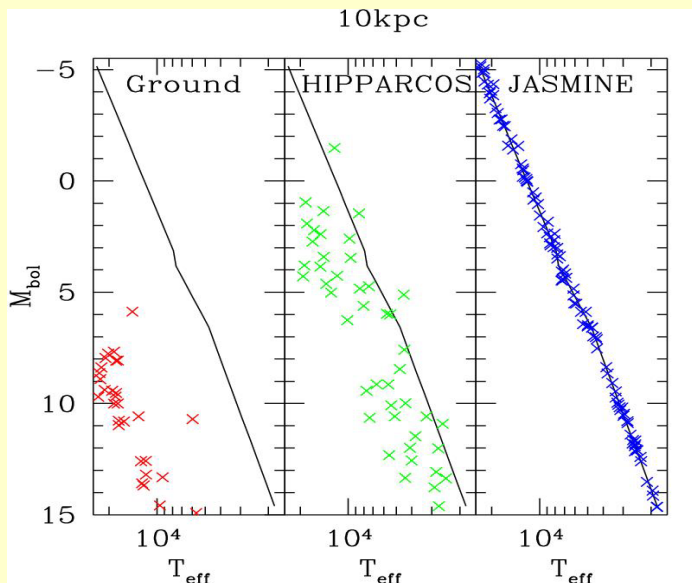
バルジ (10kpc \Rightarrow 100 μ 秒角)
誤差10 μ 秒角必要



2

主系列星のHR図の再現 (年周視差 → 距離 → 絶対等級)

*仮に、太陽から10kpcの地点に主系列星が置かれていた場合



3

観測対象: 銀河面、バルジなど天の川面上の天体を
サーベイ

可視光観測 (GAIA, SIM等) に比べて近赤
外線観測が有利!

→ 詳細はポスター発表参照 (辻本)

サイエンス: 天文学の基本情報をカタログとして
提供。様々な分野に関連。

銀河系の構造と形成史、恒星進化論、
星形成、惑星系形成、距離指標、
重力レンズ、相対論の検証、等

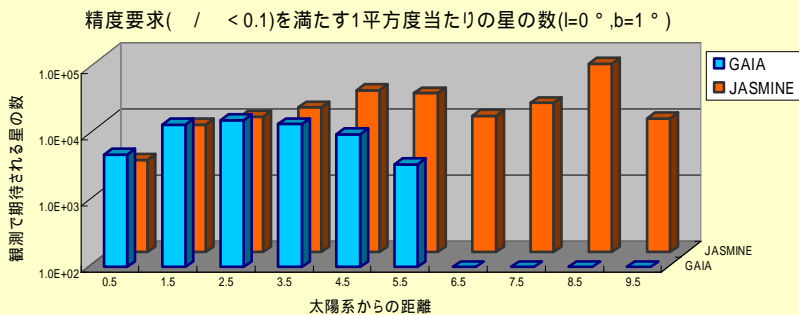
4

計画	機関	装置	打ち上げ予定	星の観測数 (個)	限界等級	精度
Hipparcos	ESA	望遠鏡	1989	120000	12	1mas@V=10
SIM	NASA	干渉計	~ 2009	1万	20	4 μ as@V=20
GAIA	ESA	望遠鏡	~ 2012	10億 (全天)	20	10 μ as@V=15
OBSS	USNO	望遠鏡	~ 2015	10億	20	10 μ as@V=14
JASMINE	日本	望遠鏡	~ 2015	1億 (銀河面)	z=17	10 μ as@z=14
cf.地上 VERA	日本	電波干渉計	運用開始	メーザー源を1000個		10 μ as

