



宇宙論・重力・銀河、 そしてJASMINE

JASMINE : Japan Astrometry/photometry Satellite Mission for INfrared Exploration

郷田直輝（国立天文台JASMINEプロジェクト）



目次

I. 宇宙論から位置天文学へ

I-1 宇宙論への興味

I-2 自己重力多体系への興味

I-3 宇宙論的視野での銀河形成への興味

I-4 そして位置天文学へ ～JASMINE計画～

II. JASMINE計画の誕生

II-1 日本での位置天文観測（近世～20世紀末）

II-2 なぜ日本でも位置天文観測衛星をやろうと思ったか？

III. JASMINE計画の歩み

III-1 (大型) JASMINEとNano-JASMINEのスタート

III-2 Nano-JASMINEのその後

III-3 大型→中型→小型へ

III-4 JASMINEへの期待

IV. おわりに

I. 宇宙論から位置天文学へ

I-1(1). 宇宙論への興味

プロローグ

★小学生のときから天文学には強い興味

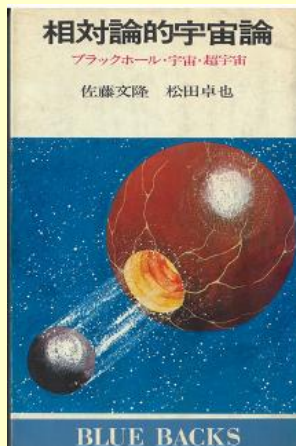
* 広島市の楽々園にあったプラネタリウム観覧など

★高校時代(1970年代後半):

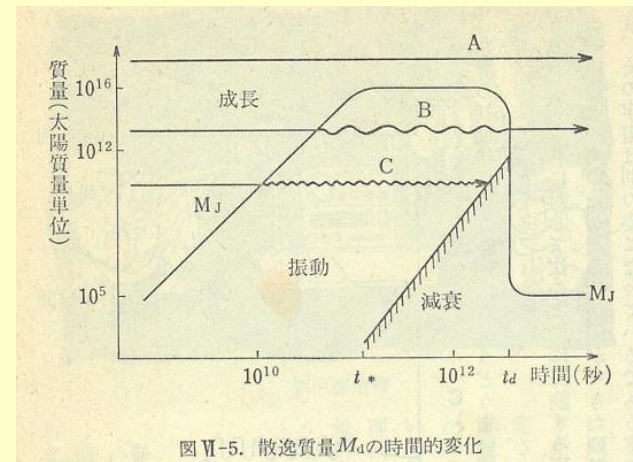
* 講談社ブルーバックスなど

「**相対論的宇宙論**」 佐藤文隆・松田卓也著
他、相対論関係の一般向け書籍

* **アインシュタイン生誕100年記念(1979年)**に向けて、NHKでBBC制作の宇宙の番組など放映



講談社ブルーバックス
「相対論的宇宙論」
佐藤文隆・松田卓也著
より



図Ⅵ-5. 散逸質量 M_d の時間的変化

I-1(2). 宇宙論への興味

★学部生、大学院生、京大・阪大の教員時代

純粋な“理論屋”

1.宇宙背景放射(CMB)の温度ゆらぎと物質の密度ゆらぎの解析

* 修論→ゲージ不変形式による一般相対論的摂動方程式を用いた、膨張宇宙における密度ゆらぎの解析

* 負の空間曲率をもった宇宙における、宇宙の晴れ上がり時でのCMBの温度ゆらぎの多重極展開係数の値から現在値を実際的に求めることができる評価式の数学的導出

* COBEが世界で初めてCMBの温度ゆらぎを検出(1992年)

ApJ396 L1 2006年ノーベル物理学賞

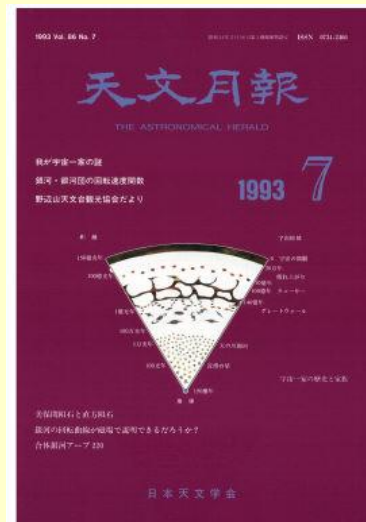
STRUCTURE IN THE COBE¹ DIFFERENTIAL MICROWAVE RADIOMETER FIRST-YEAR MAPS
G. F. SMOOT,² C. L. BENNETT,³ A. KOGUT,⁴ E. L. WRIGHT,⁵ J. AYMON,² N. W. BOGCESS,³ E. S. CHENG,³
G. DE AMICI,⁴ S. GULKIS,⁶ M. G. HAUSER,³ G. HINSHAW,⁴ P. D. JACKSON,⁷ M. JANSSEN,⁶
E. KAITA,⁷ T. KELSALL,³ P. KIEGSTRÄ,³ C. LINDEWEAVER,² K. LOEWENSTEIN,⁷ P. LUBIN,⁶
J. MATHER,³ S. S. MEYER,² S. H. MOSELEY,³ T. MURDOCK,¹⁰ L. ROKKE,⁷
R. F. SILVERBERG,³ L. TENORIO,² R. WEISS,³ AND D. T. WILKINSON¹¹
Received 1992 April 21; accepted 1992 June 12

ApJ395 L59

SURVIVING COSMOLOGICAL MODELS AFTER THE DISCOVERY OF LARGE-ANGLE ANISOTROPIES OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND
NAOTERU GOUDA
Department of Physics, Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto 606, Japan
AND
NAOSHI SUGIYAMA
Department of Physics, Faculty of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113, Japan
Received 1992 May 4; accepted 1992 June 10

Gouda & Sugiyama (1992)

様々な構造形成モデルの是非を解析



天文月報1993年7月号より 5

I-1 (3). 宇宙論への興味 *興味は段々と線形から非線形へ

2.宇宙の大構造(パターン形成):膨張宇宙における密度ゆらぎの非線形成長とカタストロフィー理論の関連

1. 膨張宇宙での密度ゆらぎの非線形成長:密度ゆらぎのパワースペクトルや2体相関関数

→最初の密度の発散(caustics)が起こった後は、比較的小さなスケールでのべき指数は初期条件にはほとんど依存しない。

カタストロフィー理論によって分類されている密度の発散のタイプによって決まる

2. 膨張宇宙での1次元自己重力系での密度ゆらぎのパワースペクトルの非線形成長:広いダイナミックレンジにおけるパワースペクトルの成長率や関数形の時間発展についての解析

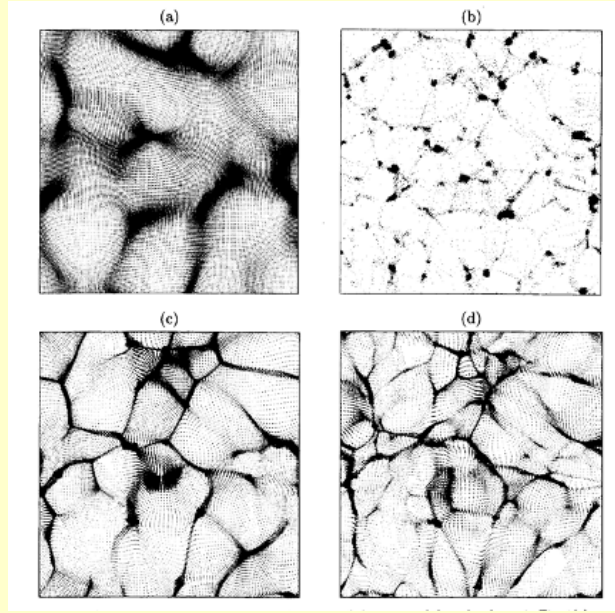
最近の研究から

膨張宇宙での密度ゆらぎの非線形成長とカタストロフィー理論
郷田直輝 (京都大学理学部物理学第二教室 606 京都府京都市北白河)

§1. 宇宙の大域的構造の形成問題
銀河団や超銀河団、そして大空洞などの宇宙の大域的構造がいかにしてつくられたのか、という問題は未だに明確にはされていない宇宙論における重要な課題の一つである。標準的銀河形成モデルでは、宇宙の初期にならぶかの原因で生じた小さな密度ゆらぎが重力不安定性によって成長して、現在観測されているような銀河やそれが集団化した銀河団などが形成されたと考えられている。従って、宇宙の大域的構造の形成問題を解明するためには、膨張宇宙における密度ゆらぎの成長の物理過程を明確にすることが重要な課題である。

