光赤天連将来計画シンポジウム

2014-09-09

# SPICAプロジェクトの現状報告

芝井(阪大理)

多くの支援、推薦を受け、長時間をかけて開発し、多くの 人と時間をかけてサイエンス検討をしてきた。

しかしまだスタートできていない。

多くの光赤外研究者の支援はもちろん、参加が必須

- 1. 意義
- 2. 科学目的
- 3. 経緯
- 4. PLAN-B
- 5. 体制変更
- 6. 光赤天連からの支援
- 7. 学術会議、文部科学省、JAXA
- 8. 新しいPLAN (仮称 PLAN-D)

# 1. SPICAの意義

X SPICA: Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics

#### • 概要

・ SPICA は

多様で豊かな宇宙を生んだ二大過程である「銀河成長と惑星系形成」を解明する ことを目的をする、赤外線天文衛星である。

- 一径3.2mの望遠鏡を宇宙空間に設置し、日本がリードしてきた冷却技術を活用し、 望遠鏡と観測センサー全体を極低温(6K)に冷却する。このことにより、中間・遠赤外 線領域において、従来実現されてきた観測と比較して大幅に高感度、高解像度の観 測を目指す。IRTS、あかりで日本が積み上げてきた実績を基礎に実現を目指す。
- 日欧を軸とする国際協力ミッションである。

#### 基本仕様(案)

- 望遠鏡: 口径: 3.2m、極低温(-267℃)冷却
- 観測波長域: 20-210µm (PLAN-B)
- 軌道: 太陽-地球系L2点・ハロー軌道
- 全長: 6.7m (打ち上げ時)
- 重量: 3.7 t (wet)
- 打上ロケット: 新型基幹ロケットを想定
- 打ち上げ: 2025年度(目標)->2028年頃



# 2. 科学目的

#### オランダSRON、SAFARIコンソーシアムと共同で検討

サイエンス検討チームの組織

SPICA Science Task Force

日本側16名

今西昌俊(天文台)植田稔也(デンバー大)江上英一(アリゾナ大)

塩谷圭吾(宇宙研)大坪貴文(東大)<u>尾中 敬(</u>東大)<u>金田英宏</u>(名大)

- 左近 樹(東大)<u>河野孝太郎(東大)長尾</u> 透(愛媛大)松浦美香子(UCL)
- 山田 亨(東北大)山本 智(東大)和田武彦(宇宙研)
- 百瀬宗孝(茨城大)深川美里(阪大)(下線:分野代表)

特別参加2名:泉浦秀行(天文台) 高見道弘 (ASIAA)

欧州側24名

Marc Audard, Maarten Baes, Carsten Dominik, Alberto Franceschini, Martin Giard, Carlotta Gruppioni, Frank Helmich, Willem Jellema, Christine Joblin,

Franz Kerschbaum, Suzanne Madden, Jesus Martin-Pintado, Paco Najarro,

- Göran Olofsson, Albrecht Poglitch, Francesca Pozzi, Dimitra Rigopoulou,
- Peter Roelfsema, Bruce Sibthorpe, Luigi Spinoglio, Eckhard Sturm,

Floris van der Tak, Rens Waters, Erik Zackrisson,

韓国1名 Dae-Hee Lee

# SPICA**ミッションの**科学目的・意義

銀河成長と惑星系形成: 多様で豊かな宇宙を生んだ二大過程の解明

我々の宇宙は約138 億年前にビッグバンで生まれた。誕生時 に一様等方であった宇宙は、多様で豊かな現象に満ち、生命・ 知性さえ存在する現在の宇宙に変貌を遂げた。この宇宙多様 化のクライマックスは、宇宙青年期とよべる時代の銀河の誕生・ 成長過程、及び惑星系形成過程であろう。これらはいずれも天 体の原料であり生産物でもあるガスとダストの性質・役割と深く 関わっているため、ガスとダストの果たした役割を理解すること が必要であり、その最も良い研究手段が赤外線観測である。次 期赤外線天文衛星SPICAは、宇宙に多様性と豊かさをもたらし た上記二つの過程・現象を、高感度の赤外線観測によって解明 することを目的とする。