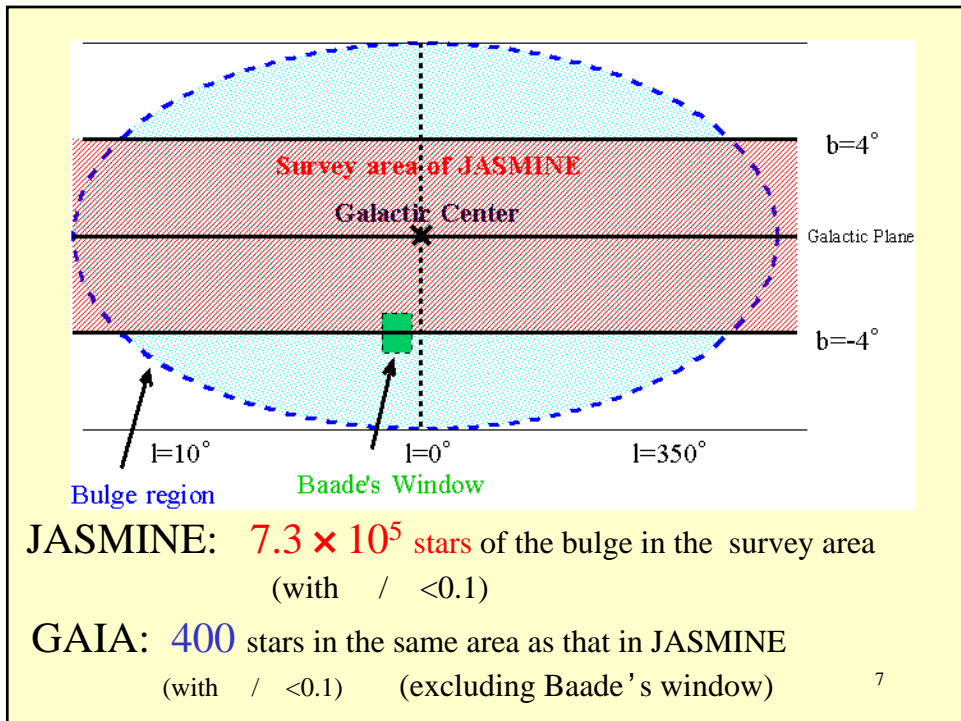
Remark: 欧米の計画はすべて可視光

5

(iii) GAIAとの相補性



6



VERAとの関係

VERAは世界で初の10 μ 秒角での
天体位置測定をまもなく実現する予定。
銀河系中心までの距離や、太陽系での銀河回
転速度の測定など、銀河系の基本定数を高精度
で決定

大いに期待される

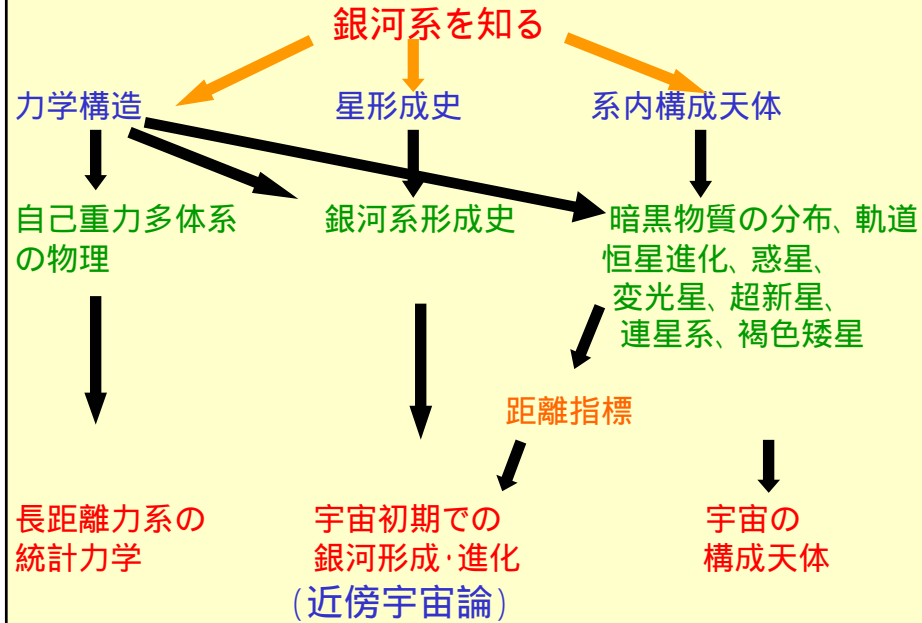
ただし、メーザー源の1000個程度に対象は
限定。星自体の位置測定でもない。

JASMINEでは、数千万個の星自体を
高精度で測定。

日本の計画として、VERAに

→ 引き続き、銀河面の高精度サーベイを行い、
天の川銀河の解明をより完成させる。

§ 2.JASMINEが狙うサイエンスの概要:天体の距離、運動情報



9

銀河系の解明のためには、

Photometry (測光), Spectroscopy (分光) による
明るさ、色、元素量、視線速度の情報に加えて

天体までの距離 → 年周視差
速度 → 横断速度
 → その角速度 (固有運動)

↓

高精度なAstrometric eyeが必要
(Astrometry:天球上の星の位置、固有運動、
年周視差)

10

JASMINEで拓けるサイエンスの例

天の川銀河の力学構造(本当の“姿”)

・バルジ、ディスク

・渦巻きの正体、ディスクの湾曲の原因, ...

大規模な自己重力多体系の物理法則解明

天の川銀河の形成・進化の“化石”を探る

・銀河形成史 → 銀河形成

恒星進化論: H-R図

星形成

重力レンズ効果

系外惑星

基礎物理(一般相対論の検証)

予想外の発見

11

1. 天の川銀河(銀河系)の力学構造

バルジ、ディスク(thin&thick disk)の力学構造

(形状、密度分布、星の運動、重力ポテンシャル)は？

- * 太陽系以上の自己重力多体系の定常状態が、現実になどなっているか、まだ分かっていない。
- * 銀河系は他の銀河にみられる構造成分をすべてもっており、しかも精密に観測できる良い研究対象。
- * 構造の解明は、形成史の解明に結びつく。

12

より具体的な例として.....