ところで、銀河分布の形態を定量的に表現する量の一つとして銀河の密度分布の二体相関関数と呼ばれるものがある。「観測」や数値実験等の結果によると、重力の非線形成長が起きている小さなスケールでは二体相関関数はおおよそべき則に従うことが知られている。べき則に従うのは、重力が銀河間相互作用や長距離力ではあるが実効的にはパウゼによる「物理的」な力を持つ「電磁相互作用」とは違って、特徴的なスケールを持たないことに起因する。そして、密度ゆらぎの成長に関する重力の効果をもたらす特徴的な物理量の一つとしてはべき則に従うときのべき指数の値があげられる。従って、密度ゆらぎの重力不安定性による成長の物理過程の解明のためにはこのべき指数に対しての理解が非常に重要であると思われる。ところが、この問題に対しては過去にいくつかの議論¹⁾もあるが、まだはっきりとした結果は得られていない。そこで、無衝突で熱的な速度分散のない物質からなる膨張宇宙における理想的な自己重力系での密度ゆらぎの成長を解析し、次にその結果をカタストロフィー理論から分析した。その結果、一次元系や球対称系などの対称性のある自由度の少ない系での密度ゆらぎの「フェーズ」空間や二体相関関数のべき指数は、密度ゆらぎの初期条件にはほとんど依存しない。そしてこのべき指数はラグランジュ写像と呼ばれるものの発散のタイプに依って決まるということが分かった。ここではこの解析結果について詳しく述べることにする。

§2. カタストロフィー理論とラグランジュ写像の発散のタイプ
先ず、カタストロフィー理論について簡単に説明することとする。カタストロフィーとは、徐々に変化する状況(コントロール空間)の中で突然発生する系の状態(状態空間)の不連続変化のことをい、カタストロフィー理論はトムの定理と呼ばれる数学的定理が中核をなすものであるが、トムの定理とは、ある条件下では、「不連続性」は初等カタストロフィーと呼ばれる七つの基本的形態に分類できるということである。もう少し詳しく述べる。いま、考えられている系は状態空間と外性のパラメータ(コントロール変数)の関数として与えられているある「ポテンシャル関数」によって記述できるとする。ポテンシャルとは例えば、相転移が起こる系を扱うときは系の自由エネルギーに当たる。コントロール変数を固定したとき、システムが実現する状態(変数)が、このポテンシャル関数を極小化(または極小化)するように決定される。従って、カタストロフィーとはコントロール変数を動かしたとき、実現されている状態が、コントロール変数のある値(特異点と呼ばれる)で不連続的に変化する現象をいう。いま、このポテンシャルが構造安定とする。構造安定とは物理的に簡単に言うと、このポテンシャルをもつシステムにポテンシャルの小さな摂動が加わっても、このシステムの定性的な振舞、特等カタストロフィーが起こる状態での摂動が、摂動が起きている場合と同じことを言う。数学的には特異点の構造安定の場合である。トムの定理は「システムが構造安定な場合のみ、カタストロフィーが起こる特異点でのポテンシャルの関数形は適当な座標変換を行うとある単純な多項式の原点付近の関数形に一致する」というものであり、その多項式は必ずコントロール変数の関数(4次以下)に限定して有有限級に分類されている。²⁾ ところで、このカタストロフィー理論に対してラグランジュ写像の発散のタイプの分類ができていて、³⁾ ラグランジュ写像とはラグランジュ座標 x からオイラー座標 x への写像であり、そしてこの写像の発散とは、この写像のヤコビアンが0となることである。また、発散が起こる点を特異点と呼ぶ。発散のタイプの分類はこのラグラン



物理学会誌1990年
45巻より

Gouda (PTP, 1998)

I-2(1). 自己重力多体系への興味

★学部生時代

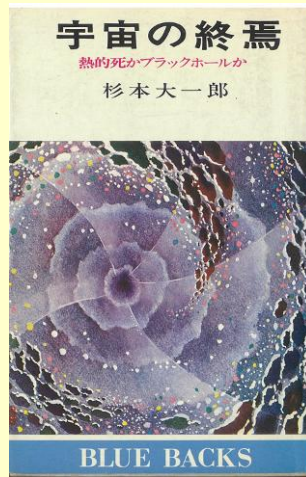
卒業研究 => 指導教員：稲垣省五（京大・宇物）

1. 重力熱的破局 (gravothermal catastrophe)

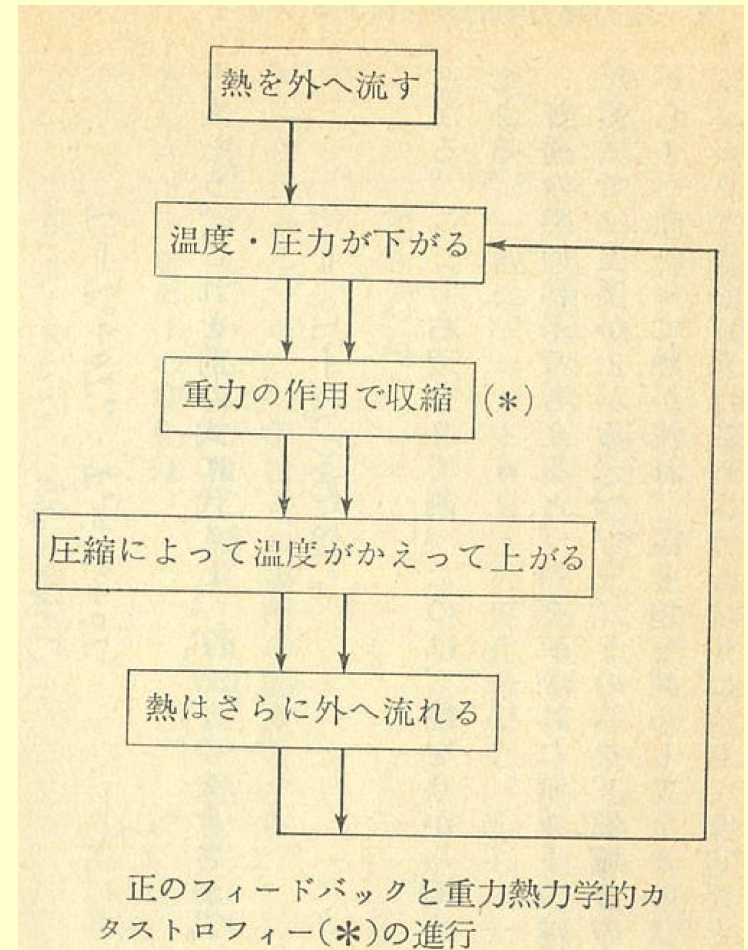
* 自己重力系は見かけ上、比熱が“負”

* エントロピー増大 → 一様化ではない
非一様な構造をつくりうる

* 非一様な構造の維持、進化
→ 開放系でのエントロピー放出
(ネグエントロピー取得)



講談社ブルーバックス
「宇宙の終焉」
杉本大一郎著より



I-2(2). 自己重力多体系への興味(続)

2. 恒星系力学:

自己重力多体系の力学構造・緩和過程と カオス理論との関連

★1次元自己重力多体系(シート系)

- ・安定カオスの発現、状態の遷移(カオス的遍歴現象)
→非線形物理学の分野と密接に関連
- ・熱平衡に至るまでの膨大な時間尺度
- ・カオス性の自由度(シート数)依存性
- ・遷移する状態の相似性→位相空間のフラクタル構造

J. Plasma Fusion Res. Vol.87, No.7 (2011) 441-448



小特集 長距離相関による自己組織化

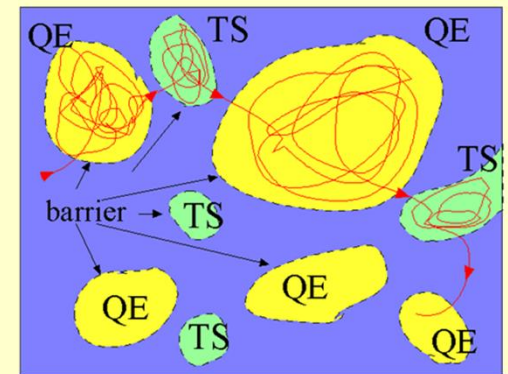
4. 重力多体系での自己組織化

郷田直輝

自然科学研究機構国立天文台 JASMINE 検討室

(原稿受付: 2011年2月15日)

