

赤外線スペースアストロメトリ計画

JASMINE---Galactic Structure Surveyor計画

(Japanese Astrometry Satellite Mission for INfrared Exploration)

郷田直輝 (国立天文台)



JASMINE 計画の要旨

赤外線(K-band:2.2 μm)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、12等で、約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。

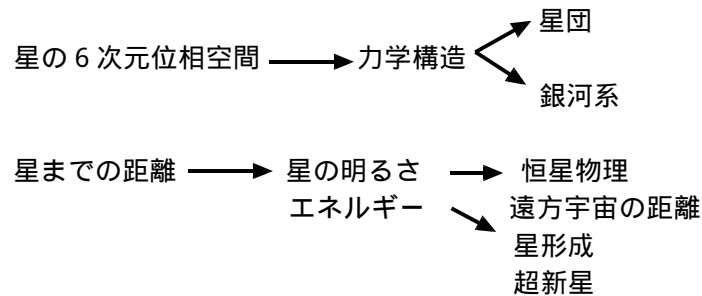
§1 アストロメトリ (位置天文) とは

星の (天球上の2次元) 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

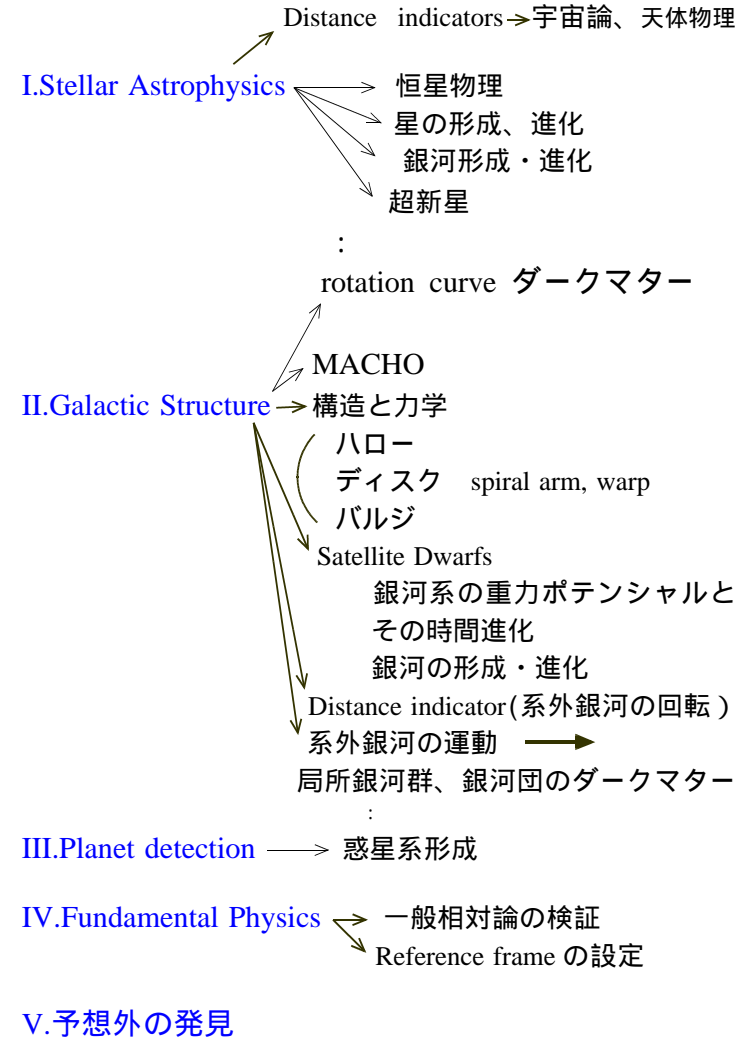
→ 天文学の基本



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



§2 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 天文学の多くの分野に
 系外銀河も target に入る break through を
 もたらす