バルジの特徴はディスクともハローとも異なる。

バー構造の詳細は？形成史は？

ディスクとの関連は？

thick diskの構造と形成原因は？

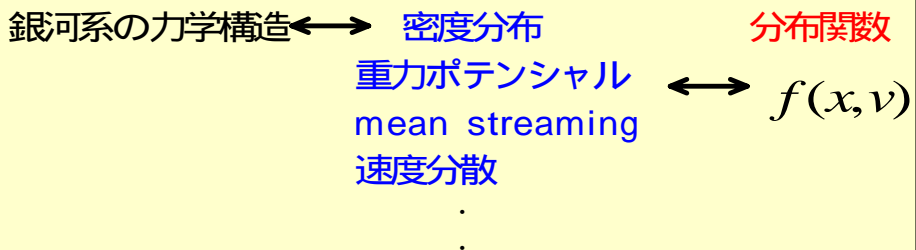
スパイラルアームは本当に密度波か？

warpの構造とその原因は？

13

2. 銀河系の力学構造構築

高精度アストロメトリ観測



14

観測データ → どうやって、何が分かるのか？

*位置と速度だけでは、ポテンシャルは直接分からない

*観測は、一部の星のみ。本当はすべての重力物質の情報が必要

良いデータが出てくればくるほど、きちんと考えておかななくては行けない

15

解析方法

モデルを仮定 ↔ template ↔ 観測データ

統計的解析

↑
様々なモデルを試行

↓
観測からどうやって分かるか？

もし、sample数が無限なら言うことはなし
sample数は“有限”

→ それを反映する（背後にある）力学構造
（分布関数、重力ポテンシャル）は何か？

統計的解析方法の検討

モデルの構築

トラス構築法 & 軌道の重み因子計算法

=> 上田氏の発表参照

16

3. 恒星進化論

年周視差 → 距離 → 様々なタイプの星
の本当の明るさ
(絶対等級)



星の進化モデルとの比較からモデルの
評価

* H-R図が精度良く書ける

17

4. 星の形成

例えば、

星の初期質量関数

どのぐらいの質量の星がどのような割合で生まれた
か？

* 現在では、不十分な情報



距離が分かる



同じ星団(同じ時にほぼ
誕生)に帰属してるか
どうか分かる。

運動

フィールドにある星の昔の星団を

→ 同定

= > 西氏の発表参照

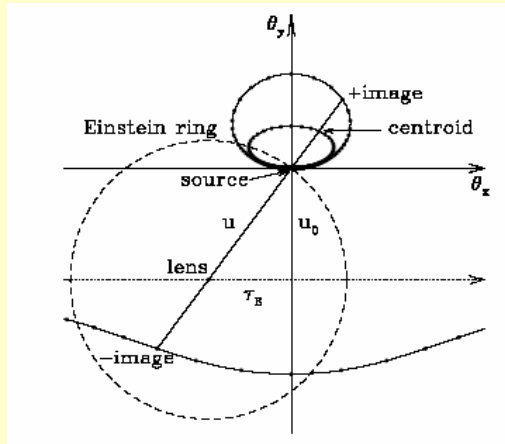
18

5.重力レンズ

重力レンズ効果

背後星の増光(光度曲線)

背後星の光中心の楕円運動(astrometric microlensing)



19

* レンズ天体の物理量:

レンズ質量、レンズまでの距離、視線に対する最近接距離、レンズと背後星の相対速度の4つ。

従来の光度曲線の情報のみならば、解けるのは2つのみ。
しかし、astrometric microlensingの情報を加味すると
4つとも解ける。

→ レンズ天体の物理量、分布により、星の情報とは
独立に力学構造が解析可能

20

6. アstrometry観測による惑星探査

Reflex motionによるずれ

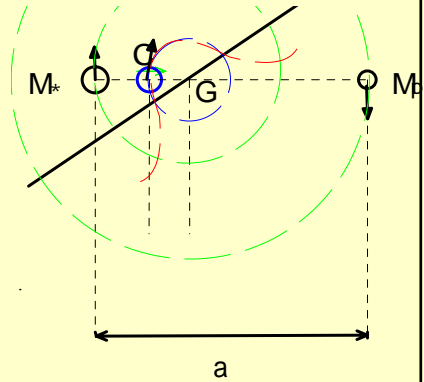
θ : angular semi-major axis (as)

M_p : planet mass

M^* : parent star mass

d : 太陽系からの距離(pc)

a : M_p と M^* の間の距離(AU)