#### <u>科学目標</u>

#### 1. 銀河成長・物質進化過程の解明

- ダストに隠された銀河成長最盛期
- 星生成と物質進化の相互作用
- 2. 惑星系形成過程の解明
  - ガスの精密定量による惑星形成シナリオの検証
  - 惑星形成における水と氷の役割
  - 惑星系外縁天体の起源
- 3. 最高感度の宇宙赤外線天文台の実現

#### 科学目的1:銀河成長・物質進化過程の解明 (1)ダストに隠された銀河成長最盛期

- 研究の背景·未解決の問題
  - 「あかり」衛星やHerschel衛星などを含む多波長観測により、宇宙における星生成活動は、 z=1-3に最も活発となることが明らかになってきた。
  - この時代の星生成活動は、ダストに覆い隠された割合が高く、また、その多くを、超高光度 赤外線銀河(ULIRG:現在の宇宙では極めて稀な銀河種族)が担うという特徴がある。
  - 一初期宇宙におけるULIRG:その高い赤外線光度は何が担っているのか。その引き金となった物理過程は何か。星生成と活動銀河核(AGN)の寄与はどれほどで、両者はどう相互に影響を及ぼしつつ、進化していったのか。なぜz=1から現在にかけて急激にULIRGは減少したか。z>3の初期宇宙にはどれほどULIRGが存在したか。その本質は未解明。

#### ● 科学目標

- z=3までのULIRGの内部で起きている現象、および、その引き金を解明する。また、z=3以前の初期宇宙での星生成率密度の上昇を正確に捉えると同時に、z=1以降、現在にかけて、星生成率密度が急激に低下した原因を解明する。

#### ● 研究方法の骨子

- 一中間・遠赤外線はダストによる減光を受けにくい。原子・イオンのスペクトル線や多環式芳香族炭化水素(PAH)のバンド放射が多数あり、近傍銀河ではこの波長帯の分光観測に基づく、ダストに隠された 領域の物理量測定・状態診断を行う手法の開発が進んでいる。
- ー これをz=1-3のULIRG約500個に適用し、星生成・AGN比率の測定、衝撃波診断、金属量測定を行う。 高密度環境から一般の領域まで含む観測を行い、環境効果の役割を調べる。

#### 「銀河成長最盛期」の特徴(1): ダストに隠された星形成の割合が高い



- Spitzer、「あかり」、Herschelの観測より。
- z=1-3でピーク("銀河成長最盛期")。

この高い赤外線光度は何が担っているのか?巨大ブラック ホールへの質量降着(AGN)からの寄与はどれほどか?

> 上の図では、AGNの寄与はSEDモデルにより差し引き。 → 図の誤差棒に現れない不定性要因。

この「銀河形成最盛期」に、ダストによ る減光量もピークを迎えている。

Madau & Dickinson 2014

中間赤外線:ダストおよびガス情報の宝庫



有機物PAHバンド放射の有効性



中間赤外線で観測される、有機物PAHからの様々 なバンド放射のスペクトル。近傍の星形成銀河 NGC2798でみられるPAHバンド放射とそのモデ ル・フィットの例(Smith et al. 2007)。

#### PAH: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon 多環芳香族炭化水素



小型宇宙プラットフォームSFUに搭載された赤 外線望遠鏡IRTSは、天の川銀河系のすべて の方向からPAHの放射を初めて検出 (Onaka et al. 1996)。



銀河サーベイ観測のフローチャート



## SMI-Cam (R=20) による z=2~3の 銀河のPAH検出能力の検証(1)

目的: SMI-CamによるR=20のマルチバンド観測のデータから、 (1) z~3付近で、PAH放射から z を決められるか (2) z=2~3の銀河についてPAH放射強度 (星形成率)を精度良く決められるか (3) これらの目的のためにR=20が必要か、を観測模擬データから検証する。