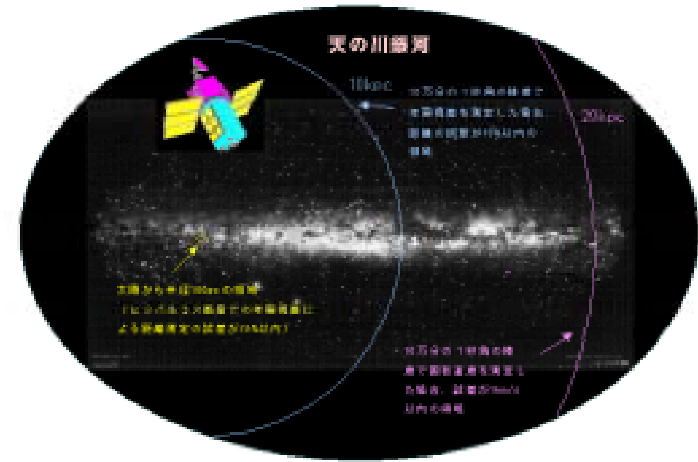


図 1

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 μ 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)。

Astrometryによる大革命の時代到来！

19C 以前 Astrometry → Solar system
(ケプラーの法則---->ニュートン力学)

20C 量子物理 → Photometry + Spectroscopy

21C Photometry, Spectroscopy に加えて、
Astrometry の再興

Astrometry → The Milky Way
Near field Cosmology!
銀河系の形成、進化の解明
自己重力多体系での新しい法則！?
(長距離力系での統計物理学)
→ Extra-galaxies (宇宙論)

天体の Kinematics, Distance

→ 高精度な Astrometric eye が必要

§3 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

- ・2006年打ち上げ予定
- ・ $\sim 0.20 \text{ mas}$ 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 → NASA が撤退！！
- ・ $5 < V < 15$ 、Full sky survey, 4000万個の星 Nature 415, 249(2002)
- ・ $\sim 50 \mu \text{ as}$ 、 $\sim 50 \mu \text{ as/yr}$ ($V < 9$)

SIM : ・NASA、マイケルソン型(10mの基線長)

- ・2009年頃打ち上げ予定
- ・ $\sim 4 \mu \text{ as}$
- ・1万個の objects ($V < 20$)
- ・Pointed, narrow/wide field

GAIA : ・ESA

- ・2012年頃打ち上げ予定
- ・ $\sim 10 \mu \text{ as}$ ($V < 15$)
- ・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)
- ・ $\sim 10 \mu \text{ as}$

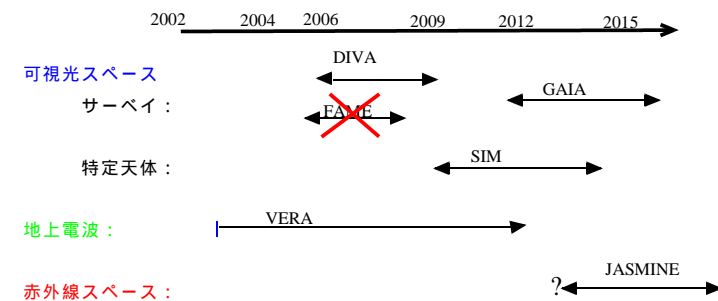


図2 高精度アストロメトリ観測の将来計画

§ 4. 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

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

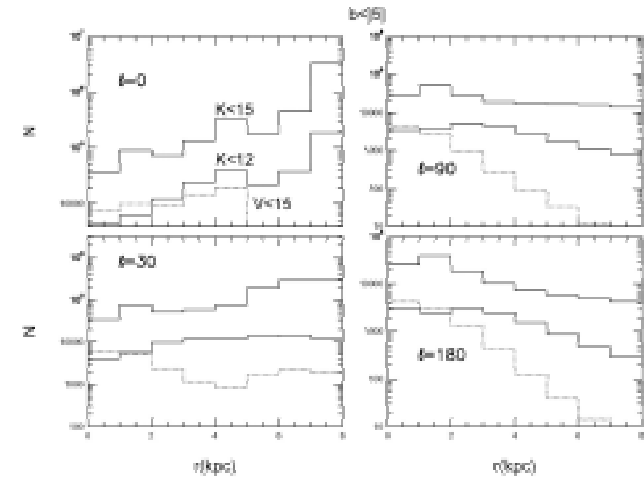
K-bandでは多くの星が観測可能----->銀河系のkinematicis, dynamicsにとっては重要な要素

