

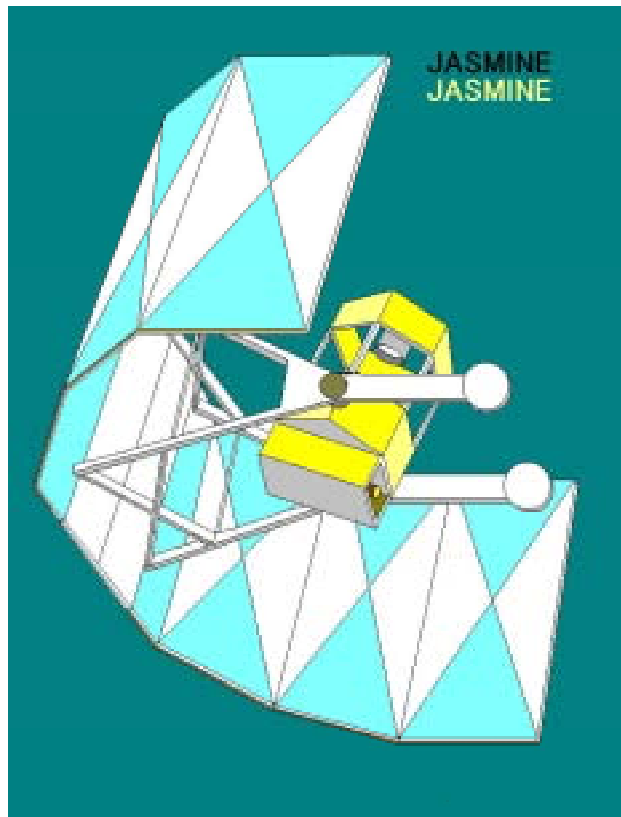
アストロメトリ衛星WG報告

郷田直輝（国立天文台）

アストロメトリ衛星



JASMINE---Galactic Structure Surveyor計画
(**J**apanese **A**strometry **S**atellite **M**ission for **I**Nfrared **E**xploration)



JASMINE 計画の要旨

赤外線 (K-band) による アストロメトリ観測 を 衛星 を用いて行い、銀河系内、特に 銀河面、バルジ などのサーベイを行い、数億個の星の位置、距離、固有運動を今までにない高精度で測定する。星の 位置、年周視差、1 年当たりの 固有運動 は、14~15 等で、10 万分の 1 秒角 の高精度で測定される。これにより、可視光だけでは伺い知れない銀河系構造（特に、バルジ、遠くの銀河面）および恒星物理、星の形成と進化を明らかにするとともに、系外銀河観測による宇宙論への直接的リンク、惑星系探査などのサイエンスも切り開くことを目的とする。

§1 WG活動報告

アストロメトリ衛星 WG

年に1, 2回、会合を開き、JASMINE に関する検討、意見交換を行う。

メンバーは、多くの機関、分野の方から入っていただいている。2002年2月25、26日に光赤外将来計画WGと合同で開催。多数の参加者。貴重なご意見をたくさんいただいた。詳細は、集録を参照。