- 観測模擬スペクトルの作成
  - ・近傍銀河の典型的スペクトル (Draine & Li 2007) に対し、 PAHバンドの相対強度比が0.5~2倍の間で変化した派生スペクトル(50種類)を用意
  - z = 2, 3、R=20, R=15 で観測した場合を模擬
  - ・連続波に対する PAHバンドのピーク強度が 5o, 10o, 50o の場合を想定

観測模擬スペクトルのフィッティング

・PAHFIT (Smith+ 2007) を使用

# ガスのスペクトル輝線検出個数(予想) 0.5平方度、4x10<sup>-19</sup> W/m<sup>2</sup>の場合

z	星生成指標		ショック指標 \$1		AGN指標 \$2		金属量 指標
	[O III] 52um	[S III] 33um	[Fe II] 26.0um	[Si II] 35um	[Ne V] 24um	[O IV] 25.9um	[N III] 57um
0-0.75	11	11	3	11	11	11	11
0.75-1.25	160	159	2	161	62	160	119
1.25-1.75	357	200	0	311	27	404	76
1.75-2.25	189	80	0	145	10	350	29
2.25-2.75	63	24	0	47	2	127	7
2.75-4.0	16(*)	12	0	26	1	80	0

- \$1: ショック指標[Fe II]は、[Fe II]/LIR=1E-4を仮定。
- \$2: AGN指標の[O IV], [Ne V] は、Spinoglio et al. (2012)のSeyfert銀河の[Ne V]/LIRとの比を採用。ここでは、 すべてのLuminosity Functionは全赤外銀河のそれを仮定(つまり全てがAGNであったとしての見積もり)
- (\*) z=3以上は波長210umを超えるためカウントされない。
- Bonato et al. 2014と同様の計算、ただし重力レンズ効果によるゲインを考慮せず。

# PAHバンド放射の検出銀河数(予想) 1x10<sup>-19</sup> W/m<sup>2</sup>の感度を仮定



Bonato, Wada, et al. in prep.

# 「銀河成長・物質進化過程の解明」における近傍銀河の役割

近傍(距離 < 100 Mpc, z < 0.02)の銀河を対象とすることで、

1. 銀河の局所領域(nucleus, spiral arm, bulge, inter-arm, halo, intergalactic regions)中の物理的条件を知る。

2. 暗い銀河(矮小銀河、楕円銀河)を捉え、進化初期(ダスト生成)と終焉(ガ ス・ダスト消滅)を理解する。

(主指標:ガス進化⇒金属量の増加、ダスト進化⇒ダスト・ガス質量比の増加)



#### ガス・ダスト進化と銀河成長(星生成活動・ 銀河中心核活動)の関係

・ガス・ダスト進化と銀河進化は密接に関連する。空間分解が重要。



## 研究計画:galaxy sample(1)

- "Unbiased view" ⇒ volume-limited sample
- ・星生成率と金属量のパラメータ空間で統計を得る ⇒ 距離100 Mpcが必要。
- ・銀河形態を万遍無くカバー(渦巻、楕円、レンズ状、矮小・不規則銀河・その他)。
- ・銀河の可視光度(星質量・銀河年齢)の広い範囲をカバー SFR [M\_gyr<sup>1</sup>]



惑星形成過程の解明



#### 微惑星・原始惑星の巨大衝突?

![](_page_16_Picture_3.jpeg)

13

#### (1) 巨大ガス惑星の形成時間に上限を与える

#### <u>背景</u>

- ー惑星は原始惑星系円盤の中で誕生する。特に木星クラスの巨大ガス惑星は、氷を含む 巨大コア誕生時に残留していたガスの暴走的降着によって形成されたと考えられる。
- ーしかしガス消失時間の高精度の観測ができないので、上記の仮説は検証できない。
- -ALMAなどの電波干渉計によってCO分子輝線の観測が進行中であるが、CO輝線強度 から水素分子が卓越するガス総量への換算には不定性が大きい。