($M_p \ll M^*$, $L_p \ll L^*$ を仮定)

$$\theta = \frac{M_p a}{M^* d}$$

$M^* = 1 M_{\text{SUN}}$, $M_p = M_J = 0.001 M_{\text{SUN}}$,

$a = 5 \text{ AU}$, $d = 100 \text{ pc}$ ---- $\theta = 50 \mu \text{ as}$

高精度アstrometry観測が必要

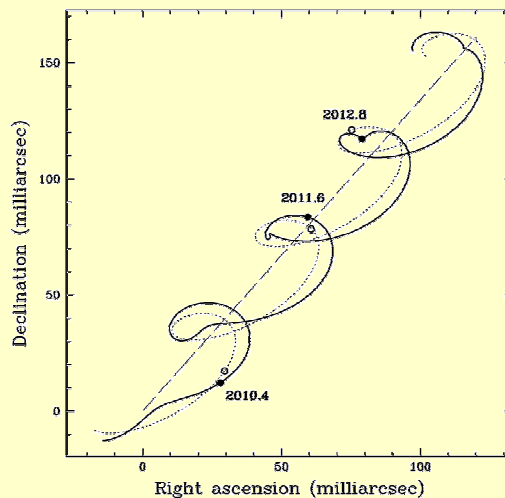
21

星の動き

距離: 50 pc, 固有運動: 50 mas year⁻¹

$M_p = 15 M_J$, $e = 0.2$, $a = 0.6 \text{ AU}$

摂動の大きさは、30倍に拡大して見えやすくしている



22

例 10 μ 精度での惑星探査

Jupiter mass planet

- - - > ~ 200 pcまで検出可能

Sun-Jupiter systemで100pcの距離

(50 μ asのdisplacement)

$\sim 10,000$ 個のsystemが期待 (太陽型の主星が4-5%
の確率で木星型惑星を持つと仮定)

--- > 統計的研究へ

23

§ 3 JASMINE計画について

2つのバージョン + 超小型衛星によるデモ

I. JASMINE(オリジナル) \longrightarrow 天の川全面($360^\circ \times 8^\circ$)

主鏡口径 ~ 1.5 m 衛星重量1トン以上。

H-IIAのdual launchのフェアリングサイズを想定

II. JASMINE-light \longrightarrow バルジ領域のみのサーベイ

($30^\circ \times 20^\circ$)

主鏡口径 < 1 m 衛星重量1トン未満

M-Vクラスのフェアリングサイズを想定

III. Nano-JASMINE \longrightarrow 任意の領域 (精度は1mas程度)

主鏡口径 ~ 5 cm 衛星重量10kg

2008年打ち上げ (目標)

24

(1)目標達成に必要な光子数の確保

光子数リミット(理想的な場合)

→ 必要条件

$$\sigma \sim \lambda / (D\sqrt{N}) \quad N: \text{星の光子数}$$

大きな N が必要

なるべく大口径の鏡

→ ~ 1.5m

素材は、高強度、低膨張率、高熱伝導、軽量、低コストなどの条件。
現在、トレードオフ中

* 東芝が開発している高強度反応焼結型SiCも有力候補
地球観測望遠鏡 (EORC/JAXA) 等でも開発中

通常の反応焼結SiCより、強度を飛躍的に上げること成功

焼結温度が低く、焼結収縮が1%程度と小さい

~ 3g/cc

CVD処理することなく研磨だけで鏡面として使用可能

65cmの平面鏡焼き上げに成功

27

高感度CCD、大きな視野 → 多くの検出器を並べる

* z-bandに高感度な新タイプのCCD検出器

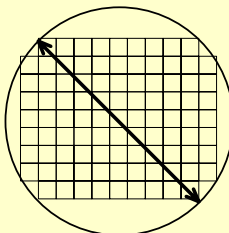
(裏面照射完全空乏型)の開発(すばる望遠鏡、HOPでも
使用): 浜フォトとの協力で順調に進んでいる

現在までに、量子効率 >70% @ $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 達成

電荷転送効率改善 >0.999995

2k x 4kプロセスへ着手

* LBNLをしのぐ世界的開発成果



配列技術の開発 *約100個並べる

すばる望遠鏡のHyper Suprime-Cam,
HOPの超広視野カメラとも共通

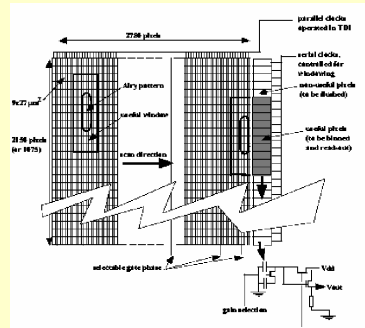
28

* 連続スキャン観測が可能 → TDIモードの稼働

CCDの電荷転送速度

同期化

衛星のスピンの回転速度



* 良い星像、広視野、長焦点距離 → 光学系の工夫 (3枚鏡を用いる独自の設計案完成)

* 星像中心決定のアルゴリズム

(重心法: 現在、実際のCCDを用いて実験中)

静止画像に関しては、1画素の1/300の精度達成!