JASMINE のコアとなる検討会

(1)JASMINE 勉強会

* 計画の全体的な検討

(2)アストロメトリ勉強会

* 星像中心決定のアルゴリズムの検討、サーベイ方法の検討、astrometric parameter 導出のデータ解析方法の検討、海外計画の勉強などを行う

JASMINE-Simulator WG

(i)centroid 決定シミュレーション Sub-WG

(ii)Virtual Galaxy Sub-WG

(3)JASMINE 光学系・検出器 WG

* TDI モード可能な赤外線検出器や超軽量鏡の開発、光学系の設計など。

(4)JASMINE システム検討会

* 衛星システム（軌道、バス部なども含む）の検討

(5)銀河系力学モデル勉強会

(6)スペース天文研究会

JASMINE チームと RISE、SELENE 計画チームとのスペース関係の合同勉強会、計画の検討、共同研究などを協力して行う。

centroid 実験グループ

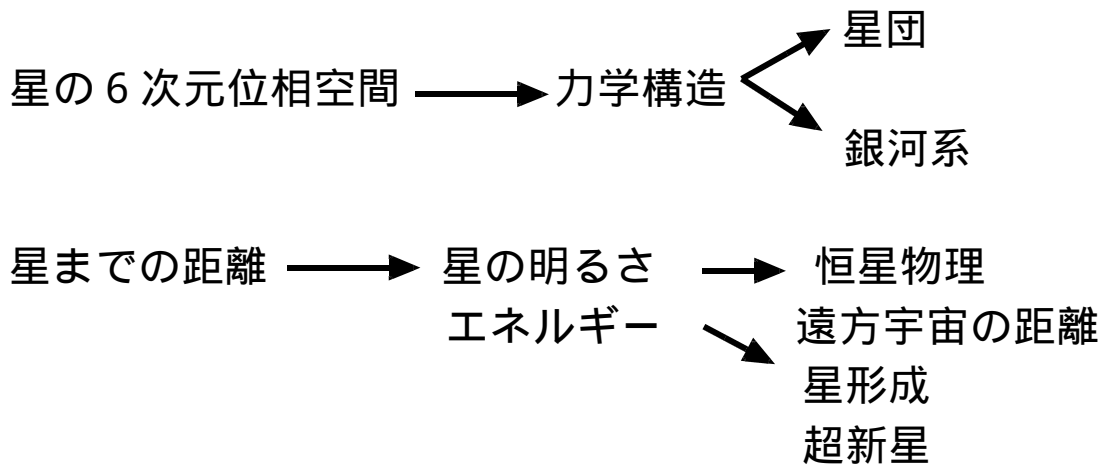
§2 アstrometry (位置天文) とは

星の (天球上の 2 次元的) 位置、距離、固有運動 (天球上における横断速度の角速度) (+ 視線速度) の測定

距離 → 年周視差を利用

星の 6 次元位相空間の情報

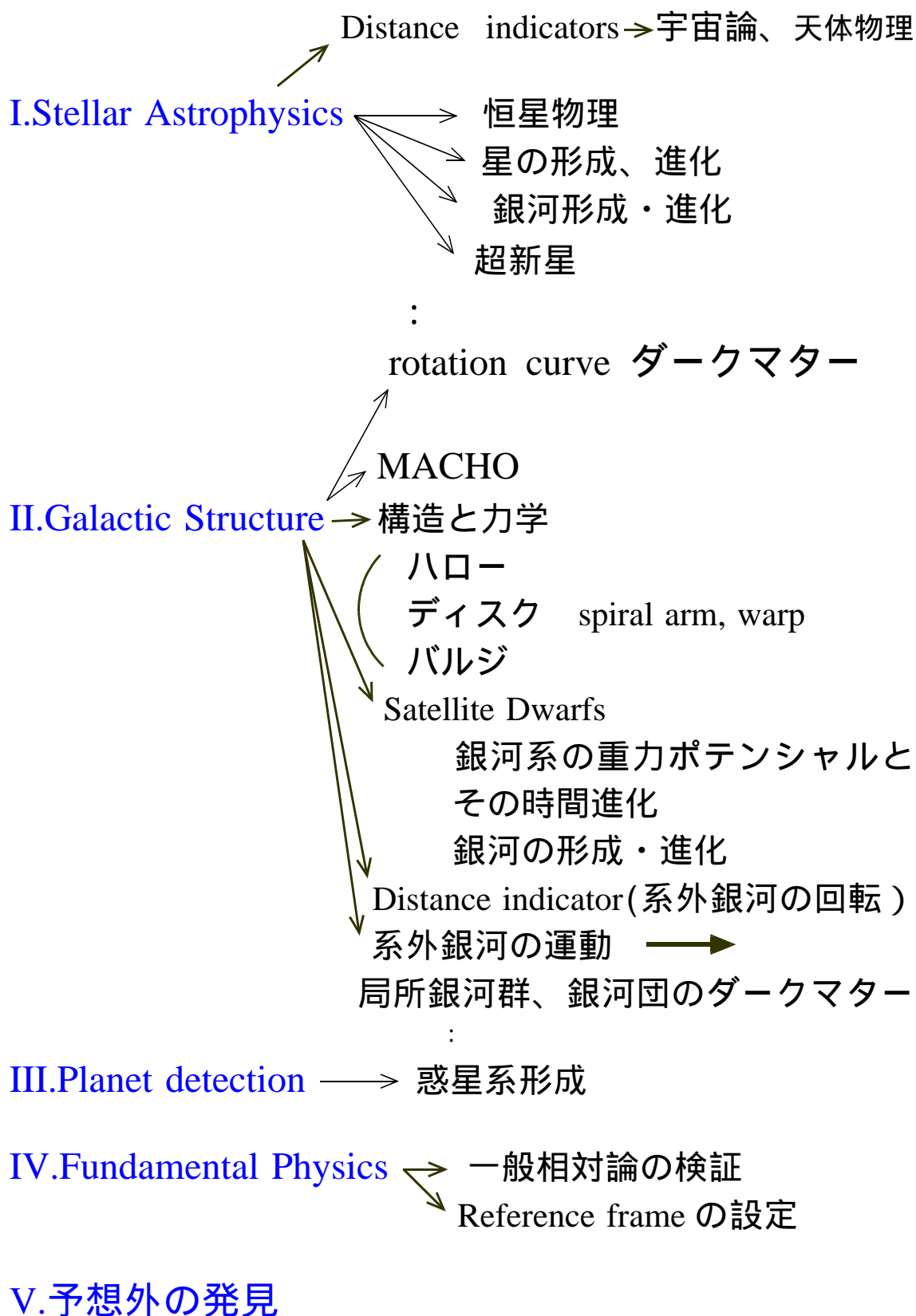
→ 天文学の基本



遠くの銀河を知るための基礎ともなっている

星の運動 → 連星系、惑星系

特に関係する重要なサイエンス



§3 高精度アストロメトリ観測でもたらされる大革命

Hipparcos 衛星 → “小さな”革命

1989年～1993年のミッション：ESAによる打ち上げ

年周視差の精度 ～ 1mas (ミリ秒角)

固有運動の精度 ～ 1mas/yr

V < 12mag、約 12 万個の星

距離に関しては、100pc の距離で、10% の誤差

固有速度に関しては、1kpc の距離で、5km/s の誤差

要求される年周視差の精度 10%以内

(バイアス効果を受けないため)

銀河中心まで約 8kpc に対して、まだ、ほんの 100pc 以内

興味ある対象星もほとんどない

e.g. セファイド変光星、RR型変光星

大マゼラン星雲や球状星団までの距離がまだ

約 20% 不定 (3% の距離不定 → 10 億年の年齢不定)

↓
“大きな”革命へ

～ 10 μ as の精度欲しい

10 μ as の位置精度：

月の上の、1円玉の直径約 2cm) ほど離れた場所の違いや移動を測定可能

距離に関しては、10kpc の距離で、10% の誤差!!

固有速度に関しては、20kpc の距離で、1km/s の誤差!!