観測される個数

V=15までと、K=12~14までの星の個数は、広領域ではほぼ1桁~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K<12, 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

§5 JASMINEでの観測方法

観測方法

(1) 検出器、鏡

位置の観測精度 $\sim \lambda / D \sqrt{N}$

: 波長、D: 鏡の口径、N: photon 数

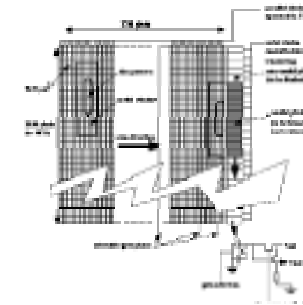
出来るだけ大きな口径 D の鏡

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 ---> 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 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。

絶対的な年周視差を得るためには、大角度離れた filed 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)。

§6 JASMINEの仕様 (概算)

打ち上げロケットは M-V クラスのロケット、または H-IIA の dual launch を想定

望遠鏡仕様：リッチークレチアンをベース (図4参照)

$$\text{K-band : } \lambda = 2.2 \mu\text{m}, \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0.3$$

光学系

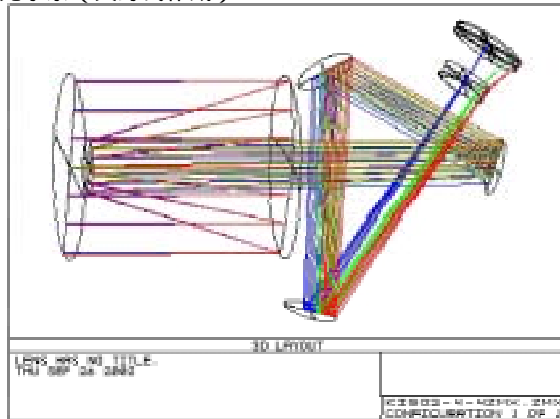
鏡のサイズ：D=2m の円形 (中心に直径 0.7m の穴)

$$\text{-----> 面積 } A = 2.76 \text{ m}^2$$

$$\text{焦点距離 : } f = 65.4 \text{ m}$$

視野直径 $\theta_s = 0.51^\circ$: \longrightarrow Astrometry 用の有効な視野面積
 $\Omega = 1.29 \times 10^{-1} \text{ sr}$

図4 光学系 (矢野氏作成)



検出器：HgCdTe を想定。TDI モードが使えると仮定。

*検出効率 (光学系、その他すべての効果を含む)： $\epsilon = 0.5(50\%)$

*検出器当たりの pixel 数 N_{pix} ： 4096 × 4096

*pixel サイズ： $w = 18 \mu\text{m}$

*readout noise： $\sigma_e = 10$

*well depth of individual pixels： $N_e = 8 \times 10^4 e^-$

*検出器の個数 アストロメトリ用 $4(N_s) \times 5(N_c) = 20$ 個

sky mapper 用：16 個 (2K × 2K)

J, H - band の photometry 用：各々、12 個 (2K × 2K)

回折限界と pixel 数の関係： $\frac{\lambda f}{D w} = 4$
検出器の開発

K-band で感度がよく、CCD 機能を備えて、TDI モードが可能な検出器の開発が必要

裏面照射型薄化 CCD + HgCdTe
 \uparrow
 インジウムバンプ

* 科研費基盤研究 A(2) (小林行泰代表) で開発予定

K-band 以外として、z-band (0.9 μm) で感度のピークがある CCD も検出器の候補として、平行して検討中。

TDI の問題、経費の問題は少ない

見える星の総個数は銀河系中心付近でも、K=12 等と比べて、z=16,17 等ならば、同等以上。

超軽量かつ大口径の鏡の開発が必要。

(2) サーベイ方法

衛星自体は、連続 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。太陽方向を見ない工夫も必要(図5参照)。