#### 観測計画

-HD分子は2本のスペクトルを遠赤外域に持つ(112µmと56µm)。巨大ガス惑星形成現場の代表的温度である30-100Kの範囲において、これら2本の線強度から、D/H比(宇宙空間でほぼ一定)の仮定のみでガスの総質量が精度良く導ける。これによって原始惑星系円盤から巨大ガス惑星が形成される時間に上限を与える。

![](_page_17_Figure_7.jpeg)

牡牛座星生成領域など近距離 の星生成領域において、太陽 質量の1/3000の質量のガスを HD分子輝線で検出する。巨大 ガス惑星形成領域の典型的温 度30-100K程度。

HD 142527のダストとガス(CO) の観測結果(ALMA) Fukagawa et al., (2013) PASJ, 65, L14 14

#### (2) 円盤の水と氷の分布を知る

#### <u>背景</u>

-水は大量に存在する筈の分子種である。円盤中では水蒸気と氷の二相あり、 、相転移は100-200Kで起きる。水蒸気と氷両方とも、SPICAでなければ観測は難しい(ALMAは高温水蒸気を観測できる)。

#### <u> 観測計画</u>

-多くの水の遷移線(励起温度100-1000K)と44、62µmのバンド(下図)を用い、水と氷の両方を(同時)測定し、円盤内の水の相状態とその存在量(水蒸気+氷)の測定を行う。氷の2つのバンドから結晶質、非晶質を区別して、氷が熱による結晶化変性を受けたかどうか(熱史)を知る。

![](_page_18_Figure_5.jpeg)

![](_page_18_Figure_6.jpeg)

近傍恒星のカイパーベルト領域の微量ダストの検出  $(\mathbf{3})$ 

#### <u>背景</u>

- 一距離10pc以内のさまざまな年齢の主系列星対し、その星の固有運動を利用することで、50-100AUの距離にある惑星間塵を高感度で検出できる。検出限界は中心恒星の1000万分の1の光であり、太陽系の惑星間塵と同程度である。 観測計画
- -約100個の恒星を観測する。残骸円盤が年齢とともに希薄になり、カイバーベルトレベルの希薄さに達するまでを観測する。我々の太陽系との比較によって、太陽系カイパーベルトの成因を推定する。

![](_page_19_Figure_4.jpeg)

#### (4) TNO(Trans-Neptunian Objects)の生成過程の解明

#### <u>背景</u>

- 衝突を経験していない筈の100km以上の大きな太陽系のTNO天体については、Spitzer, Herschelの観測から、アルベドが予想より大きくばらつく(0.02-0.4)ことが判ってきた。 観測計画
- 一軌道運動を利用した超高感度の差分観測をする。衝突過程で生成された直径100km以下、30km以上のTNO天体について、ピークを含む20-210µmの範囲の放射エネルギーを測定し、可視の輝度と合わせて、アルベドと天体のサイズを導出する。アルベドから組成を推定し、サイズ分布から生成過程を決める。太陽系進化におけるTNOの役割を明らかにする。

![](_page_20_Figure_4.jpeg)

惑星系形成過程の鉱物学: 炭酸塩鉱物の検出 - 水、二酸化炭素

![](_page_21_Figure_1.jpeg)

![](_page_22_Picture_0.jpeg)

波長

冷却望遠鏡のメリット - 雑音源赤外線の大幅抑制による高感度化-

![](_page_23_Figure_1.jpeg)

点源検出感度の比較(1)ー連続光

![](_page_24_Figure_1.jpeg)

点源検出感度の比較(2)ースペクトル線

![](_page_25_Figure_1.jpeg)

波長

![](_page_26_Figure_0.jpeg)