↓
銀河全体を見渡せる

系外銀河も target に入る

天文学の多くの分野に

break through を

もたらす

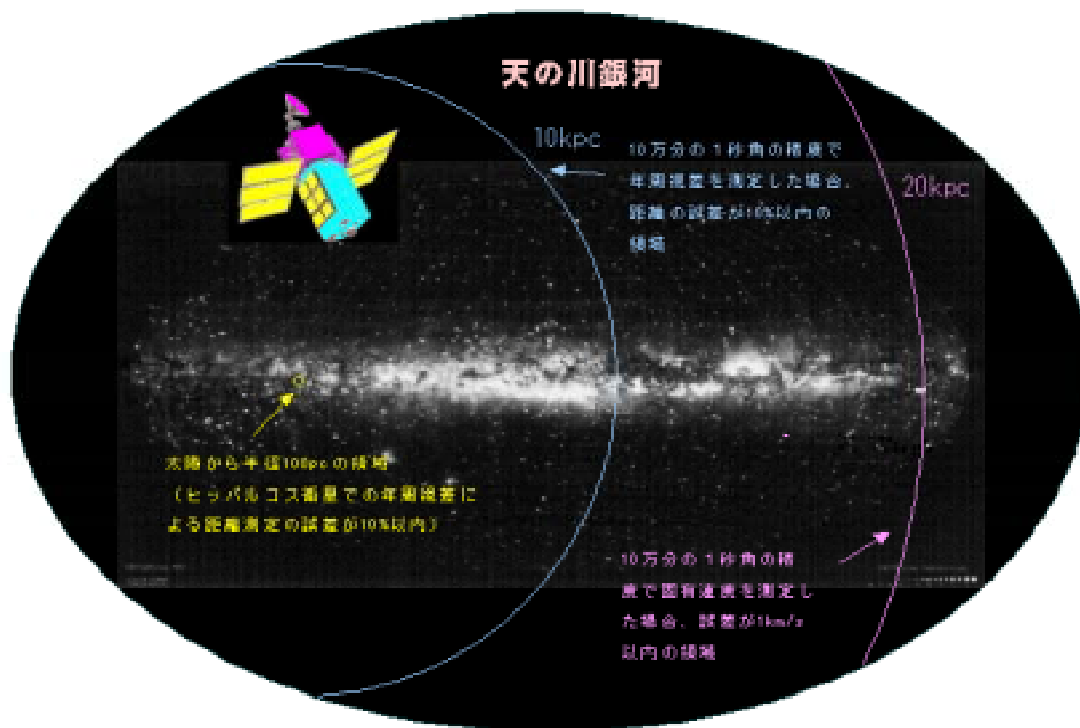


図 1

天の川を我々の銀河系にみたてた模擬図。太陽系の位置を仮に定めて、そこからの位置天文（アストロメトリ）の観測によって、太陽系からどこまでの範囲でどの程度のことろが分かるかを記してある。例えば、ヒッパルコス衛星によって得られた観測データの場合、星の年周視差による距離測定が 10% の誤差以内で得られている領域が太陽の周りの小さな円で示されている。また、今後の高精度アストロメトリ観測で、もし 10 万分の一秒角 ($10 \mu\text{as}$) の精度で星の年周視差や一年あたりの固有速度が測定できた場合、距離測定が 10% 以内の誤差、固有速度が 1km/s 以内の誤差になる領域も各々示してある（郷田、天文月報 2000 年 2 月号）。

§4 今後の計画

(1) 海外の高精度スペースアストロメトリ計画

DIVA : ・ドイツ

- ・ 2005 ~ 2006 年打ち上げ予定
- ・ ~0.20mas at V=10、 Full sky survey, 3500 万個の星

FAME : ・アメリカの海軍天文台が中心

- ・ ~2005 年に打ち上げ予定 \longrightarrow NASA が撤退！！
- ・ $5 < V < 15$ 、 Full sky survey、 4000 万個の星 Nature 415, 249(2002)
- ・ ~ 50 μ as、 ~ 50 μ as/yr ($V < 9$)

SIM : ・NASA、マイケルソン型 (10m の基線長)

- ・ 2009 年頃打ち上げ予定
- ・ ~ 4 μ as
- ・ 1 万個の objects ($V < 20$)
- ・ Pointed, narrow/wide filed

GAIA : ・ESA

- ・ 2011 ~ 2012 年頃打ち上げ予定
- ・ ~ 10 μ as ($V < 15$)
- ・ 10 億個の objects ($V < 20$)
- ・ Full sky survey