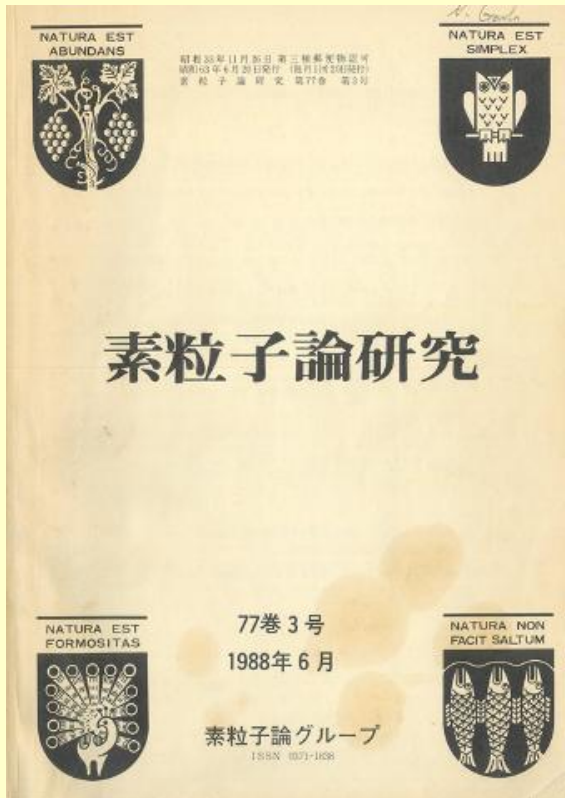
宇宙には広大なスケールに渡って様々な天体が存在し、階層構造を形成していることがわかっている。これらの天体の形成過程や力学構造等を解明することが宇宙物理学の大きな課題の一つである。この課題の解明のためには、長距離力である重力が運動を支配している重力多体系での緩和過程、(準)平衡状態、定常状態の安定性などの物理的特徴、つまり重力多体系の“自己組織化”の解明が重要となる。本章では、短距離力が支配している通常の気体などの系における緩和過程と重力多体系との違いを中心に、重力多体系での“自己組織化”に関して説明する。



プラズマ核融合学会誌
2011年87巻より

I-2(3). 自己重力多体系への興味(続)

大学院生(D2)のときに研究会@京大基礎物理学研究所を主催 「天体現象と非線形・非平衡物理」



基研短期研究会『天体現象と非線形・非平衡物理』報告
(野大京) 誌 編者
(野大京) 誌 富安・阪本編者 (1988年3月4日受理)

標記研究会が1987年11月13日(金)から15日(日)の3日間、京都大学基礎物理学研究所で開催された。

天体現象においては、重力が本質的な役割を果たし、系が非線形なふるまいを示したり、非平衡状態にあることが多くみられる。しかしながら、今まで、天体物理においてはそのような天体現象をそれぞれ別々に取り扱って研究する事が多かった。最近、物性物理のほうで非線形・非平衡物理が発展してきており、これらの観点から天体現象を統一的にとらえ直す必要があると思われる。すなわち、新しく登場してきた非線形・非平衡物理(カオス、フラクタル、scaling law、散逸構造、パターン形成、etc.)の概念や手法が今後、いろいろな天体現象の解明の大きな手段になると期待される。また逆に天体でしかおこらない現象(自己重力が本質的な役割をする等)が非線形・非平衡物理に質的に新しいものを付け加え、大きなインパクトを与えることができると考えられる。

本研究会は天体現象を非線形・非平衡物理の観点から捉え、天体物理の研究者のみならず物性・統計物理学等の研究者も参加し、天体物理と非線形・非平衡物理とを相互発展させていくことを主たる目的として企画された。具体的には、

- (1) 重力多体系
(自己重力系の力学的進化・緩和過程、重力不安定性、天体の軌道運動とカオス、大自由度力学系)
- (2) パターン形成・散逸構造・フラクタル
(宇宙の大局構造、銀河の渦巻構造、膨張宇宙での密度ゆらぎ、カタストロフィ、パターン形成と統計力学、フラクタル)
- (3) 少数自由度系でのカオス
(天体における散逸系でのカオス、カオスと時系列解析)

の3つのテーマにそれぞれ一日づつ費やし、まず天体物理および物性・統計物理学でのその分野の専門家によるReviewにより相互理解をはかったあと個別の問題を議論した。また世話人の不手際により研究会の日程が当初計画していたものと食い違い、参加者にご迷惑をかけたことをお詫びします。プログラムは以下のとおりである(○はReview)。

★11月13日(金)
はじめに … 郷田直輝(京大理)
○天体と非線形・非平衡物理 … 杉本大一郎(東大教養)
○自己重力系の力学的進化 … 稲垣省五(京大理)
○大自由度力学系 … 武末真二(東大教養)

◇世話人

杉本大一郎(東大教養)、海野和三郎(近大理工総合研)、川崎恭治(九大理)、池田研介(京大基研)、池内 了(東京天文台)、稲垣省五(京大理)、高安秀樹(神大理)、阪上雅昭(京大基研)、郷田直輝(京大理)

I-3. 宇宙論的視野での銀河形成への興味

銀河形成：準解析的方法による解析

天文月報2000年2月号より

銀河形成問題の行方 ～宇宙論から位置天文まで～

郷田直輝

〈国立天文台 位置天文・天体力学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

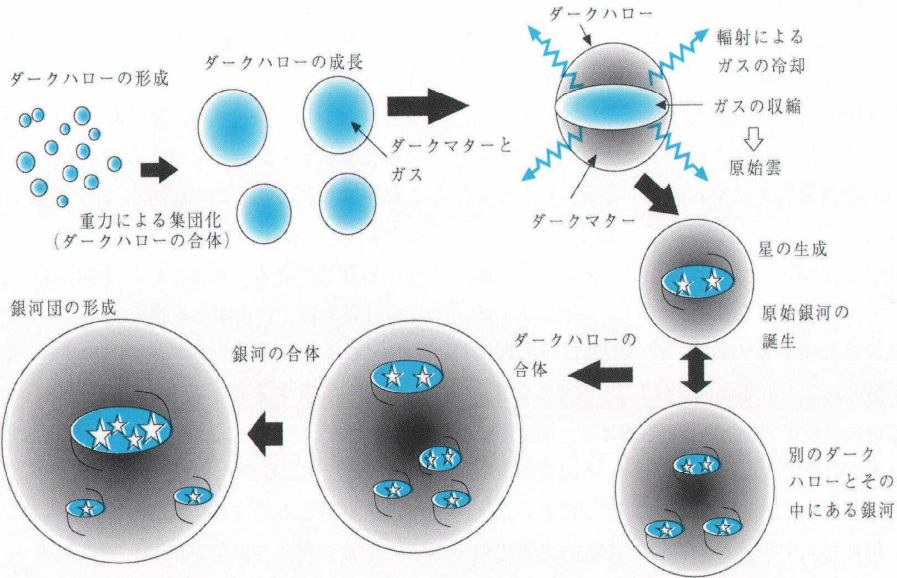


図2：階層的集団化説に基づく銀河形成のシナリオを模式的に描いたもの⁷⁾。

銀河形成の“レシピ”