Far-Infrared Deep Survey of GOODS-S Field by Herschel PACS, 200hrs Integration,

False-color Image made with MIPS 24 $\mu$ m, PACS 100 $\mu$ m, 160 $\mu$ m, Magnelli et al. (2013) <sup>27</sup>

## 3. 経緯

2000年 宇宙理学委員会がWG設置を承認 以降、戦略的開発研究費が交付される。 宇宙3機関統合・宇宙科学長期計画

2007年度 大型衛星計画に提案。これまでのMロケットを用いた 衛星の規模(中型衛星計画)を超えた、多くの分野が共同 して支え、実施する、フラッグシップミッション。

2008年度 大型衛星計画としてミッション定義審査MDR 合格 以降プリプロジェクト発足

技術検討の不十分問題

2010年度 大型衛星計画としてシステム要求審査SRR 合格 2011年度 中型衛星を超える規模ならば、宇宙科学の外側からの 貢献(資金、人的体制)が必要

以降、リスク低減フェーズ 宇宙科学ロードマップ、大型は難しくなる 2013年度 PLAN-Bへの変更 コストオーバーラン問題

- 3. ESAとの役割分担変更(PLAN-B)
  - の州は、ペイロード部全体のとりまとめ及びScience
     operationを部分的に分担。
  - ② 日本が全体取りまとめにおいてリードすることに変更は無く、 衛星システム、冷凍機提供、打上げ、ミッション運用を担当。
  - ③ ESA Cosmic Vision のMission of Opportunity選定は辞退し、 新たにMクラス\*に応募する。(2014年秋)
  - ④ 科学目的について欧州と再評価を行う。焦点面観測装置として、
     ・欧州の遠赤外線分光装置(SAFARI)
     ・日本の中間赤外線撮像(+分光)装置

のみとする。

\*) Mクラスは、最大約500M€の予算規模を欧州が負担。直近の公募(M4)は 2014年秋。M4の打上げターゲットは2025年頃の想定る。

#### 2.開発全体計画 新しい枠組みでの役割分担

![](_page_29_Figure_1.jpeg)

4. SPICAチーム新体制案

- ・SPICAプロジェクトのPLAN-Bに移行に伴い、日本側プロ ジェクトの体制変更。
- ESAのCosmic Vision M4提案に向けて強力な体制をオ ランダSRONと日欧連合で組織するとともに、日本側で は大学等の主体的参画および国立天文台との協力を 含むAll-Japan体制の構築。
- これらのためにSPICA(プリプロジェクト)チーム内体制 および関連大学等との関係を再構成。

# SPICAプロジェクト実施体制

プロジェクト全体としては、JAXAリードのもと、ESAおよび欧州コンソーシアムとの密接な協力で、衛 星全体の開発を進める。国内体制としては、JAXA宇宙科学研究所をコアとして、JAXA研究開発本 部・環境試験技術センターなどのJAXA内の密接な協力および、国立天文台、国内大学研究機関との 密接な協力で開発を進める。特に日本が担当する焦点面観測機器については、大学コンソーシアム が主体となって開発を行う。

![](_page_31_Figure_2.jpeg)

32

# 6. 光赤天連その他の支援

- ・国内コミュニティでの議論
  - 光赤外線天文学連絡会長期計画(2005)
    - ・ 地上大型光赤外線望遠鏡計画(TMT)とともに、日本の基幹プロジェクトとして合意
    - SPICAタスクフォースが長年にわたって支援。
    - ・ 新しいタスクフォース設置。
- ・国外の状況:世界のコミュニティがSPICAに結集している。
  - 欧州:2007年にESA Cosmic Vision に提案。将来ミッション候補の一つとして専 任チーム発足。オランダSRON中心に焦点面観測装置コンソーシアムを結成。 2013年に日欧役割分担変更の結果、2014年にMクラスに再提案を予定。
  - 米国:長期計画(ASTRO 2010)においてSPICAへの参加が強く勧告された。
  - ・韓国、台湾から研究者が科学検討に参加。
- ・世界共通のプロジェクトとして、国際的に期待されている。