絶対的な年周視差を得るため及び衛星回転則のずれを観測データを用いて自己完結的に測定するためには、大角度離れた field を同時に観測する方法が得策である。

JASMINE も同じ鏡を2枚用いて、同時に大角度(約90度)離れた領域の星を測定する。

* 2枚の鏡に対して、焦点面は共有する

————▶ 解析により、どちらの鏡から来たか分離可能

* JASMINE は他の可視光でのスペースアストロメトリ計画とは違って、独自のグローバルアストロメトリ構築の方法を考案する必要がある。

(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、観測できる領域を拡張されること。

(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

実質の観測年数： $T_{m i s} = 5 y r$

1つの target を1年あたりにサーベイする回数：約30回

(連続する4回は、短時間以内)

(4) 衛星の運動

1つの target に対する1つの検出器の積分時間：約9.5秒

————▶ 衛星のスピンレート：24.7 秒角/秒

————▶ 衛星のスピン回転の周期：約15時間

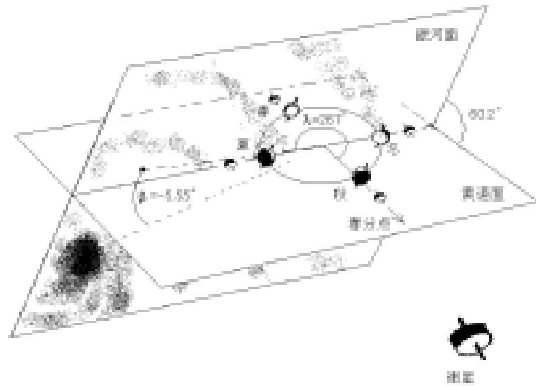
参考：

検出器1画素の angular size: 57.3 ミリ秒角 (mas)

検出器の angular size: 235 秒角

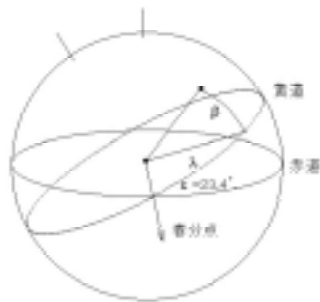
歳差運動の周期：約83日

図5：銀河面、銀河中心方向、黄道面、地球、衛星の各々位置の関係（矢野氏作図）



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
 $\alpha_{GC} = 17^{\circ}45'37''$
 $\delta_{GC} = 28^{\circ}56'10''$
 銀河北極
 $\alpha_{NP} = 12^{\circ}51'29''$
 $\delta_{NP} = 27^{\circ}07'41''$



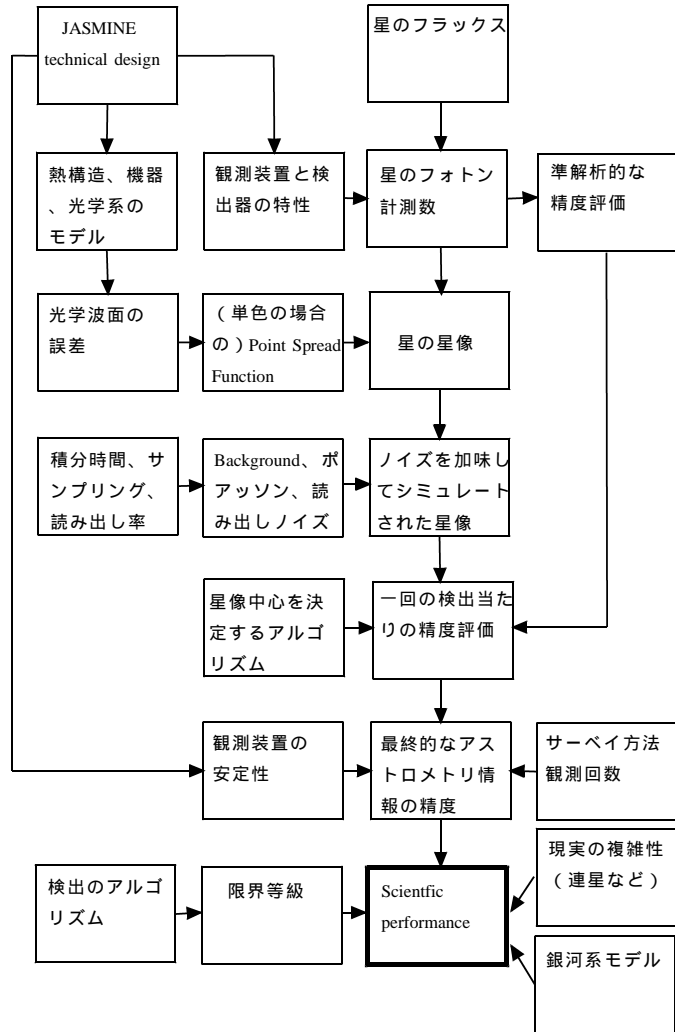
座標変換 赤道座標 (α, δ) → 黄道座標 (λ, β)