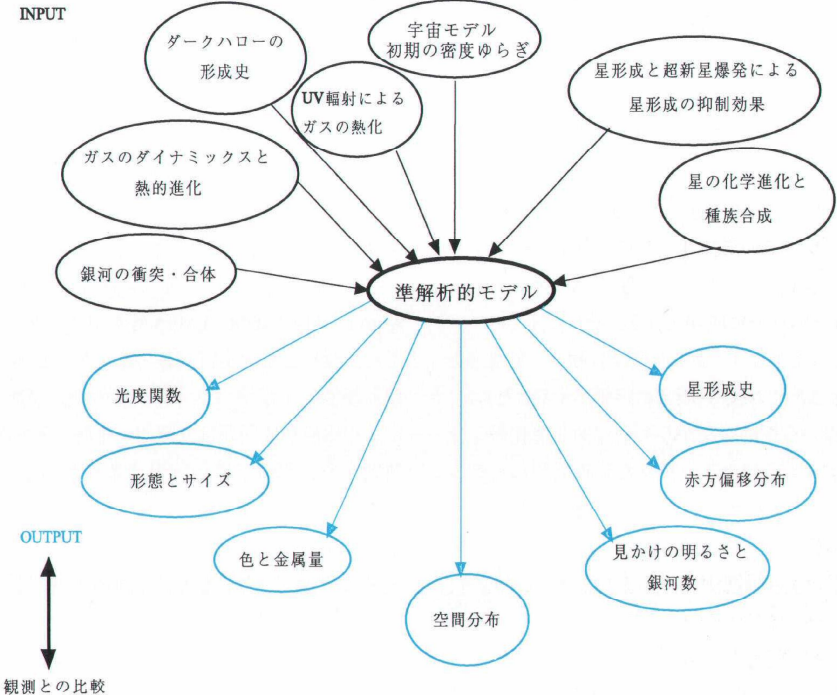


図3：準解析的モデル (SAM) の働きを表すレシピ

I-4. そして位置天文学へ～**JASMINE計画**～



赤外線位置天文観測衛星JASMINE計画の推進

1(1). 現在のJASMINEの概要

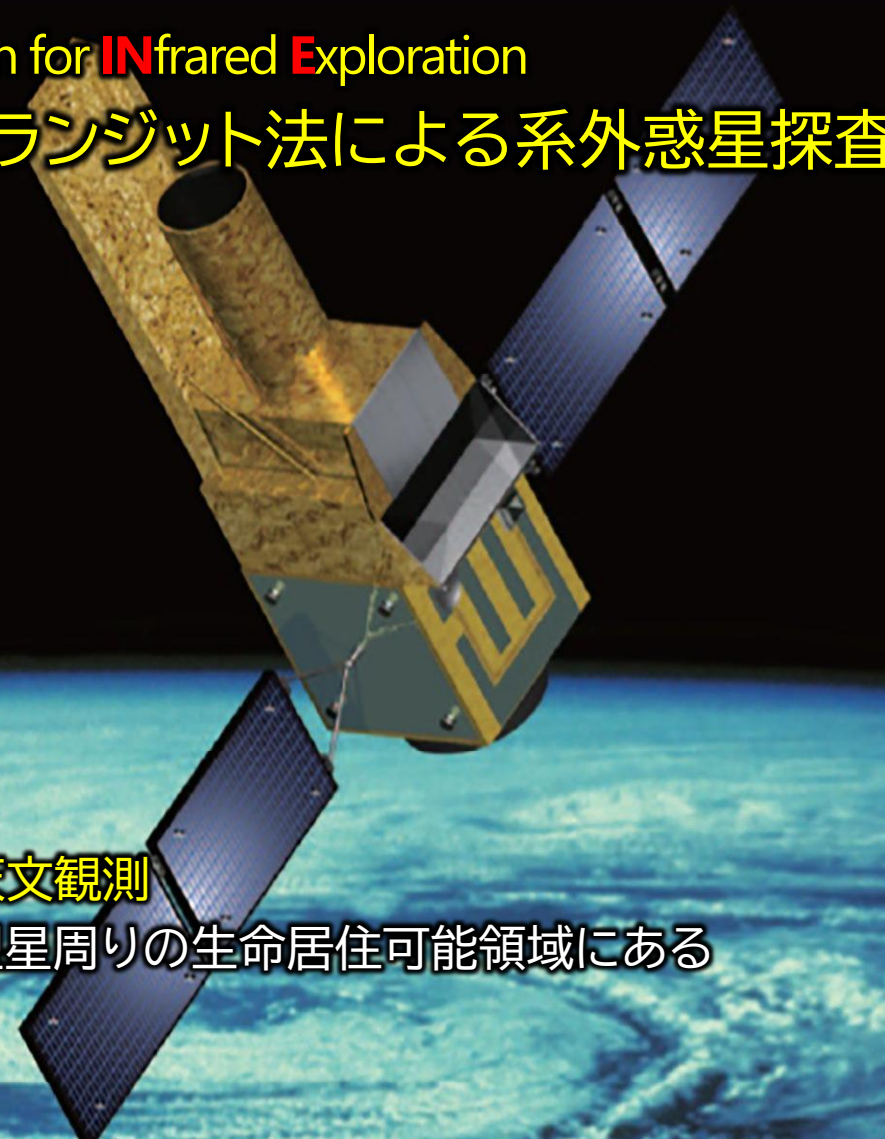
JASMINE: **J**apan **A**strometry **S**atellite **M**ission for **I**Nfrared **E**xploration

高精度赤外線位置天文観測及びトランジット法による系外惑星探査

- 口径36cm程度 超高安定望遠鏡
- 国産赤外線検出器(InGaAs)
 - ・ 観測波長:0.9-1.6 μ m、2k \times 2k画素 \times 4
- イプシロンSロケットによる打ち上げ
(JAXA宇宙研の公募型小型計画3号機)
- 衛星重量540kg程度
- 太陽同期軌道・高度570km程度、3年間観測

JASMINEのアウトプット

- 春と秋期→銀河系中心核領域方向の**位置天文観測**
- 夏と冬期→**トランジット観測**による中期M型星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星の探査



1(2). 現在のJASMINEの概要

★JASMINEのアウトプットデータ

* 銀河系中心核領域方向の天球面上の星の位置変動の時系列データ
 → 星の年周視差、固有運動等のカタログ作成。世界の研究者へ公開。
 さらに、系外惑星探査対象天体の時系列測光のデータカタログの公開。

春と秋期:

銀河系中心核領域方向のサーベイ

12. 5秒間程度(TBD)撮像し、
 ~10等級<“JASMINEバンド”(0.9~1.6 μ m)<~14.5等級の
 約12万個以上の星を切り出して、地上にダウンロード

“JASMINEバンド”~0.9J+0.1H-0.06(J-H)²

10周回に1回程度の割合で1枚フルフレームをダウンロード

年周視差精度: 25マイクロ秒角~125マイクロ秒角 (25 μ 秒角=>銀河中心での距離の誤差が20%に相当)

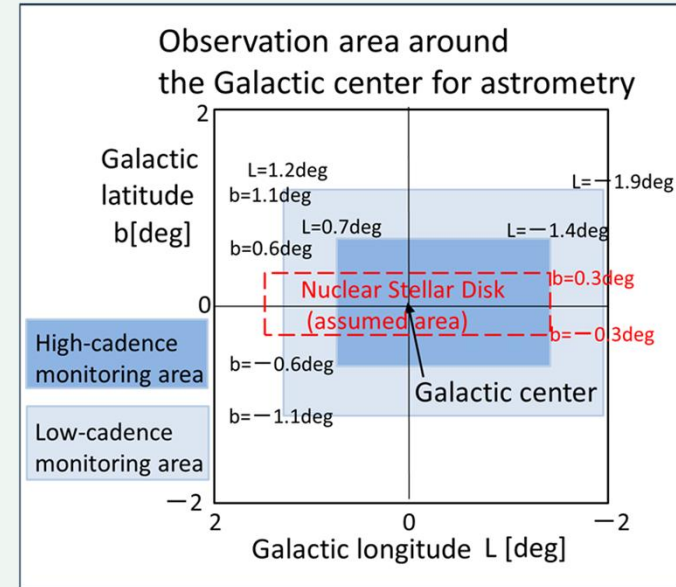
固有運動精度: 25マイクロ秒角/年~125マイクロ秒角/年 (銀河中心での接線速度の誤差が1km/s~5km/s)

Cf. Low-cadence monitoring area → 35 μ as (μ as/y)~180 μ as (μ as/y)

夏と冬期:

系外惑星探査を目的としたターゲット天体の時系列測光観測

17個以上の対象天体に対して、トランジットの減光率が0.3%程度以内を測定できる測光精度の時系列測光データ(1つの対象に対して観測期間が2-5週間以上)



宇宙基本計画工程表(令和7年度改訂)より抜粋

内閣府宇宙戦略開発本部(首相が本部長)が決定

(3) 宇宙科学・探査における新たな知と産業の創造

年度	令和5年度 (2023年度)	令和6年度 (2024年度)	令和7年度 (2025年度)	令和8年度 (2026年度)	令和9年度 (2027年度)	令和10年度 (2028年度)	令和11年度 (2029年度)	令和12年度 (2030年度)	令和13年度 (2031年度)	令和14年度 (2032年度)	令和15年度以降
8 宇宙科学・探査①	JAXAの宇宙科学・探査ロードマップについて必要な見直しを行う[文部科学省]										
	【宇宙物理学】 大型の海外計画への、存在感を持った形での参画を目指す。JAXAや宇宙物理学分野の研究者のコミュニティが一体となった協力体制の構築、国際動向の情報収集、長期戦略の立案による、技術開発を推進。国際的な大型計画とも相補的かつ独創的・先鋭的な技術を活用し、科学的にユニークな中・小型のミッションの創出を目指す[文部科学省]										
	X線分光撮像衛星(XRISM)の開発 運用 打上げ										
	マイクロ波背景放射偏光観測宇宙望遠鏡(LiteBIRD)の開発 運用 打上げ										
	主として公募により実施する小型計画に基づく衛星・探査機(2年に1回) 赤外線位置天文観測衛星(JASMINE)の開発 運用 打上げ										
	戦略的海外共同計画										
	Nancy Grace Roman宇宙望遠鏡への参画 運用 打上げ										
	系外惑星大気赤外線分光サーベイ衛星計画(Ariel)への参画 運用 打上げ										

★現時点での推進体制

JAXA宇宙科学研究所

片坐宏一(プリプロジェクト候補チーム長)、河原創、臼井文彦、磯部直樹、近藤依央菜、鹿野良平(クオアポ)、高橋 葵、笠木 結(3/1~京大)、宮川浩平、多田将太郎、富田洋、与賀田佳澄、篠宮 優、峯杉賢治、太刀川純孝