# 7. 学術会議、文部科学省、JAXA

- 1. JAXA外評価·審查
  - 日本学術会議重点大型計画に選定(最高評価10件に入る)
  - ・科学技術学術審議会ロードマップ2014に掲載 (次ページ)
  - ・宇宙政策委員会で今後10年間で実行するプロジェクト の候補として議論中。
- 2. JAXA内審查
  - ・2008年 ミッション定義審査(MDR) 一合格(350億円)
  - •2010年 システム要求審査(SRR) 一合格(しかし500億円超) ー>リスク低減フェーズ
  - •2014年 △MDR+限定△SRR 一進行中。
  - •RMP#2(リスク低減活動) ほぼ終了。
  - ・SPICA新生フェーズ(2014-2015年度)提案準備

【物理学】次世代赤外線天文衛星 SPICA 計画

計画期間	H26-H28:設計 H29-H34:製作試験 H34:打上げ H34-H39:観測運用						
実施機関等	国内:宇宙航空研究開発機構(JAXA)、東京大、名古屋大、大阪大、国立天文台等の大学・研究機関 国外:欧州宇宙機構(ESA)等						
所要経費 (億円)	総額 868(概算)(日本側 538、 欧州側 330)						

日本独自の宇宙冷却技術と、赤外線天文衛星「あかり」(2006年打上げ)の赤外線天体サーベイ観測の結果を活用し、ヨーロッパの諸機関と共同して世界をリードする国際 共同研究計画。

宇宙の歴史においては、約100億年前を中心にして、恒星・惑星、銀河や、様々な元素が生成された。この最も活発な時代の過程および現象を宇宙物理学的、定量的に研究し解明することが主目的。また、宇宙赤外線天文台として、ほぼすべての宇宙・天文学研究分野で活躍が期待される。

- 最高感度の宇宙赤外線望遠鏡
  - 望遠鏡口径 3.2 メートル
  - 極低温冷却(絶対温度 6 K)
  - 遠赤外線•中間赤外線
- 国際共同利用天文台として利用
  - 2020年代に太陽-地球系の第2ラグランジュ 点ハロー軌道に打ち上げて5年間の観測

![](_page_34_Picture_10.jpeg)

# 8. 新しいPLAN (仮称 PLAN-D)

• PLAN-Bでは、 M4に応募する計画だった。しかし

-ヨーロッパ内研究者の意見統一が不十分

ーESA側リスクと経費増大の懸念(Mクラスとして)

ーJAXAとESAのどちらがリードするかが未定

の問題点が、2014年5、6月に顕在化した。

- 現在、研究者間(日本のSPICAチームと欧州のSAFARIコンソーシアム)、機関間(ESAとISAS)が共同で、変更案を検討中。詳細検討によるリスク(コスト)削減の方策が必要。打上遅延(2027年以降)、規模の(若干の)縮小、観測装置の変更などが議論されている。(PLAN-D)
- ・次回のMクラス募集(M5、2015年中頃想定)に応募する計画 (2028年頃の打ち上げが想定)
- ・口径3mが実現できない可能性大。口径縮小案で日欧の研究者 が早期に合意するのがラストチャンス(昨日の宇宙理学委)。

M4、M5: ESAのCosmic Vision Mクラスの第4、5番目のプロジェクト

光赤天連将来計画(スペース班)

2014-08-11

# SPICAプロジェクトの現状報告

芝井(阪大理)

多くの支援、推薦を受け、長時間をかけて開発し、多くの人と 時間をかけてサイエンス検討をしてきた。

しかしまだスタートできていない。

多くの光赤外研究者の支援はもちろん、参加が必須

- 1. 意義
- 2. 科学目的
- 3. 経緯
- 4. PLAN-B
- 5. 体制変更
- 6. 光赤天連からの支援
- 7. 学術会議、文部科学省、JAXA
- 8.新しいPLAN