銀河中心
 $\lambda_{GC} = 200.8^{\circ}$
 $\beta_{GC} = -1.55^{\circ}$
 銀河北極
 $\lambda_{NP} = 180.2^{\circ}$
 $\beta_{NP} = 29.8^{\circ}$

§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6の flow chart にのっとり、行っていないかなくてはならない。

図6 JASMINE performance assessment: schematic representation of the main elements and their interrelations.



準備として、先ず図6の準解析的な精度評価を行う。なお、太陽が銀河面に近づき銀河面の観測を出来ない割合を5割と仮定。

$$\sigma = 10 \mu\text{as} @ K = 12\text{mag} \text{ と想定した場合}$$

→ サーベイ可能な面積 $360^\circ \times 7^\circ$

この場合、 $K=10\text{mag}$ の星に対する精度は、 $= 4 \mu\text{as}$ になる。
($K=10\text{mag}$ で検出器は saturation を起こす。これ以上の明るさの星に対する精度はほとんど同じ)

また、 $K=13\text{mag}$ の星に対する精度は、 $= 16 \mu\text{as}$ になる
(6.3kpc 以内の距離の星の距離精度が 10%以内。銀河中心の星の距離精度は約 13%)。

同様に、 $K=14\text{mag}$ の星に対する精度は、 $= 26 \mu\text{as}$ になる
(約 4kpc 以内の距離の星の距離精度が 10%以内。銀河中心の星の距離精度は約 20%)。

(* 位置測定が可能な限界等級は約 16mag)

→ 観測で期待される星の個数は、図3を参照

Remarks: 精度に関して

$$\text{年周視差: } = 10 \mu\text{as} @ K=12\text{mag}$$

銀経方向の位置、1年あたりの固有運動

$$= 10 \mu\text{as} @ K=12\text{mag}$$

銀緯方向の位置、1年あたりの固有運動

$$= \sim 100 \mu\text{as} @ K=12\text{mag}$$

(サーベイ領域の銀緯方向の幅が約 10 度程度の場合)

↓
銀緯方向の scan を行うことにより部分的に、 $= 10 \mu\text{as}$ が可能

↓
VERA, GAIA などの結果とマッチングすることにより、銀緯方向でも $= 10 \mu\text{as}$ が可能。

CCDを用いた星像中心決定の実験開始 (ILOM (月面天測望遠鏡) チームと共同)

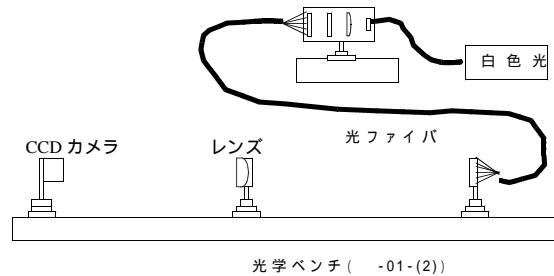
1回の検出当たりで必要な精度:

1pixel の約 1/500 で星像中心を求める必要がある。

* 実験装置の概要

- ・ コンフィグレーション (誤差は数mm)

	ファイバー、レンズ間距離	レンズ、CCD素子間距離
D=50mm, f=100mm (F=2)	77.0cm	10.8cm
D=50mm, f=150mm (F=3)	69.0cm	18.8cm
D=50mm, f=200mm (F=4)	57.3cm	30.5cm