TDIモード稼働の場合の実験を実行中)

29

(2) パラメータ導出時の誤差要因の排除

位置天文パラメータの導出過程

ヒッパルコス、GAIA

(i) CCD検出器上での星像中心の決定



(ii) 視野の (短時間での) 連結 ←→ 大円解析

(iii) 連結されたセットの

組み合わせでパラメータを ←→ 球面構築導出

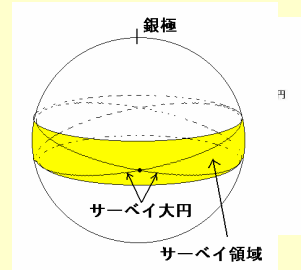
30

JASMINE:大円解析 & 球面構築法を採用した場合

観測手法

衛星の自転に伴い、連続的に
スキャンする。

- * 衛星は、約5時間で大円を1周。スピン軸は、銀極の周りを約37日で1周(歳差周期)



(i)1検出器上での星像中心決定 (~3秒)

星1個の観測精度:440マイクロ秒角

(ii)1視野での星像位置決定

170マイクロ秒角

(iii)大円解析 (~10時間)

57マイクロ秒角

(iv)球面構築

10マイクロ秒角



31

(iii)大円解析

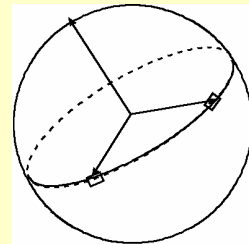
スキャン方向の星の相対位置と望遠鏡の向きの同時解析

* 従来の衛星上の望遠鏡の指向決定:

恒星センサーによる恒星カタログとの比較



JASMINEの場合は、その恒星カタログの精度向上を行わなくてはならない。自分自身で、星の位置とともに、望遠鏡の指向も決定する必要がある。



星の相対位置と望遠鏡の向きを同時に解析可能にする

→ 大角度離れた視野の同時観測

(大円2周分のデータ)

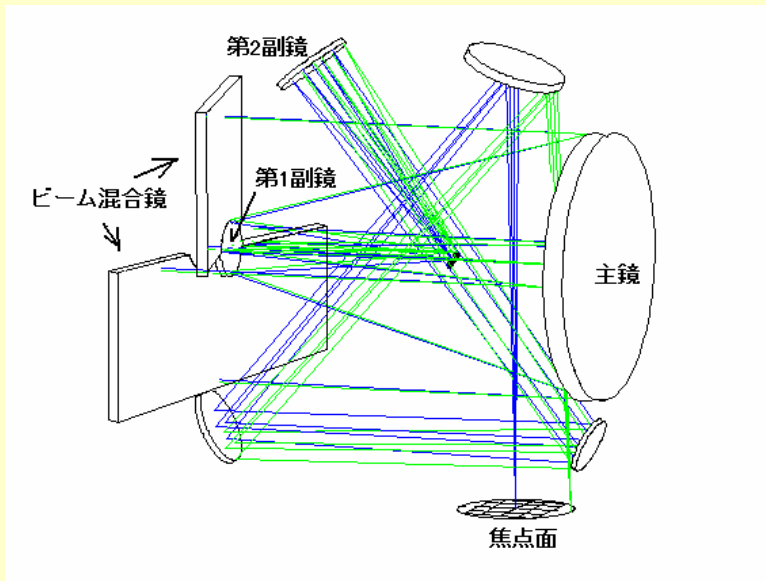
→ ビーム混合鏡の導入



この段階での位置精度は、57マイクロ秒角

32

(設計: 矢野)



位置天文パラメータ導出過程での誤差要因
観測装置や衛星の向きなどの長時間変動はモデル化により解析可能。

しかし、モデル化により解けない場合がある
(3秒~10時間の変動:大円解析まで)

- (1) 検出器上での星像中心決定の際の
望遠鏡の指向のずれ(望遠鏡の指向安定度)
- (2) スピン軸のずれにより、スキャン方向とCCD検出器の転送方向が一致せず、星像がずれていくこと(スピン軸の安定度)
- (3) 衛星の自転2周分以内の時間範囲でのビーム混合鏡のなす角度(ベーシックアングルに相当)の変動(熱変動の抑制) → 変動を高精度でモニター

レーザー干渉計によるベーシックアングルの 高精度変動モニターの開発

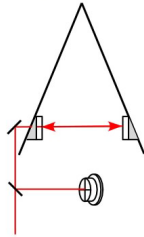
*国立天文台重力波プロジェクト推進室の新井氏
との共同:重力波観測装置での実績、実証

→ ポスター発表参照(丹羽)