(2) 地上での電波干渉計による高精度アストロメトリ観測

VERA : ・国立天文台といくつかの大学が中心

- ・ 地上の電波干渉計、 4 局
- ・ メーザー源を target (約 1000 個)
- ・ ~ 10 μ as

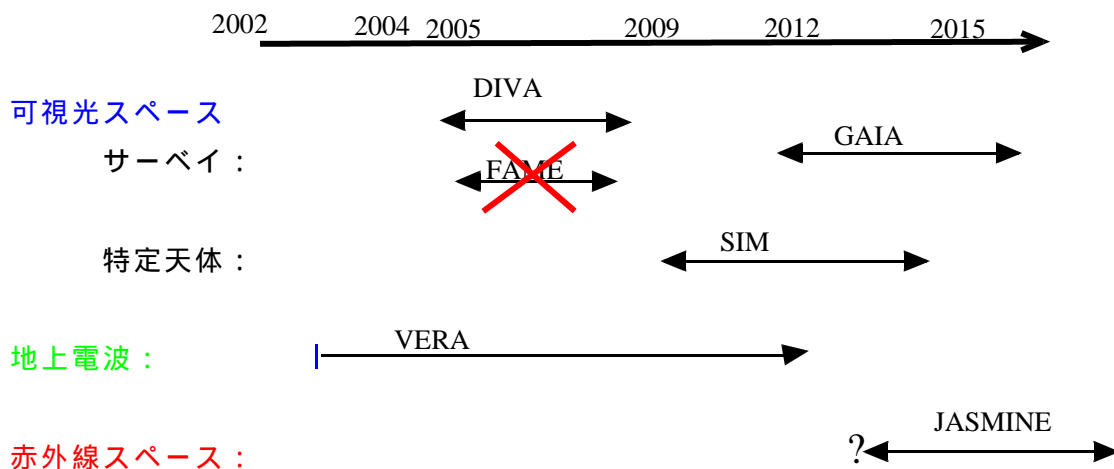


図2 高精度アストロメトリ観測の将来計画

§ 5. 赤外線スペースアストロメトリの重要性

何故、赤外線 (K - band) か？

世界では、赤外線(K-band)でのスペースアストロメトリの計画なし。注目を浴びている。

赤外線(K-band)で行う意義、必要性

ディスク面、バルジ：可視光では、ダストによる減光の影響大----->K-band では、その影響が少ない。

K-band では減光は、V-band の約 10 分の 1

kinematics を trace する天体のほとんどは、K-band で明るい

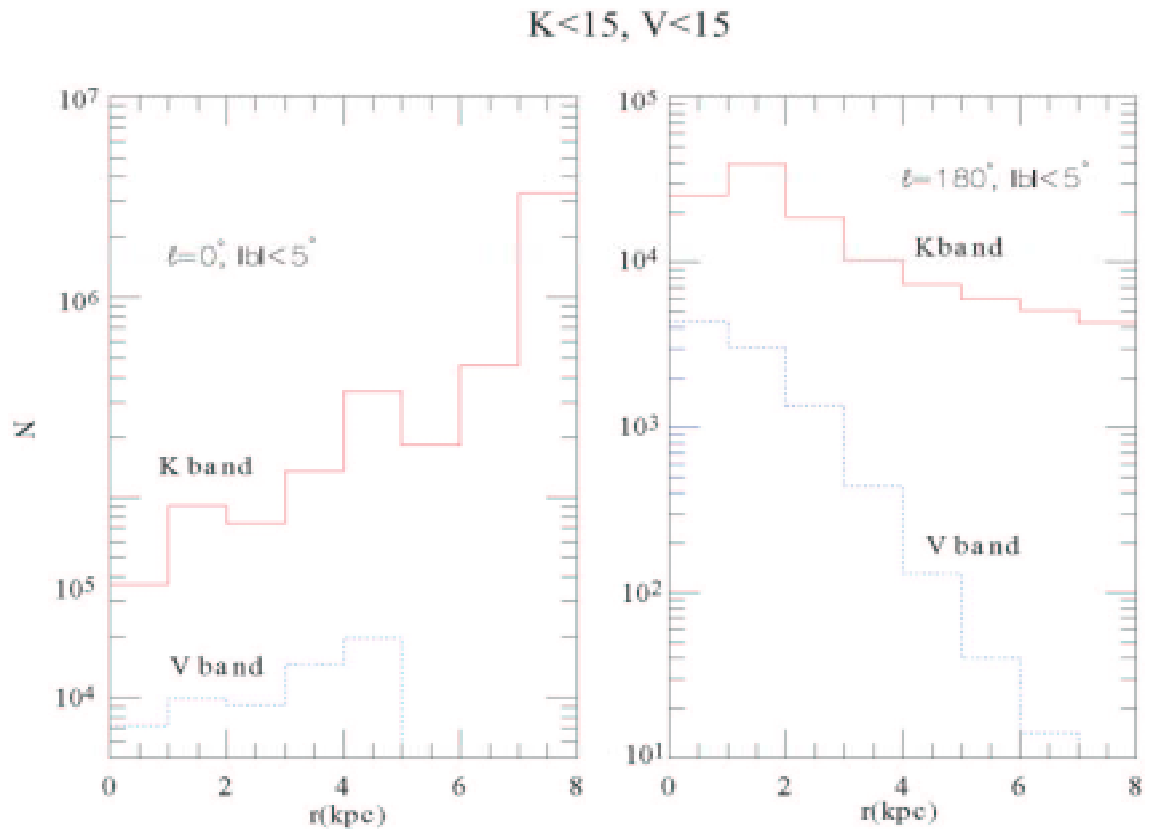
K-band では多くの星が観測可能----->銀河系の kinematics, dynamics にとっては重要な要素

観測される個数

V=15 までと、K=14~15 までの星の個数は、広領域ではほぼ 2 桁 K-band の方が多いが、銀河面で我々から数 kpc 遠くなると、K-band での星の数の方が圧倒的に多くなる (図 3 参照)。

星の絶対等級、エネルギーの評価の際に入る、吸収評価の誤差が少ない

図3：観測で期待される星の個数(N)。r は、太陽からの距離。l は、銀経座標 ($|l| < 1$ 度)。銀緯は、 $|b| < 5$ 度を考えている。いずれの図も upper line(実線)が K-band、lower line(破線)が V-band で観測した場合。K<15mag, V<15mag を考えている。これは Cohen の Sky model をもとにして独自につくった銀河系モデルを用い計算を行ったものである。このモデルには、DIRBE による dust map の情報を考慮した dust extinction の効果も取り入れている。



赤外線(K-band)アストロメトリ衛星でねらう サイエンス

K-band で出来る特徴を活かす

銀河系のディスク面、バルジ、銀河中心付近の観測による、銀河系構造の解明

(GAIA では、可視光であるため、観測できる星の個数が少数となる。GAIA とのすみ分け)

銀河系形成・進化の“化石”の宝庫

銀河系の真の姿は？バーはあるのか？

バルジ、ディスク、warp の構造を直接見る

銀河系構造

はじめて、銀河系のディスク面、バルジの6次元位相空間の情報が明らかになる

(詳しく解明できる唯一の銀河が銀河系)

Thin disk の構造、軸対称性？

バルジの力学構造、ハローとの関係

重力系の力学状態

銀河系形成、進化

重力多体系の問題

disk 上の質量----->dark matter 問題

Spiral arm-----density wave か？

銀河面の震動、Warp---->重力系の力学状態

ディスク星、MACHO 等による astrometric microlens 効果

→ 重力レンズ物体の特徴、銀河系 kinematics の独立的検証

星、惑星の形成とその履歴

星の形成と終末の物理、

惑星系探査、惑星形成の物理、

星形成史----->銀河系の形成・進化、銀河の形成・進化

系外銀河の固有運動

局所銀河群の運動----->ダークマター

銀河面背後の銀河探査

§6 JASMINEでの観測方法

観測方法

(1) 検出器、鏡

位置の観測精度

$$\sim \lambda / D \sqrt{N}$$

λ : 波長、D: 鏡の口径、N: photon 数

出来るだけ大きな口径 D の鏡

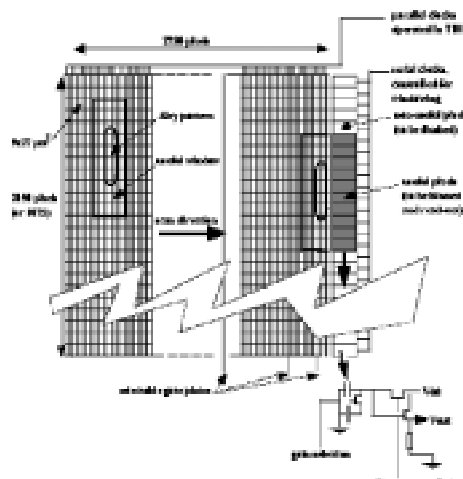
photon 数 N を増やすことが肝要

大きな口径、積分時間を増やす (mission life による制限あり)

感度良い検出器

さらに、サーベイ型 \rightarrow 広大な F.O.V.