* 装置は長さ約 1 m の光学ベンチ上に、擬似星光源、集光レンズ、CCD カメラをこの順に設置し、集光レンズによる擬似星光源の像を CCD 上に結像させる。擬似星は白色光または He-Ne レーザ光を、5 行 5 列に並べた断面 10 ミクロンの光ファイバー 25 本に導き、端面を光らせて作っている。

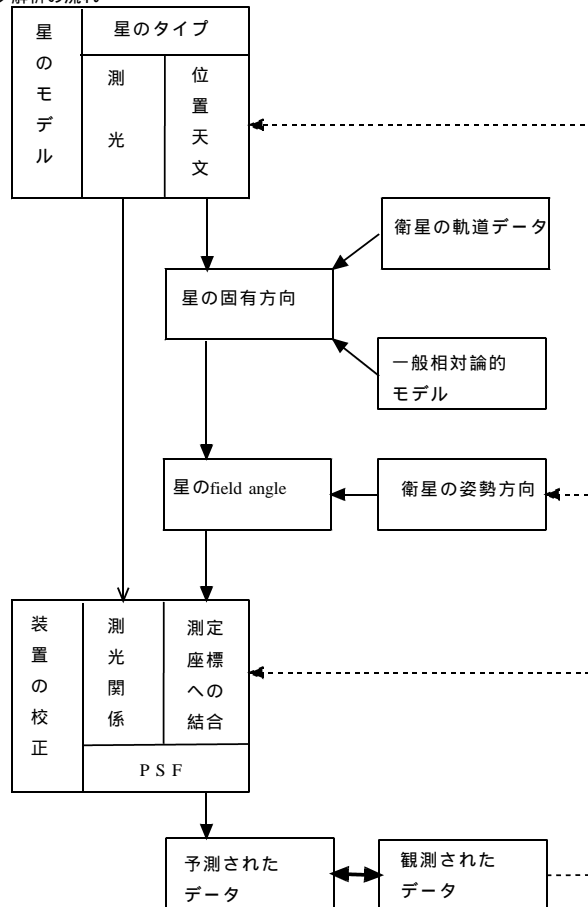
CCD カメラは光軸に垂直な方向に、1 ミクロン以下の精度で位置を調節し、星像中心と CCD ピクセルの任意の相対位置関係を実現することができる。集光レンズは口径 5 cm、F 値は 2 ~ 4 だが、回折により像の大きさを複数の CCD ピクセルにまたがるように調整するため、直径 1mm 程度の絞りを入れる。

* 星像中心を求める解析方法 (重心法を独自に改良したものは、矢野氏 (理研・研究員) によって開発済み (数値シミュレーションによる検討)。

§8 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7：データ解析の流れ



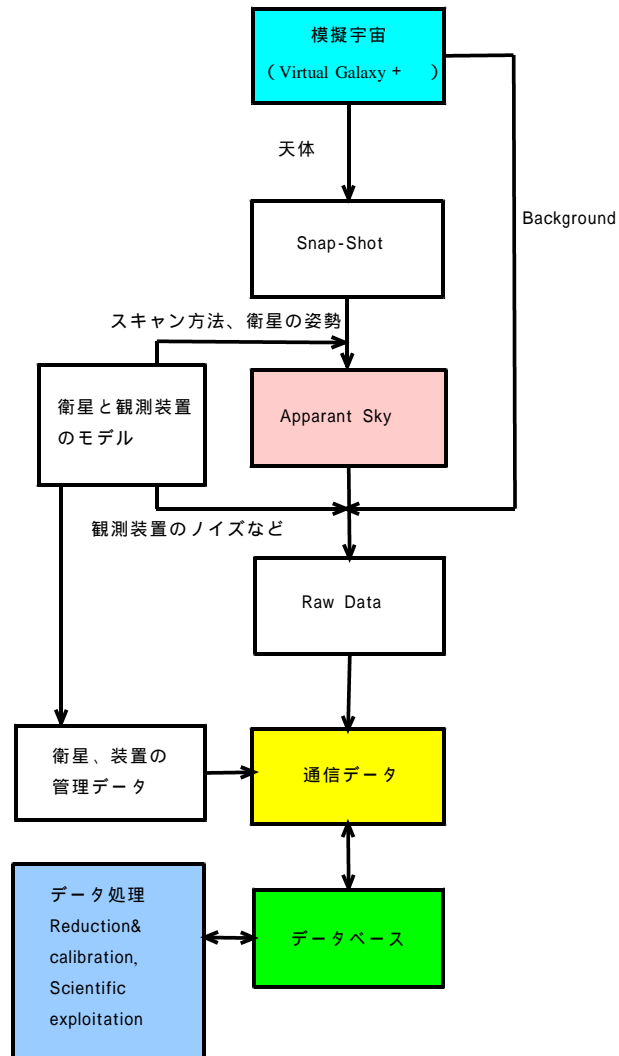
* 装置関係、衛星の姿勢関係もモデル化。モデル中のパラメータ値は最終的に星の位置天文情報とともに高精度で求められる。