国立天文台 JASMINEプロジェクト

プロジェクト長: 鹿野良平(2024.10.1~)
郷田直輝、和田武彦、服部公平、辻本拓司、矢野太平、上田暁俊、三好真、大澤亮、鹿島伸悟、宇都宮真、間瀬一郎、Ramos, Pau、細川 晃、坂元祐志、浅利一善

E2Eシミュレーショングループ(データ解析WG)

大澤亮(代表)、河田大介(UCL)、山田良透(京都大学)
上塚貴史、福井暁彦(東京大学)、平野照幸、大宮正士(ABC)、逢澤正高(SJTU)、鈴木大介(阪大)、泉浦秀行、服部公平(統数研)、立川崇之(高知工専)、吉岡諭(東京海洋大)
+ISAS/JASMINEメンバー +NAOJ/JASMINEメンバー

国立天文台 先端技術センター

技術主幹: 鶴澤佳徳
センター長・技師長: 平林誠之、満田和久(スペースラボ)、尾崎正伸(エレキ)
都築俊宏 & 小原直樹(光学)、大淵喜之 & 浦口史寛 & 清水莉沙 & 池之上文吾 & 森田正規(熱構造)
東谷 千比呂(衛星システム)

国立天文台天文データセンター

古澤久徳(センター長)、高田唯史、白崎裕治

位置天文サイエンスコアチーム

西山正吾(チーム長: 宮城教育大)、松永典之(東大)、川中宣太(都立大)、河田大介(UCL)、林 航平(仙台高専)、郡 和範、服部公平、矢野太平、郷田直輝(NAOJ)

系外惑星探査チーム(トランジット観測による地球型惑星探査等)

河原 創(チーム長: ISAS)、増田賢人(阪大)、小玉貴則、福井暁彦(東大)、葛原昌行、大宮正士、小谷隆行、平野 照幸(ABC/NAOJ)、山田亨(ISAS)、他

JASMINE Consortium

WG-A(Data Analysis)、WG-B(Science Validation and Preparation)、WG-C(Outreach)
リーダー: 河田大介 (MSSL/UCL)、国内外60名の研究者(2021年4月現在)

データ解析

国際協力

地上局

ARI Heidelberg University

Michael Bierman, Wolfgang Löffler

Technische Universität Dresden

Sergei Klioner

ESA



II. JASMINE計画の誕生

II-1 日本での位置天文観測（近世～20世紀末）

子午儀と子午環の例：国立天文台（旧東京天文台）@三鷹キャンパス 関連
写真のクレジットはNAOJ

JASMINEの“ご先祖様”



○レプソルド子午儀

1880年ドイツ製。海軍観象台→東京天文台。重要文化財。

1949年に日本で初めての本格的観測星表である
「三鷹黄道帯星表」が出版（国際的に評価された我が国初の本格星表）

@国土地理院



○ゴーチェ子午環

1903年フランス製。

終戦後、太陽系天体の位置観測データの提供で国際的に高く評価。
1961年以降、国際天文学連合第8委員会（位置天文学）からの要望
もあり、南天標準星国際共同観測に参加し、その成果は、米国海軍
天文台によりSRS星表として集約され、活用された。
また、国際協力で1980年代に基本星表FK5星表として集約。



○自動光電子子午環

1982年完成。ドイツ製。眼視観測→光電化

約35000星に対し有効観測回数20万回の観測。
観測星表は“Ten Years of the Tokyo PMC”として出版



II-2(1) なぜ日本でも位置天文観測衛星をやろうと思ったか？

★ヒッパルコス衛星による”革命“

1989年～1993年:運用

1997年:ヒッパルコスカタログ公開

○精度(1ミリ秒角レベル)、個数(12万個)とも従来の地上観測と比較して、1桁以上の向上！！→位置天文学の“革命”

○“単なる星表作り”からの脱却→天体物理学へ

* 20世紀になり天体物理学が勃興(素粒子・原子核論、相対論、X線・赤外線・電波観測等の活躍)→位置天文学は、あっても特別な意味は持たないが、なければ危険と揶揄されていた。

* ヒッパルコス衛星による精度向上により、天体物理学につながってきた。



しかし、
まだ小さな革命

★ヒッパルコス後の海外での位置天文観測 衛星計画

より大きな革命へ！



年周視差精度
1ミリ秒角
→距離の精度が
20%以内なのは
200pc(600光年)
程度

ドイツ:DIVA。可視光、3500万個、精度0.2ミリ秒角

米国海軍天文台:FAME。可視光、4000万個、50マイクロ秒角。

その後、AMEX→JMAPS

NASA: SIM 可視光干渉計、1万個、4マイクロ秒角(少数精鋭)

ESA: **Gaia** 可視光、全天サーベイ、15億個以上、最高精度は10マイクロ秒角クラス

日本は？

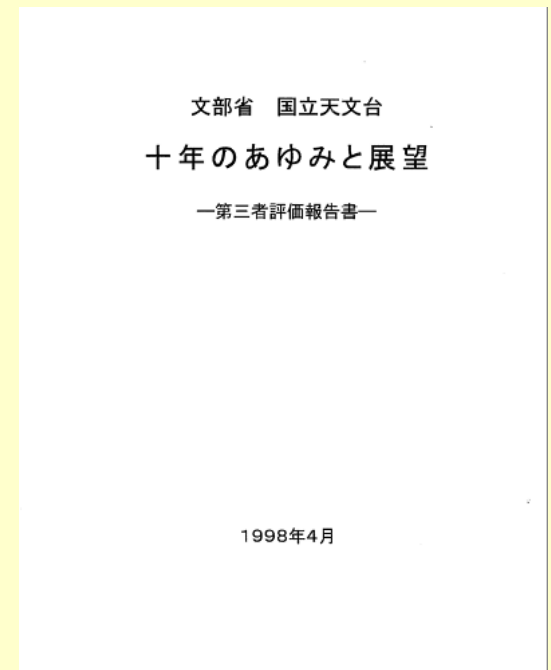
II-2 (2) なぜ日本でも位置天文観測衛星をやろうと思ったか？

★国立天文台第3者評価と人事公募

1997年度に行われた国立天文台第三者評価委員会からの国立天文台への検討推進勧告：

「ヒッパルコスの成果を踏まえて位置天文学の将来を見据えたとき、スペースアストロメトリ計画の実現の可能性を真剣に検討すべきであろう。」

→国立天文台ではスペースからの位置天文観測を推進する教授を公募し、郷田が1999年4月に着任した。



○郷田のそれまでの専門分野

専門分野

大学院生や大学での教員時代：もともとは理論的研究
（“理論屋さん”）

○宇宙論：宇宙背景放射の温度ゆらぎと宇宙の大構造形成

○銀河の形成と進化

○自己重力多体系（銀河や星団など）の非線形現象

（力学構造、緩和、カオスの遍歴現象など）の解析

II-3(3) なぜ日本でも位置天文観測衛星をやろうと思ったか？

○何故、応募したか？

* 宇宙論から：

遠方の銀河までの距離→一番土台になっている年周視差観測による、銀河系内の星までの距離がまだよく分かっていない！

→その重要性和必要性に気づく。

ヒッパルコスの結果を使うとセファイド変光星の明るさが従来の想定より明るい
→大マゼラン星雲までの距離。10%遠い?! :

解析方法により、20%の不定性あり→ハッブル定数など宇宙論パラメーターに大きく影響

* 自己重力多体系から：

銀河内の星の軌道は？どういう力学構造なのか？

太陽系より大きなサイズの自己重力多体系に関しては知られていない

* 日本が独自に観測データをもつことの重要性←宇宙背景輻射の温度ゆらぎ研究での経験

* プロジェクトへのあこがれ(?!)

* 個人の研究背景としてはつながっているが。。。

* ヒッパルコスの成果と今後の計画への期待により、天体物理をやっていた人間が参入できる土壌が出来つつあり、推進される雰囲気が増えてきた。

II-3(4) なぜ日本でも位置天文観測衛星をやろうと思ったか？

★どう進めたか？ ～ゼロからのスタート～

○プロジェクトはどうやって始めるの??

○赤外線位置天文観測の検討開始

* 宇宙研(赤外線天文グループ)を訪問

→海外では計画されていない赤外線で!

* 最初は、4名で勉強会を立ち上げ。

位置天文観測って、どう観測するの?というレベルから。。

* FAME, Gaiaを見本

とにかく国際会議へ。海外の専門家とつながりを!