多数の検出器を並べる



可視光では CCD を使い、衛星の scan にあわせて、

TDI mode (drift scan mode) での測定を行う

readout noise の影響を軽減、pixel 毎のムラを平均化。

K-band で、TDI mode を使える感度良い検出器は現存しない。

開発の必要有り

(2) サーベイ方法

衛星自体は、連続 scan (もしくは、step scan) しながら銀河面を中心に観測できるように姿勢制御を行う (図4参照)。

太陽方向を見ない工夫も必要。

絶対的な年周視差を得るためには、大角度離れた field を同時に観測する方法が得策である（ヒッパルコスが採用し、成功を収めた。これに続く、DIVA、GAIA といったサーベイ型のアストロメトリ衛星は同様の手法を取る）。

JASMINE も target とする銀河中心、銀河面を観測すると同時に大角度離れた領域の基準星を同時に測定することが、必要。

→target 用の鏡および観測装置以外に、大角度離れた方向（例えば約 90 度）を同時に観測できる鏡と観測装置を取り付ける。

（あらかじめノミネートされた基準となる明るい星のみを測定できればいいので、口径を小さくし、可視光での観測とする）

（ 3 ）衛星の軌道

Sun-Earth の L2-point に投入予定（Earth-trailing も候補）。

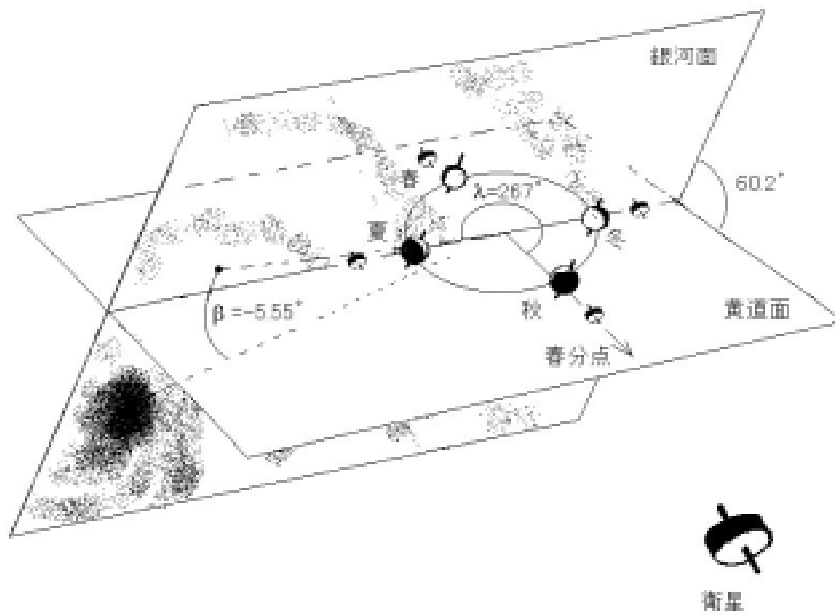
理由：(i) 太陽、地球がほぼ同じ方向にあり、観測できる領域を広げられること。

(ii) 熱的環境の変化が安定していること

(iii) 衛星の軌道制御が比較的容易であること

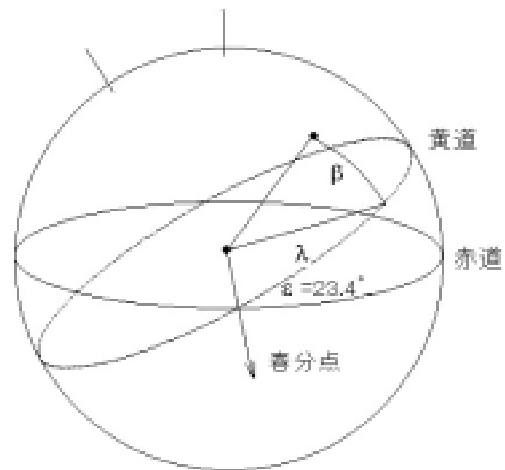
(iv) 放射冷却により冷却できる

図4：銀河面、銀河中心方向、黄道面、地球、衛星の各々位置の関係（矢野作図）



補足：銀河面の座標と赤道座標系----->黄道座標系の変換

銀河中心
 $\alpha_{GC} = 17^h 45^m 37^s$
 $\delta_{GC} = 28^\circ 56' 10''$
 銀河北極
 $\alpha_{GP} = 12^h 51^m 26^s$
 $\delta_{GP} = 27^\circ 07' 41''$



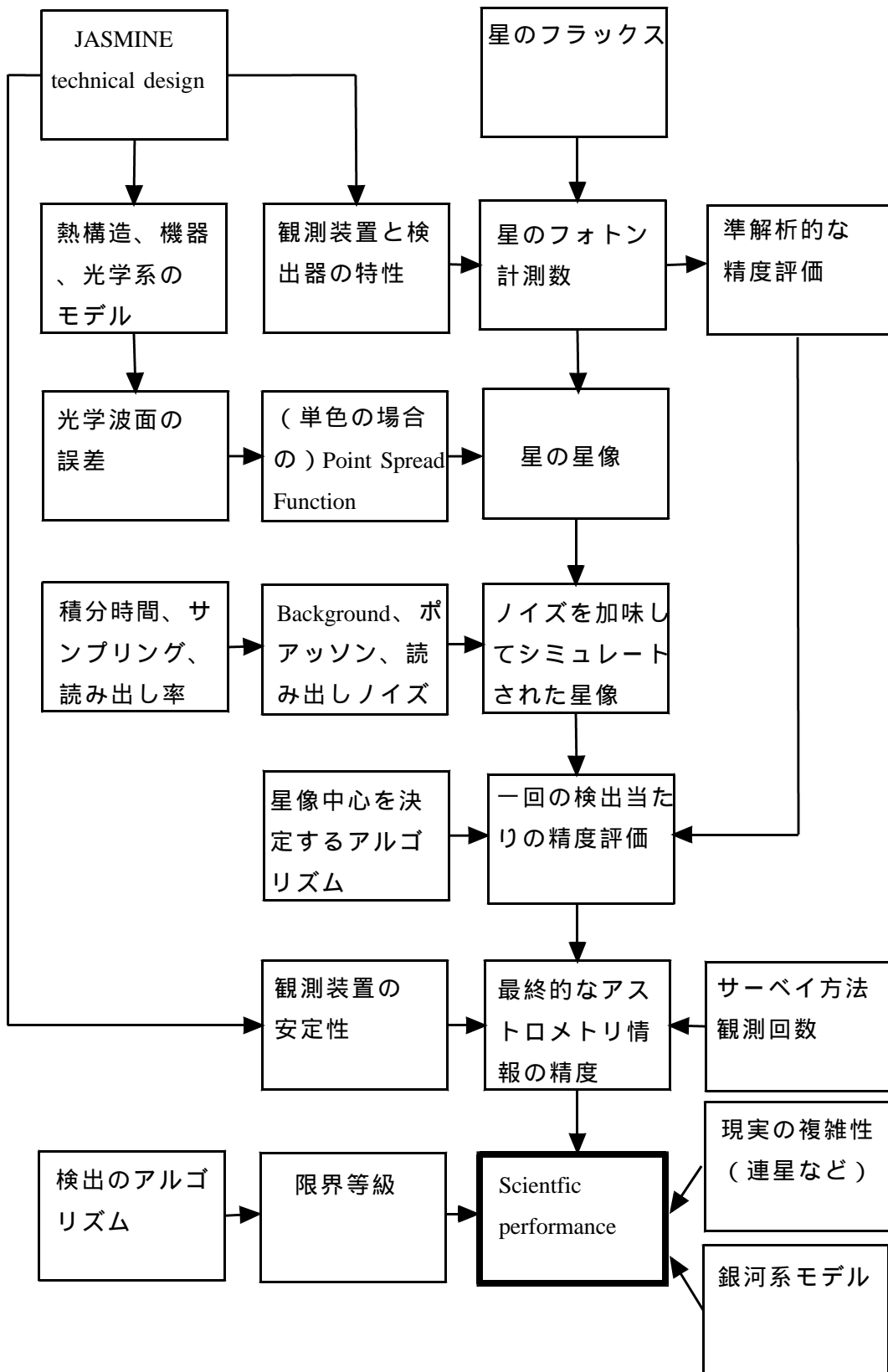
座標変換 赤経赤緯 $(\alpha, \delta) \rightarrow$ 黄経黄緯 (λ, β)