JASMINE Simulatorの開発を開始

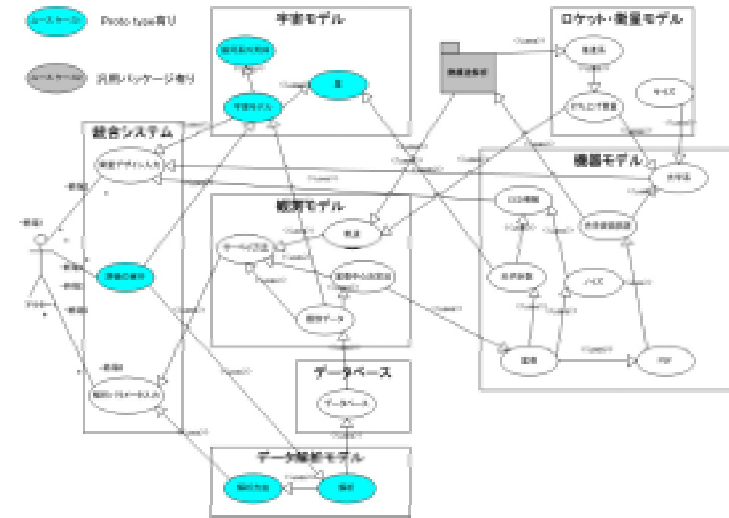
JASMINE 計画は、従来の位置天文観測より高精度であり、高度な技術と精密なシステム設計が要求される。また、観測する星の数もけた違いに大きく、データ解析方法の工夫も必要である。さらに、システム全体の検討には様々な部分の仕様設計が複雑に絡んでいる。そこで、システム全体の設計やデータの誤差評価等のために、衛星仕様、光学系仕様、検出器仕様、データ伝送仕様、データ解析手法仕様、銀河系の模擬カタログ等を統合したシミュレーターの開発が必要である(図8参照)。

* オブジェクト指向技術、UML(Unified Modeling Language)によるプログラムデザインを計画している。こういった、ソフトウェア工学の技術を取り入れて、効率良く、かつ再利用性や拡張性に優れたシミュレーターを開発する。これにより、まずはプレリミナリーだが、JASMINE の全体的なシステムを構築していくことができる。さらに、JASMINE 計画の進展に役立つだけに留まらず、今後衛星計画を考えている全てのプロジェクトで、システム開発の共通的な要素に関しては、必要最小限の修正だけで利用可能な、シミュレーションソフトウェアが構築できることも期待される。

図 8 : シミュレーションにおけるデータの流れ



ユースケース図の例



§9 その他の検討課題

(1) 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、2次元の位置出力で、平均的に約 880kbps

(2) 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 で約 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、JASMINE 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？

来年に JASMINE に関する詳細なレポート (first proposal) を提出予定

2003年2月～3月頃開催予定

(I) アstrometri 衛星 WG の会合 (参加自由)

(II) サイエンスワークショップ (参加自由)

ご参加をよろしく御願います。

§10 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strometri 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 + ILOM 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、ILOM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、冢 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！**