➡ 世界は、見ず知らずの日本グループを暖かく迎えてくれた

今から考えると、日本の近代化と共に西欧の天文学に

伍して位置天文観測の国際協同観測に参加してきた

先達の実績、信頼がベースにあったお陰ではないかと思う。

II-3(5) なぜ日本でも位置天文観測衛星をやろうと思ったか？

○国内コミュニティへのアピール

* Gaia等によって今後はすごい観測データが出る！

→天文学、宇宙物理学の広範囲の分野で関連
着任後、今さら位置天文をやるのですかと、よく聞かれた。



実際、現在、Gaiaによりすごい成果がどんどん創出中

* 日本は、Gaiaができないであろう、銀河系中心、天の川面を
赤外線で位置天文観測すると世界最前線となる！

最初の頃は、GaiaがあるのにJASMINEは必要なんですか？と、
よく聞かれた。



**実際、JASMINEが観測する中心核領域の星に対して、
JASMINEの目標精度をGaiaで達成できている星はほとんど無い**

* その頃、国立天文台では、水沢観測所が中心となり、位置天文観測専用の
電波干渉計VERA計画を推進中。

→VERAチームの皆さんからは、それ以降もなにかとサポートをいただいた。

* さらに、RISEチームとは、2ヶ月に1度程度の会合(情報や意見交換)、共同実験を
行い、大きなサポートをいただいた。

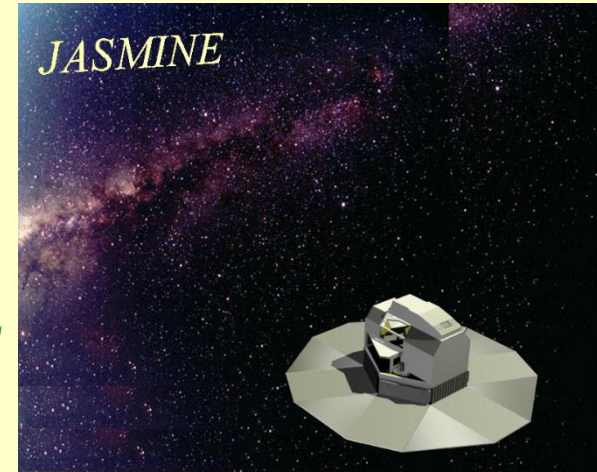
III. JASMINE計画の歩み

III-1 (大型) JASMINEとNano-JASMINEのスタート

○(大型)JASMINE計画の構想

Gaiaの最高精度を赤外線で実現！
銀河面(天の川面)を全面サーベイ！
観測手法は、Gaiaを真似る

現在のJASMINE
とは方式が全く
異なる



➡ 主鏡口径2m

当初は、いけいけどんどん?!。。。。

* 2003年4月: 当時のNASDA技術研究本部にサポート依頼。
JAXA統合の少し前。今後は、筑波と宇宙研と
共同で宇宙科学衛星開発を!



その後、数年続く毎月の会合により、衛星開発関係で
いろいろな勉強をさせていただけた。

○Nano-JASMINE計画のスタート

2002年度の国立天文台執行部からのアドバイス：
大きな衛星をやる前に小さいもので宇宙空間で実証を行う方が良いのでは？



2003年4月に超小型衛星開発を進めていた東大工学部中須賀研究室を訪問。
大型JASMINEの技術実証になるとともに、科学的成果も最先端を目指すことに。



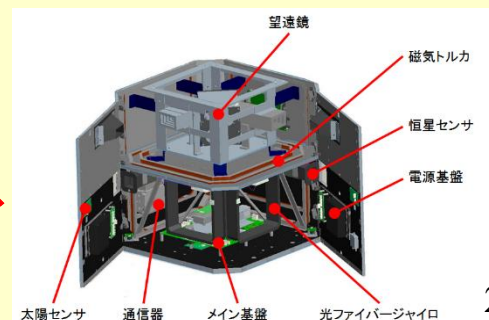
* 宇宙ステーション内での実験にも応募
→宇宙飛行士が動くと揺れるので、高精度な星像中心推定はできないと。

検討開始後、1年程度はお互いの“言葉”を理解するのに一苦勞。

* Nano-JASMINEの概要

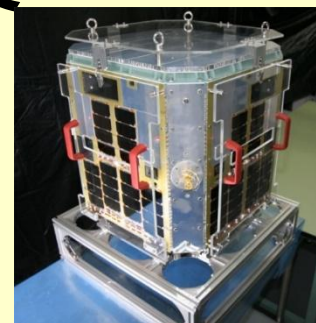
衛星外形	50×50×50cm	
質量	約35kg	
主鏡口径	5cm	ヒッパルコスと同程度の
観測精度	～3ミリ秒角	精度を！
観測波長	zw-band (波長域：0.6～1.0μm(ミクロン))	
観測等級	zwで9等級より明るい星	

Gaiaでは困難な明るい星(特に3等星以下)に対して、NJは、ヒッパルコスカタログとの組み合わせにより、固有運動の精度向上、長周期連星系の解析が可能。
当初は、Gaiaより早く打ち上がる予定だった



III-2(1) Nano-JASMINEのその後

- ミッション観測装置開発、データ解析システム開発、サイエンス検討など→NAOJが中心(+京大等)
- バス部、地上通信、打上げ・運用準備→中須賀研
- 学生、研究員が開発の中心(のべ40名程度)



↓

* 打ち上げ実機(FM)が、2010年10月にほぼ完成

↓

* ウクライナ政府とブラジル政府がほぼ半分ずつ出資したロケット打ち上げ会社(ACS社)により打ち上げが2011年8月に予定されていた。



↓

* ブラジルの射場建設が予算不足で進まず、何度か打ち上げ延期

↓

* ようやく射場の目処がつき、2014年12月～2015年12月の間で打ち上げ予定

↓

* 2014年4月にウクライナでNJ試験機による搭載試験が予定された。

III-2(2) Nano-JASMINEのその後

* 2014年2月にクリミア半島@ウクライナにロシアが侵攻。紛争状態になった。



* ウクライナでの試験は中止。今後の見通しがたたず。



* 2015年末までに打ち上げできず、契約解消。ACS社は事実上、倒産



* Gaiaメンバーの強力なサポートで、ESAによる無償打ち上げ(ピギーバック)の交渉が宇宙研の協力も得て進んだ。

現在のJASMINEとは方式が全く異なる

NJは、Nano-Gaiaでもある。
Gaiaチームより、Gaiaのデータ解析システムの事前実証のため、NJの生データの利用要望(2007年)
→その後、Gaiaチームの強力な協力によるNJのデータ解析システム構築



* ESA側の事情(親の親衛星の変更)により中止となった



* Gaiaメンバーの紹介で、新たに設立した海外の小型ロケット会社による安価な打ち上げで交渉、調整。

→数年前まではロケットは打ち上がっておらず、また安価では無理になった。

* FMの劣化、故障→2022年度にミッション終了

III-2(3) Nano-JASMINEのその後

* 打上げは残念ながらできなかったが、検討、開発で多くの業績、成果を理学側、工学側であげることができた。理学側は衛星開発の未経験者ばかりだったが、工学側と一緒に開発に加わり、大変良い経験ができた。

* 卒業論文、修論等で多数の若手教育にも貢献できた。

* Gaiaのデータ解析チームとの密な関係の構築。



(小型)JASMINEへの強いサポート、実際、データ解析システム開発への参加につながった。

海外では、当初は、NJも(大型)JASMINEも懐疑的。

ただ、出来る限りチームで国際会議に頻繁に出席し、

“やっているぞ”とアピール。段々とサポートしてもらえる雰囲気。

★ Nano-JASMINEの余生：アウトリーチで活躍！

* 打ち上げ実機 (FM)

→ 奥州宇宙遊学館にて展示

* 試験機 (EM)

→ 岐阜かがみはら航空宇宙博物館にて展示

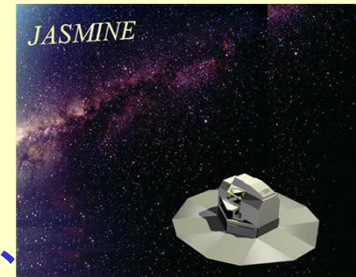


NJ企画展@奥州宇宙遊学館
(2023年7月)

III-3 大型→中型→小型へ

大型JASMINEのWG: 2003年10月発足@宇宙研

- * 主鏡口径 ~2m
- * 天の川全面
- * 工学の先生方@宇宙研への説明会
- * NASDA技研本部→JAXA SE推進室、研究開発本部のサポート



予算、技術、スケジュールも検討
→なるべく小型化をするのが望ましい。

2004年度～: 小型化したバージョンの検討を開始

→サイエンス目標を絞る、望遠鏡の小型化、新たな観測手法、システムへの新たな要求...