銀河中心
 $\lambda_{GC} = 266.8^\circ$
 $\beta_{GC} = -5.55^\circ$
 銀河北極
 $\lambda_{GP} = 180.2^\circ$
 $\beta_{GP} = 29.8^\circ$

§7 精度の評価方法

衛星システム全体（観測装置、軌道、姿勢制御、サーベイ方法など）を仮定した場合、どれぐらいの精度が出るものなのか、またそれによりどのようなサイエンスの展開が可能かを評価する必要がある。逆に必要な精度を達成するためには、衛星のデザインにどのようなことが要求されるのかを解析する必要がある。これらの評価は、次ページに示した図5の flow chart にのっとり、行っていかなくてはならない。

図5 JASMINE performance assessment: schematic representation of the main elements and their interrelations.



§8 必要な仕様（概算）

図5での準解析的な精度評価
簡単のため、サーベイは一様であり、星に依らずに観測回数として一定値（1つの target 当たり、1年間に15回観測）を指定した。

(1)概算による必要な仕様

オプション I

K=14mag で $10 \mu\text{as}$ を達成。

サーベイ領域として、

S ~ $240^\circ \times 10^\circ$ square degree : 銀河中心と anti-center 方向

オプション II

K=13mag で $10 \mu\text{as}$ を達成。

サーベイ領域として、銀河中心を中心としたバルジ領域に
集中

S ~ $20^\circ \times 10^\circ$ square degree :

オプション I の場合 :

仕様 :

3.6m × 1.8m の鏡を1枚使用 (target のアストロメトリ用)
基準星のアストロメトリ用にメインよりは小さな鏡 (1m
程度) を1枚。

この鏡は、target 用のメインの鏡の向いている方向に対して、
大角度離れた向きを向くようにする。また、V-band を使用する。
V-band で明るい星で、精度良く計測できるものを基準星とする。

TDI モードが使える検出器 (pixel size $18.5 \mu\text{m}$:

$2K \times 2K$) を約 130 個並べる。

観測年数 5 年



H2A ロケットクラス、S-E L2 ポイントへ

オプション II の場合：銀河中心付近方向のみのサーベイ
仕様：

口径 1.8m の鏡を使用：target のアストロメトリ用
基準星のアストロメトリ用にメインよりは小さな鏡（50cm
程度）を 1 枚。

この鏡は、target 用のメインの鏡の向いている方向に対して、
大角度離れた向きを向くようにする。また、V-band を使用する。
V-band で明るい星で、精度良く計測できるものを基準星
とする。