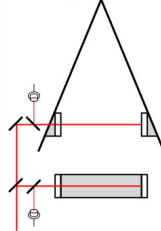
現在提案している方法

● Wave Front Sensing

混合鏡にFP共振器を構成して
その相対角度をWFSで測定



Length Sensing

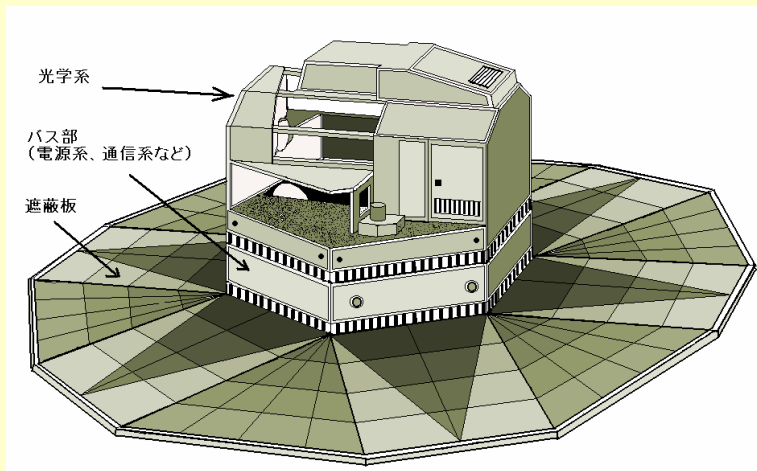


WFS法:共振器に曲率半径の大きい球面鏡を使用する工夫により、2つの平面鏡の相対角度の変動を増幅して感知できる(オリジナルなアイデア)



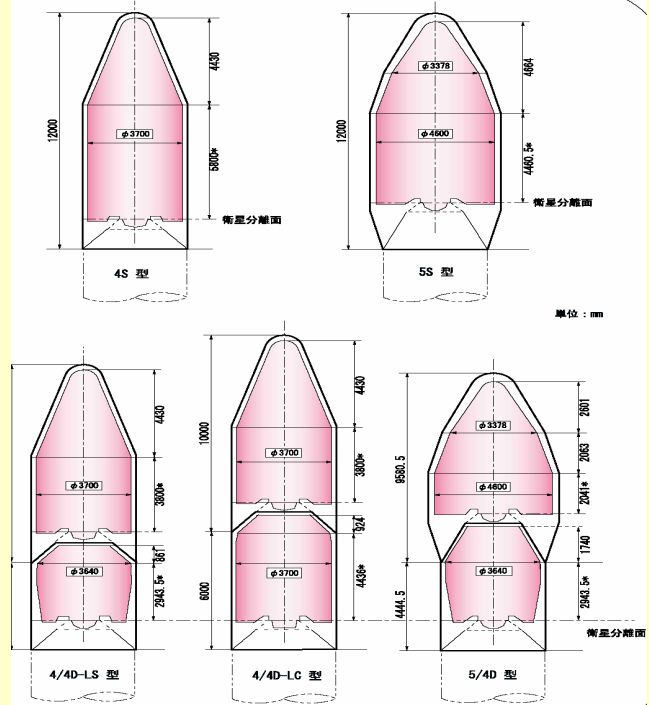
* 共振器のロック成功!
* WFSの信号取得に成功
(相対角度の変動のみに大きな信号)