→中型衛星として、仕様検討、重要な技術課題の網羅、今後の見通しを立てる。

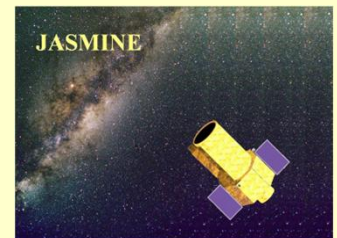
JAXA/SE推進室、研究開発本部の方達のご協力を得て、2007年5月から集中検討開始。

*IAU Commission 8(IAUS-S248)による中型JASMINE計画推進のお墨付き獲得

* Van Leeuwen氏(@ケンブリッジ大)による、中型JASMINEのレビュー(2008.3)→良い評価

中型JASMINEのWG: 2008年3月発足@宇宙研

- * 主鏡口径 80cm
- * バルジ領域のみ
- * JAXA SE推進室、研究開発本部、宇宙研工学のサポート



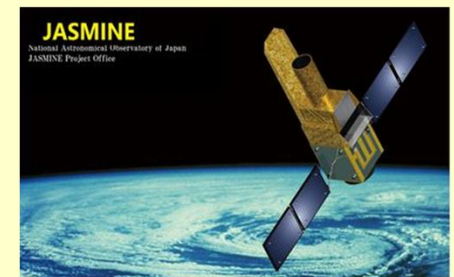
* 小型版の検討開始 (by 有識者の方達からのご意見、アドバイス)

* 目標、仕様、システムへの要求事項の大枠が決定

(小型)JASMINEのWG: 2009年1月発足@宇宙研

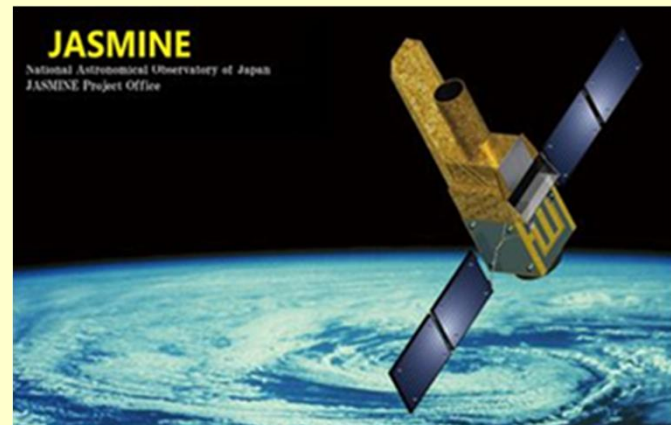
* 主鏡口径 30cm→40cm→36cm

* 中心核領域のみ



小型JASMINE→JASMINEに改名

- ・公募型小型計画1号機へのミッション提案
(2014.2)
 - 審査(2014.4)
 - 再審査(2014.6): 不採択(SLIMが選ばれる)



- ・公募型小型計画2号機・3号機へのミッション提案(2016.1)
 - 審査(2016.2-3)
 - データ解析に特化した審査会 (2017.3)
 - **国際審査**(2017.12)
 - 計画審査(旧MDR)(2018.7~2018.8)
 - CML4確認会
 - Pre-Phase A2終了確認会
 - ダウンセレクション審査(2019.5): **公募型小型3号機に採択！！**
 - 赤外線カメラは国産に方針変更: 宇宙用化開発
 - MDR(ミッション定義審査)通過(2024.7) → 現在に至る

★大型→中型→小型への変遷に関して

大型のときは、とにかく、Gaia程度での精度で、赤外線により広く→いろいろな成果が出せるから良いと。。。



小型化すると科学的成果に関しては、確かに汎用性は薄まっていく。



しかし、漠然としていた科学目標が精錬されていく。それに伴い、目標精度に関しても本当に必要な精度を詰めていくことになる。

III-4 JASMINEへの期待

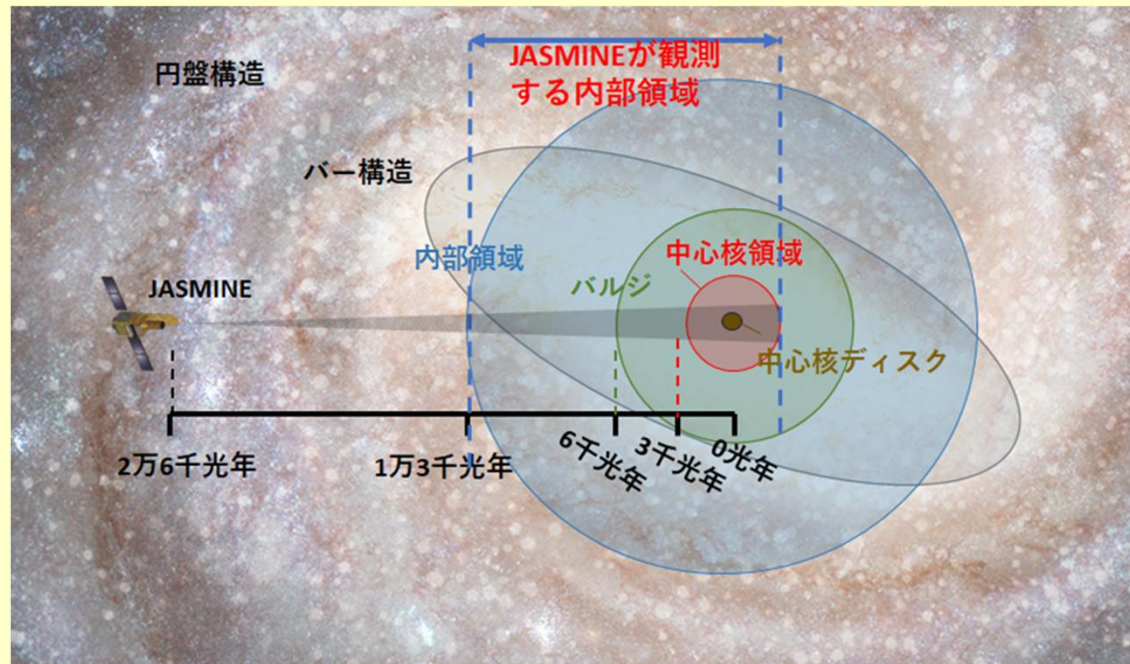
1. 位置天文観測によるサイエンスタarget

(1) 銀河系中心核ディスク(NSD)の解明

- ▶ 軌道構造
- ▶ 形成時期
 - バー構造の形成時期
- ▶ 内部バー構造の存在？
 - 中心巨大ブラックホールの成長
- ▶ NSD内での場所毎の星形成史

(2) 中心核楕円構造の解明

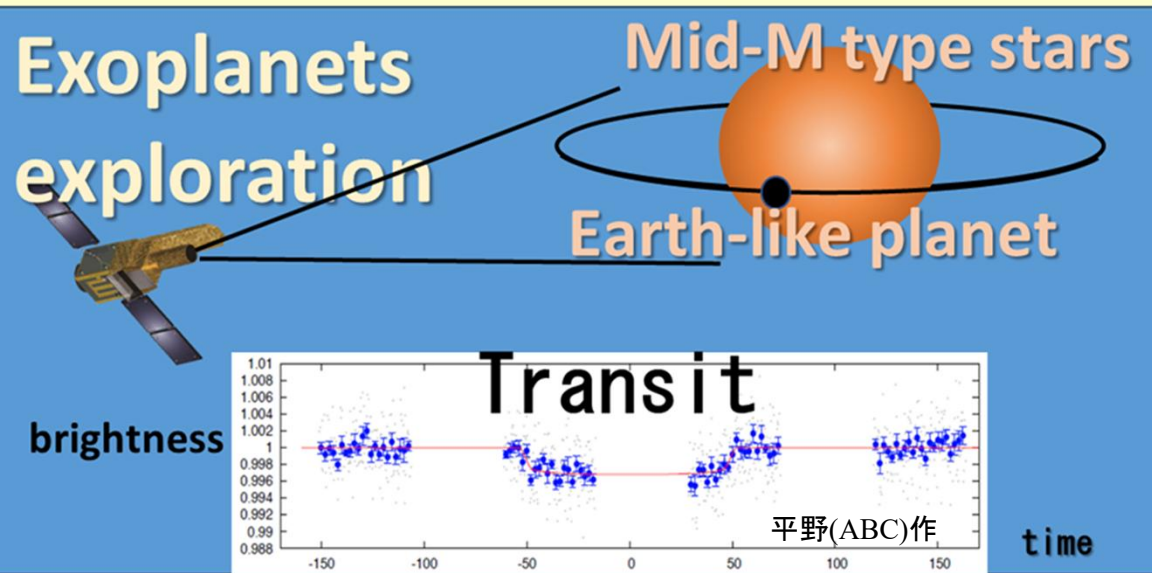
- ▶ 古典的バルジ？
 - 銀河系初期進化
- ▶ 複数の巨大BHが落下してきたことによる力学的影響？