TDI モードが使える検出器（pixel size 18.5 μ m, 2K \times 2K）
を約 30 個並べる。

約 23 秒毎に読み出し。

観測年数は、5 年間とし、銀河中心方向と太陽の方向とが離
れている 1 年のうちの 40% だけ、銀河中心付近をサーベイ
すると想定。

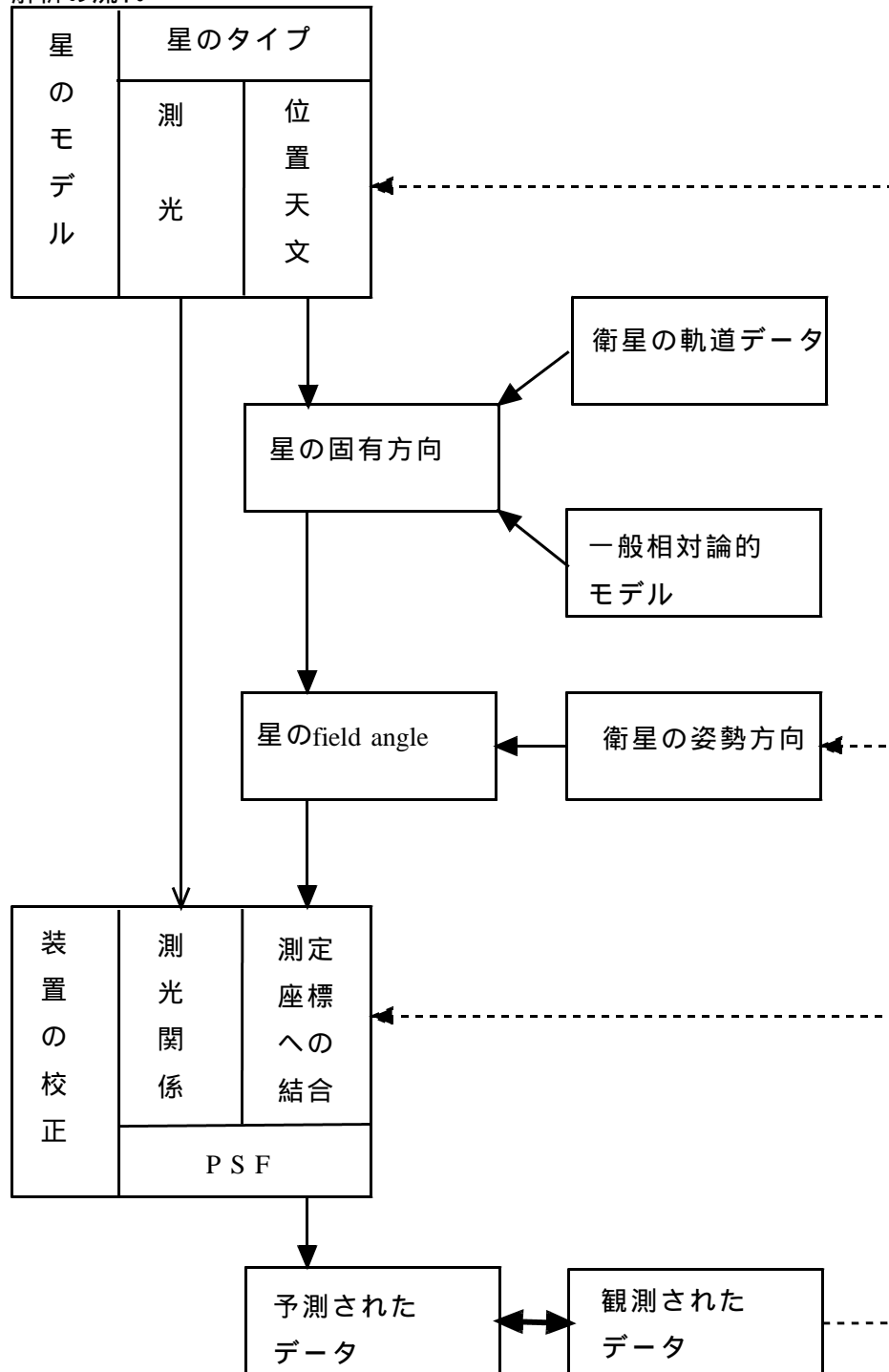


M-V ロケットでの打ち上げ
（～ 2013 年打ち上げ目標）
S-E L2 ポイント

§9 データ解析方法

実際の評価を厳密に行うためには、最終的に必要な精度の astrometric parameter をどのようにして出せるのか、現実のデータ解析の流れを構築し、それをシミュレートしておく必要もある。図6は実際のデータ解析の flow chart である。

図6：データ解析の流れ



* 装置関係、衛星の姿勢関係もモデル化。モデル中のパラメータ値は最終的に星の位置天文情報とともに高精度で求められる。

§10 今後の検討項目

(1) 検出器の開発：

現在、CCD のように TDI モードが可能な感度良い赤外線検出器はない。時間、経費はかかると予想されるが、この開発を何としても行いたい。

――> 今年度から科研費基盤研究 A が採択 (代表者：小林行泰)
技術的に開発の見通しあり。

(2) 光学系のモデル設計：

(i) 超軽量かつ大口径の鏡の開発が必要。

* アリゾナ大学ミラーラボにて、NGST 用の鏡として、
口径 2m, 13kg/m², 2mm thick facesheet,
166 actuators の鏡が開発済み。今後、口径 6m まで開発予定
M-V、H-II 仕様に合うように開発が必要

(ii) 光学系の設計：scientific target の観測用と基準星観測用。

(iii) 光学系、機器とその熱的变化、また星のタイプに応じた PSF の計算

(3) アストロメトリパラメターの導出方法 (データ解析方法) とその誤差評価及び サーベイ方法 の検討：

scientific target は銀河面や銀河中心付近に限る。しかし、グローバルなアストロメトリを構築する必要がある。観測を効率よくやりながら、いかに calibration も同時に行っていくか、その方法が世界では誰も考えてはいない新たな課題。太陽方向を見ない工夫も必要。

(i) 星像中心を求めるアルゴリズム-----数値シミュレーション
と CCD を用いた実験

(ii) virtual Galaxy model を用いた数値シミュレーション (サーベイ方法の検討、データ解析方法、衛星姿勢の精度要求、観測機器の仕様要求などの評価)

(iii) 太陽系内の光の軌跡――>post-post Newtonian レベルの
一般相対論が必要 ―――> formulation 作りの必要性

(iv) 基準となる QSO のマイクロレンズ効果によるふらつき、銀河系内のディスク星によるマイクロレンズ効果

(4) 衛星のシステム設計

(i) 光学系、機器の熱構造解析――> 時間変動の評価とそのモニター

(ii) 機器の設計、材質の検討

(iii) 2枚の鏡の間の角度のモニターシステム

(iv) 通信レートの評価と通信方法

*通信レートは、1次元の位置のみの出力で、約 20kbps (オプション 2) ~60kbps (オプション 1)

(5) 衛星の軌道、姿勢制御など

銀河面もしくは、銀河中心のみのサーベイをどのようにやれば、効率的かつ技術的に実現可能か？ 衛星の軌道と姿勢制御？

軌道は L2 point で良いか？ リサージュ or ハロー軌道？
または Earth trailing か？

(i) 装置や衛星の姿勢などの安定性の評価とそのモデル化

(6) 銀河系モデルによる scientific performance のより 詳細な評価

(7) Science の準備――> 定期的なセミナーおよび ワークショップ、研究会を随時企画

(8) K-band による星の視線速度サーベイ

3次元の速度ベクトルを得るためには、地上観測による
フォローアップが是非必要

K-band で 15mag までを数 km/s の誤差で測定

視線速度の情報だけでも科学的に価値あり。さらに、
JASMIINE による横断速度の情報が加味する。

この十数年かけて、データを構築。

日本国内の望遠鏡ではどうか？ 海外は？

§11 海外との関係

JASMINE 計画：基本的には日本独自の計画で進行
しかし、国内では、アストロメトリ観測衛星の経験者はほとんどいない。また、ヒッパルコスや GAIA、SIM 等とは違ったサーベイ方法を考案する必要もある。



独自のアイデア + 様々な点で海外の専門家や経験者からの意見やアドバイス



海外のスペースアストロメトリ計画のチームとのコンタクトが必要

GAIA :