35

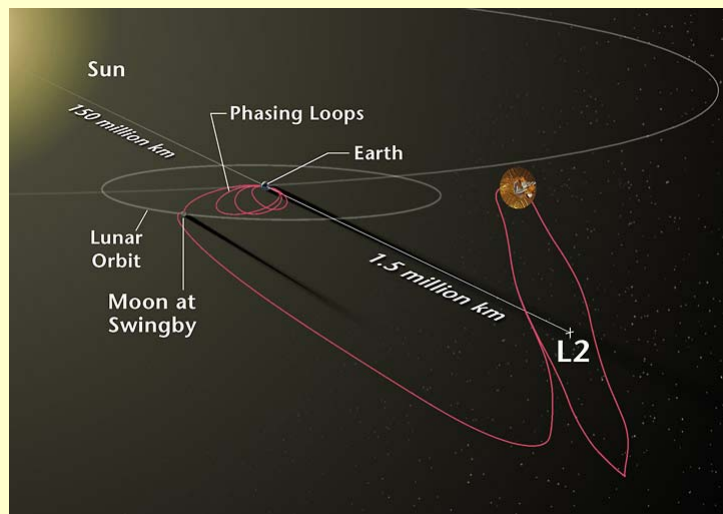


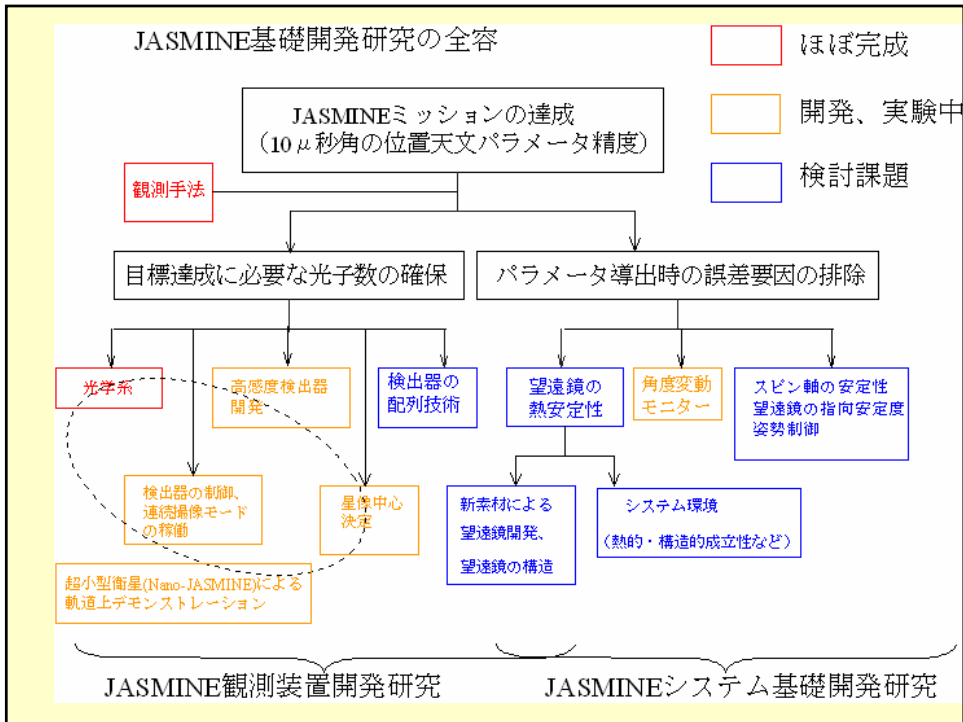
36

H-IIAの
フェアリング
(NASDA:
H-IIAシステム
解説書より
抜粋)



L2軌道へ (太陽と地球の重力ポテンシャルでほぼ安定な軌道)





3-2 あらたなバージョンの考案 → JASMINE-Light(仮称)

*JASMINE → 天の川全面をサーベイ

→ ~1.5mの主鏡、ビーム混合鏡が必要

目標をもっと絞ってみる(予算規模縮小もにらんで。。。)

↓

バルジ方向のみキープ(バルジは重要かつ単独でも興味深い)

→ 10 μ 秒角の精度はキープ(/ <0.1必要!)

かつ、その精度をz<14等級で達成(数十万個以上の星の個数が必要):ももとの精度要求と同じ

しかし、サーベイ面積が減少

口径1.5m → 口径 ≤ 1m

大円観測 → 小円観測 + 、

or

フレームの連結法・・・

↓

バルジ

・連結領域小

・多数の星

VERAとも関連(検討会with 笹尾、本間、倉山)

→ ポスター発表参照(矢野)

40

3-3.Nano-JASMINE計画

* 超小型衛星を用いた技術実証、デモンストレーション
(Nano-JASMINE計画)with 東大中須賀研

早く、安く。しかも、スペース開発の一連の作業を経験できる。

実際の宇宙環境での実験：TDIモードを稼働し、大円上を
観測。

* 主鏡口径5cmの望遠鏡、30cm立方、重さ10kg程度の衛星

* ヒッパルコスと同程度の精度

→ 固有運動の補正

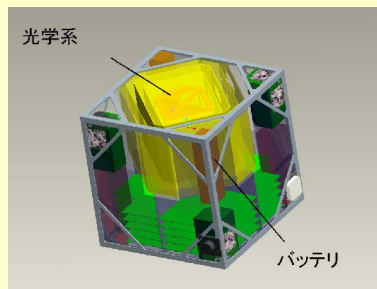
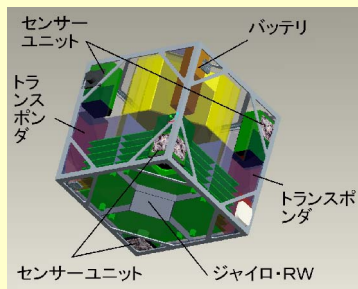
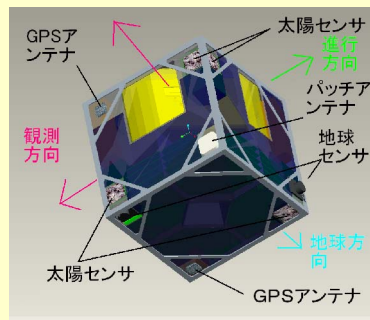
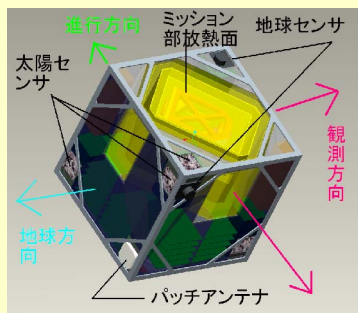
* 2008年に打ち上げ(目標)

日本初のスペースアストロメトリ！

→ ポスター発表参照(小林、山田、菅沼、山内)

41

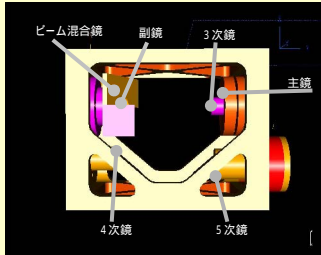
Nano-JASMINE衛星のデザイン図(中須賀研)