(1)(2)は銀河系の3大イベントの解明へ進展

- その他：
- ・ 内部領域内におけるバルジ、バー、(内部)円盤といった各種構造の探究
 - ・ 中心核領域および内部領域内における宇宙解明の鍵を握る天体の探査

2:トランジット観測によるサイエンスターゲット 中期M型星周りの生命居住可能領域にある地球型惑星の探究



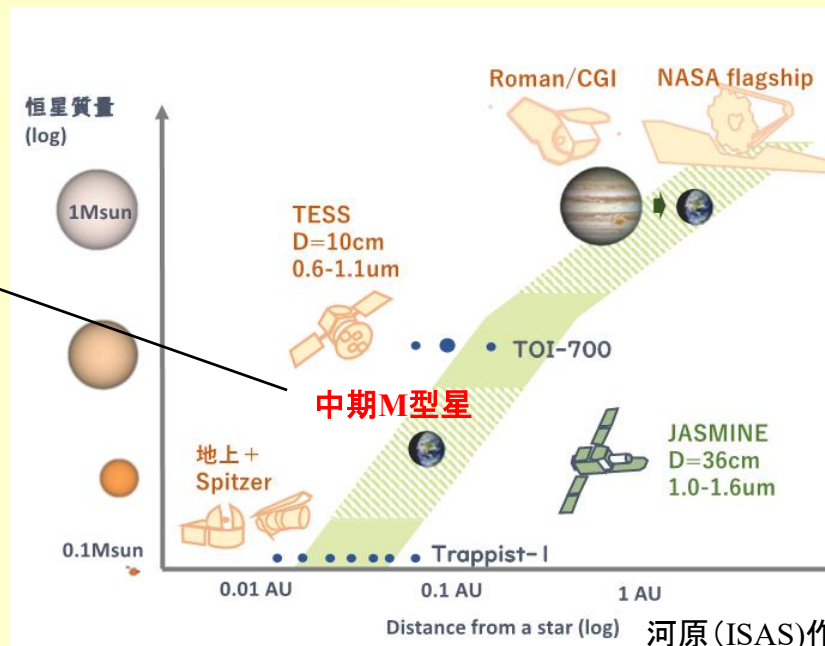
JASMINEの位置天文観測に要する性能があれば、生命探査に適した惑星発見の可能性あり！

JASMINEでのみ狙えるターゲットであり、他の衛星プロジェクトに対し有利

中期M型星：
3000K, 0.2 R_{sol}, 0.2 M_{sol}

*近赤外線観測が、光子数的にも恒星の活動に起因するノイズを抑えるのにも有利

*地球型惑星のトランジットの深さ
~0.3%



IV. おわりに

○JASMINEは、立ち上げから現在に至るまで紆余曲折。
遠回りもあったかもしれないが、経験してきたことは
大きい。

○“おもしろい”と言い続けることも大切。国内外で段々とサポート増

○様々な分野のいろいろな方達との出会い、交流が現在にも
大いに活かされていると感じる。

例 *JAXAやメーカ退職後、NAOJでの支援員に。
*Gaiaチームをはじめ、海外からの強力なサポート

Gaia-JASMINE Joint meeting(2016年12月)
の懇親会(屋形船内)での集合写真



○JASMINEの実現、成功は将来の位置天文での国際協力(ヨーロッパのGaiaNIRなど)での我が国のステータスの向上につながる

*戦前からの子午儀、子午環での国際協同観測による実績がJASMINEにもバックからのサポートになっていたかも。

いずれにせよ、個人的には、“二度の研究人生”を送らせてもらった感じで、楽しませてもらいました。

推歩

* 推歩とは、天体の動きを測ること

* 国立天文台ニュースNo.92
2001年3月号より抜粋

エッセー

推 歩

位置天文・天体力学研究室 教授 郷田 直輝



私は歴史が好きで、NHK 総合で放送している「その時歴史が動いた」を時々みている。先日(2000年11月1日)、伊能忠敬の話があった。ご存じのように、はじめて実測によって日本地図を作った人である。その事実は、学校でも習い、もちろん知ってはいた。しかし、忠敬の生い立ちとか、どんな人物であるのか、さらに、実際どのように地図を作ったのかなど、詳細は全く知らなかったのだが、このテレビ番組である程度知ることができた。興味をもったので早速、忠敬の生涯を綴った本を探して読んでみることにした(2000年11月に原稿を書いている私にとっては未来だが、読者の方は、2001年正月にNHKで放送がある「四千万歩の男 伊能忠敬」というドラマをご覧になり、忠敬について詳しい方もおられるかもしれない)。

伊能忠敬は、少年時代から天文学と数学に大変興味をもっていただろう。しかし、婿養子先の伊能家の家業である造酒業、醤油の醸造、水運業などを継がねばならなかった。忠敬は、隠居するまで、この第一の人生を精一杯尽くした。そして、隠居後、第二の人生を歩むことになる。夢にまでみた天文学をやるために江戸幕府天文方の高橋至時(よしとき)に弟子入りをするのである。時に、忠敬51歳、至時32歳である。当時、幕府天文方暦局は、浅草にあったようである。忠敬は、至時のもとで、天文学を熱心に学ぶとともに、深川の自宅に天文台を作り、自らも観測に動んでいた。毎晩、熱心に星の位置を測っていたようだ。この頃、忠敬には「推歩先生」というあだ名が付けられていた。推歩(すいほ)とは、天体の動きを測ることである。はじめは、年寄りの道楽と考えていた至時も、次第に忠敬の熱心さと有能さに感心するようになる。歳の離れた二人ではあったが、やがて、深い絆で結ばれるようになった。

当時、忠敬は日本人にとっては謎であった、地球の大きさを計測したいと考えていた。最初は、自宅のある深川と天文方のある浅草との距

離と北極星の見かけの高度差を用いて算定しようとした。しかし、高橋至時に一笑に付された。そんな短い距離では、誤差が大きくなりすぎるといわけである。では、江戸と蝦夷の間を測ってみれば、可能かもしれないと考えるに至った。これが、伊能忠敬が実測を行い、日本地図を描くことになるきっかけとなった。その後、どのようにして実測を行ったのか、また、地図が完成するまでに如何なる試練が待ち受けていたかなどは、紙面の都合上、別の書物に読むこととしたい。ただ、地球の大きさに関しては、現代の値とさほど変わらぬ高精度で値を求めることができたという事実だけは付記しておく。

このように忠敬は、51歳で第一の人生を終わらせた後、少年の時の夢を追い求めた。そのたゆまない好奇心、子供のような心、探求心は、恐れ入るものがある。この原動力により、後年(最終的には、忠敬没後、後継者の手によって完成するのだが)、世界にも誇れる日本地図の完成をみることになるのである。実際、幕末に訪れたイギリス艦隊は、この地図をみせられ、あまりの正確さに驚嘆したという。これによって、西洋人は、あなどっていた日本人に対する考えを改めたともいわれている。この地図は、その後様々な用途に用いられ、明治時代における日本地図のほとんどはこの忠敬の地図が基になっていたようである。



伊能忠敬「推歩先生」

* 第一の人生

=>家業:造酒業、醤油の醸造、
水運業など

* 51歳で隠居後、第2の人生:

江戸幕府天文方。

地球の大きさを計測するた

めに、江戸と蝦夷の距離測定。

→日本地図を描くことになった

きっかけ

→独自の日本地図は世界に

驚きをもたらした。

私も不惑の歳となったが、伊能忠敬が隠居した歳に比べれば若い。忠敬にあやかるとは恐れがたいが、忠敬の好奇心、探求心をせめても見習いたいものである。スペースアストロメトリの計画は欧米諸国に比べて、日本は立ち遅れてはいるが、忠敬が独自に日本地図を手がけ、世界に驚きをもたらしたように、日本も何とか追いつければと願う。いずれにせよ、銀河系全体の“地図”作りのため、世界で「推歩」がまさに始まろうとしている。

謝辞

- ・ JASMINEチーム(旧メンバーを含む)の皆様
- ・ 国立天文台・JAXAの皆様
- ・ 国内外の研究・教育機関の皆様
- ・ 検討・開発にご協力いただいている、
いただいた関連企業の皆様
- ・ そのほか、JASMINEを応援してくださる皆様

**多大なるご協力・ご支援に、
心より感謝申し上げます**



JASMINEは、まだまだ多難な道のなかば...

JASMINEの実現にむけて

今後もよろしく御願いたします

Jasmine