2001 年 7 月にリトアニアで GAIA の会議として、「Census of the Galaxy」という European 会議が開かれた。郷田、辻本が参加し、JASMINE 計画の概要を発表。当初、ポスター発表のみの予定が、SOC からの依頼により、口頭発表も行った。JASMINE 計画の意義は好評であり、期待も大きかった。また、位置天文の大御所である Hoeg からは、検討課題に挙げたようなサーベイ方法に関する検討課題を指摘してもらえた。さらに、ヒッパルコス及び GAIA 計画のリーダーである Perryman は、JASMINE 計画自体には興味を示してくれた。また、JASMINE の計画がもっと具体的に進行したら、GAIA との関連等について検討を開始してもよいということであった。

DIVA :

DIVA チーム、オーストラリアの Anglo-Australian Observatory(AAO) 日本(NAOJ, IoA)による国際協力で、DIVA が測る横断速度に対して、地上から視線速度観測のフォローアップを行い、3次元速度マップを得る計画が進行中。



南天 :

オーストラリアの Anglo-Australian Observatory (AAO)では、ファイバー多天体分光器 6dF を開発し、UK シュミット望遠鏡を用いてサーベイを行う計画

北天

木曾シュミット望遠鏡に 6dF と同様のファイバー多天体分光器を設置し、4年間で約40万個程度の星の視線速度観測を目標とする。



このデータは、AAO による南天の視線速度データ、DIVA による位置天文情報データと組み合わせることにより、GAIA 等の結果が出る、2020年頃までは世界最高の精度と量を誇る銀河系内の星の6次元位相空間の情報を与えるものとなる。このデータにより、銀河系(力学)モデルの構築、銀河系の形成、進化、恒星物理学等に対して、画期的なサイエンスの発展をもたらすと期待できる。

2002年5月23, 24日 Kick-off meeting@AIP(Potsdam)

DIVA, AAO, NAOJ (郷田), 東大(吉井, 中田),

ヨーロッパ理論チーム(Steinmetz, Binney, Helmi, Gilmore, Navarro, ...)が参加。

DIVA チームと交流、情報交換。

§12 体制の現状

(1) JASMINE 勉強会メンバー :

郷田直輝、小林行泰、辻本拓司、中島 紀、松原英雄 (宇宙研)、
矢野太平 (理研)、官谷幸利、安田直樹、越田進太郎 (東大)、
上野宗孝 (東大)

(オブザーバー : 大石奈緒子、小谷隆行)

* 1999 年 6 月に開始。約 1 ヶ月に一度の割合で開催。JASMINE 計画の全体的な検討を行う。

(2) アストロメトリ勉強会メンバー :

郷田直輝、安田直樹、辻本拓司、官谷幸利、矢野太平、大越克也、
上田誠治 (総研大)、蜂須賀一也、笹尾哲夫、真鍋盛二

* 2001 年 2 月に開始。星像中心決定のアルゴリズムの検討 (シミュレーション)、サーベイ方法の検討、astrometric parameter 導出のデータ解析方法の検討、海外計画の勉強などを行う。ゼミ形式で、約 1 ヶ月に一度の割合で開催。

JASMINE Simulator WG

(i) 星像の Centroid 決定シミュレーション Sub-WG :

安田直樹、矢野太平、辻本拓司、郷田直輝、山田良透 (京大)

(ii) Virtual Galaxy Sub-WG

矢野太平、官谷幸利、上田誠治、辻本拓司、郷田直輝、
山田良透 (京大)

(3) 光学系・検出器 WG :

小林行泰、中島 紀、松原英雄、上野宗孝、矢野太平、
郷田直輝

(4) システム検討勉強会メンバー :

郷田直輝、小林行泰、中島 紀、辻本拓司、矢野太平、官谷幸利、
松原英雄、澤井秀次郎 (宇宙研)

(オブザーバー : 山川 宏、橋本樹明 (宇宙研))

* 2001 年 6 月に開始。まだ、不定期。衛星の軌道、姿勢制御や衛星システム自体の検討を行う。

(5) 銀河系力学モデル勉強会メンバー :

郷田直輝、矢野太平、官谷幸利、上田誠治、松林達史 (東工大)
* 2000 年に開始。約 1 ヶ月に 1 度の割合。高精度アストロメトリデータが得られた場合の銀河系の力学モデル構築方法の検討、銀河系力学に関するサイエンスの検討。いずれ、VERA グループとの共同にする予定。

(6) スペース天文研究会

JASMINE チームと RISE、SELENE 計画チームとのスペース関係の合同勉強会、計画の検討、共同研究などを協力して行う。メンバーは主に国立天文台、宇宙研、NASDA、岩手大など
* 2001 年 4 月から発足。約 2 ヶ月に 1 度の割合。

共同研究 :

(i) CCD を用いた星像中心決定実験グループ :

小林行泰、郷田直輝、辻本拓司、矢野太平、官谷幸利 + RISE グループ (花田、鶴田、荒木、田澤、浅利 etc.) (国立天文台)
山田良透 (京大)
* 2001 年 6 月に開始。CCD の TDI モードを用いて、実際の星像中心決定の実験を行う。SELENE2 での月面天測望遠鏡計画に直接関連しているため、RISE チームと共同。

(6) アストロメトリ衛星 WG メンバー (2002年4月1日現在)

*年に1, 2回、会合を開き、JASMINEに関する検討、意見交換を行う。

国立天文台：

位置天文・天体力学研究系：

郷田直輝、辻本拓司

光学赤外線天文学観測システム研究系：

中島 紀、唐牛 宏、家 正則、田村元秀、山田 亨、高遠徳尚

天文機器開発実験センター： 天文学データ解析計算センター：

小林行泰、宮崎 聡、越田進太郎 安田直樹、大越克也

電波天文学研究系： 地球回転研究系(RISE)：

井上 允 河野宣之、日置幸介、花田英夫

地球回転研究系(VERA)： 理論天文学研究系：

笹尾哲夫、真鍋盛二、本間希樹、官谷幸利 児玉忠恭

宇宙科学研究所：

松原英雄、澤井秀次郎、井上 一、満田和久、平林 久

NASDA：

岩田隆浩

弘前大：

浅田秀樹

東北大：

土佐 誠

ぐんま天文台：

奥田治之

東大：

上野宗孝、岡村正矩、吉井 譲、中田好一、尾中 敬、牧野淳一郎

理研：

戎崎俊一、矢野太平

新潟大：

宮本昌典、西 亮一

名大：

芝井 広、長田哲也

京大：

舞原俊憲、稲垣省五、山田良透

鹿児島大：

面高敏宏

***メンバー加入希望大歓迎です！**