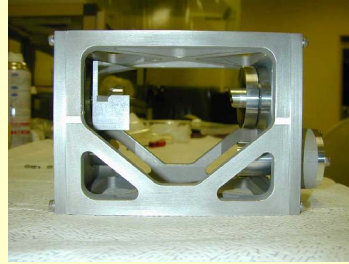
42

望遠鏡の試作、試験が着実に進行中=>菅沼氏の発表

Nano-JASMINE望遠鏡の
説明図



望遠鏡（全光学系）仮組



43

§ 3-4.最近の主な動き

2003年10月:宇宙研にJASMINE-WG設置が認められる(現在のメンバー数は85名)

2004年度～

国立天文台にJASMINE検討室(Aプロジェクト

室)が設置される(常任スタッフ4名,兼任スタッフ9名,
研究員1名,外国人研究員1名,院生3名,事務支援員1名)

2005年9月:

日本学術会議天文学研究連絡委員会(天文研連)でのレビューを受け、特別議事録「光赤外線天文学将来計画の推進について」が出されるにいたった。**特別議事録の中で、JASMINEは、赤外線による位置天文学の実行という日本独自の発想により、銀河系の構造と運動の解明、ダークマターの分布などの重要課題に挑むものであり、早期の計画実現をめざす活動の一層の推進を期待する、とのコメントをいただいている。**

* Google検索:"JASMINE"で検索 =>

283000件中、我々のHPがトップ!(お茶などを抜いて。。。)

44

§ 3-5. 今後の推進内容(スケジュール)

2006年度～2009年度頃まで

観測手法の確立と仕様の完成、基礎開発、
重要課題の技術実証実験

超小型衛星(Nano-JASMINE)を用いた実際の
スペースでのデモンストレーション実験

約2年後の打ち上げを目標

2009年度頃: JAXAへのミッション提案を目指す

2010年度～2014年度以降

概算要求、PM製作、試験、
FM製作、試験

2015年度頃: 打ち上げ目標

2015年度～2020年度: 観測運用、データ処理

2020年度～2022年度: データ解析、カタログの作成

2022年度: カatalogの公開(ミッション終了)

45

参考: 人的体制

コアチーム:

郷田(常任): 計画全体の総括

小林(行)(常任): JASMINE全般の検討・開発、特に望遠鏡、検出器
の担当、Nano-JASMINEミッション部開発の総括

辻本(常任): 銀河系モデルの構築、サイエンスの検討、
測光システム担当、プロジェクト室のマネージメント等

矢野(常任): JASMINE全般の検討、特に観測手法、ミッション系およびバス系に渡る
全般的な

検討、Nano-JASMINE望遠鏡の開発

山田(京大理): シミュレータの構築、オンボードデータ処理技術、機器の放射線耐用
実験、CCDのコントロール、HPの管理等

川勝(ISAS/JAXA): ミッション方法および衛星システムの検討

松原(ISAS/JAXA): ミッション部全般および衛星システムの検討

野田、對木、歌島、小川(JAXAシステムズエンジニアリング推進室)

衛星システム全般に渡る検討、基本設計ならびに姿勢制御系、軌道、熱構造系
の詳細検討

菅沼(研究員): 光学系の検討、Nano-JASMINE望遠鏡の開発

A.Kucinkas(外国人研究員): 測光システム検討、GAIA-WGとの連絡

丹羽(受託院生・京大): レーザー干渉計型角度変動モニターの開発

山内(東大院生): 検出器制御基盤の開発

中須賀、酒匂、初鳥、田中: Nano-JASMINE衛星の開発

46

協力メンバー：

国立天文台月面天測望遠鏡計画(ILOM)チーム：

(河野、花田、荒木、鶴田、浅利、田澤、野田：以上、全員併任)

- * 4年前から、定期的な会合(他のスペース計画の勉強、お互いの計画の紹介・検討、共通課題の検討、実験など)
- * 星像中心決定実験の継続、Nano-JASMINEなどの衛星システムの検討(特に、観測装置の試験など)に関して協力をして頂ける。
- * 天文台でのスペース天文学のノウハウの蓄積、今後のスペース天文学推進体制のベース作り、月面上のJASMINE-II計画など。

中島(併任)：観測手法、測光観測、サイエンスの検討

高遠(ハワイ観測所：併任)：Nano-JASMINE望遠鏡の開発

宮崎(ハワイ観測所)：CCD検出器の開発、検出器配列技術に関する協力

新井(重力波プロジェクト推進室)：ビーム混合鏡の交差角度変動モニター(レーザー干渉計型)の検討、開発

阪上(京大・人間環境学研究科)：レーザー干渉計型モニター開発

宮内(光赤外研究部)：JASMINE定例会への参加

47

今後ともご支援、ご協力をよろしく
お願いします。

JASMINEのホームページアドレス

<http://www.jasmine-galaxy.org/index-j.html>

48

Jasmine

